

Введение в физику гидросферы

2025 Лекция №6

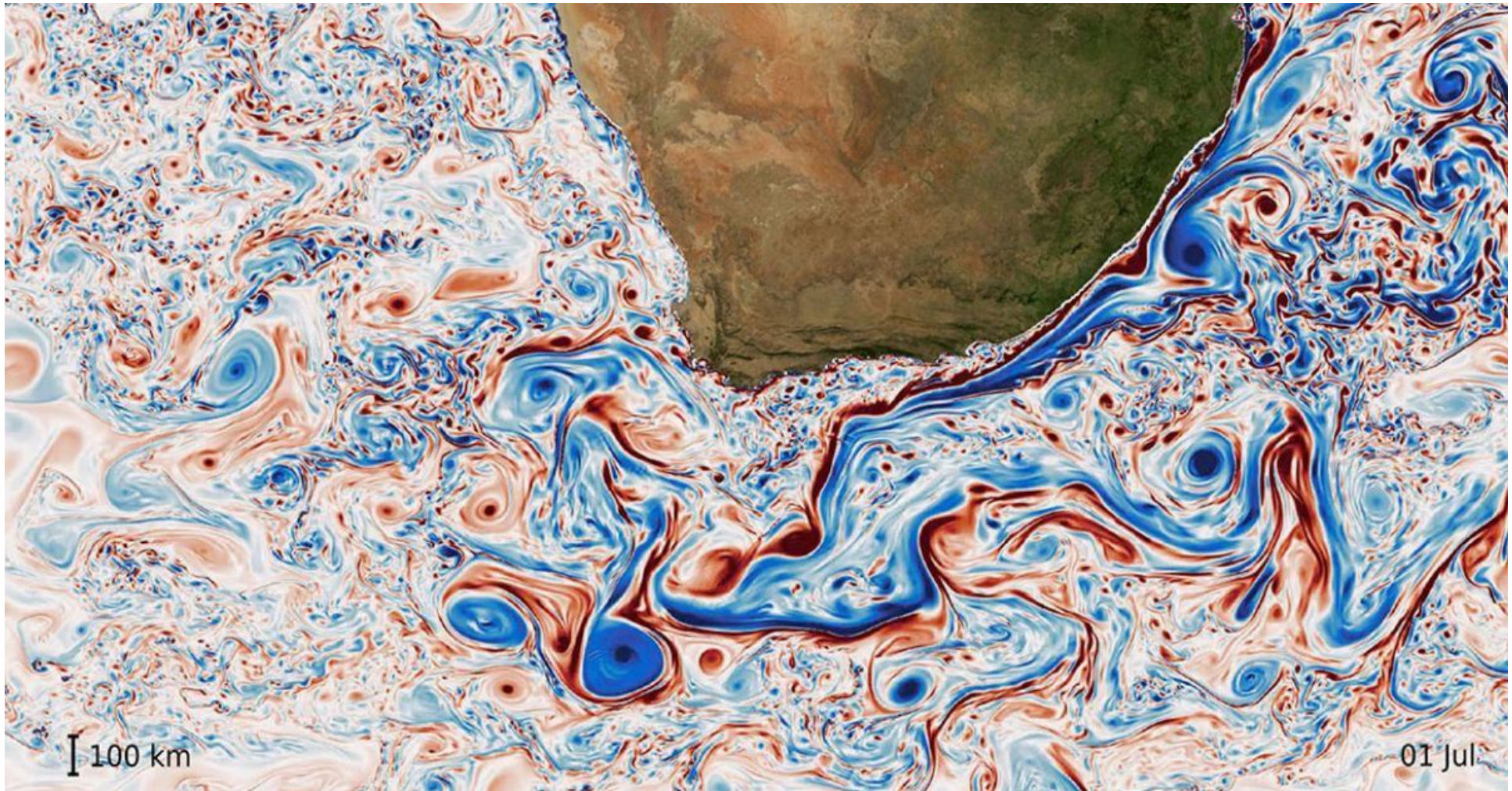
Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова



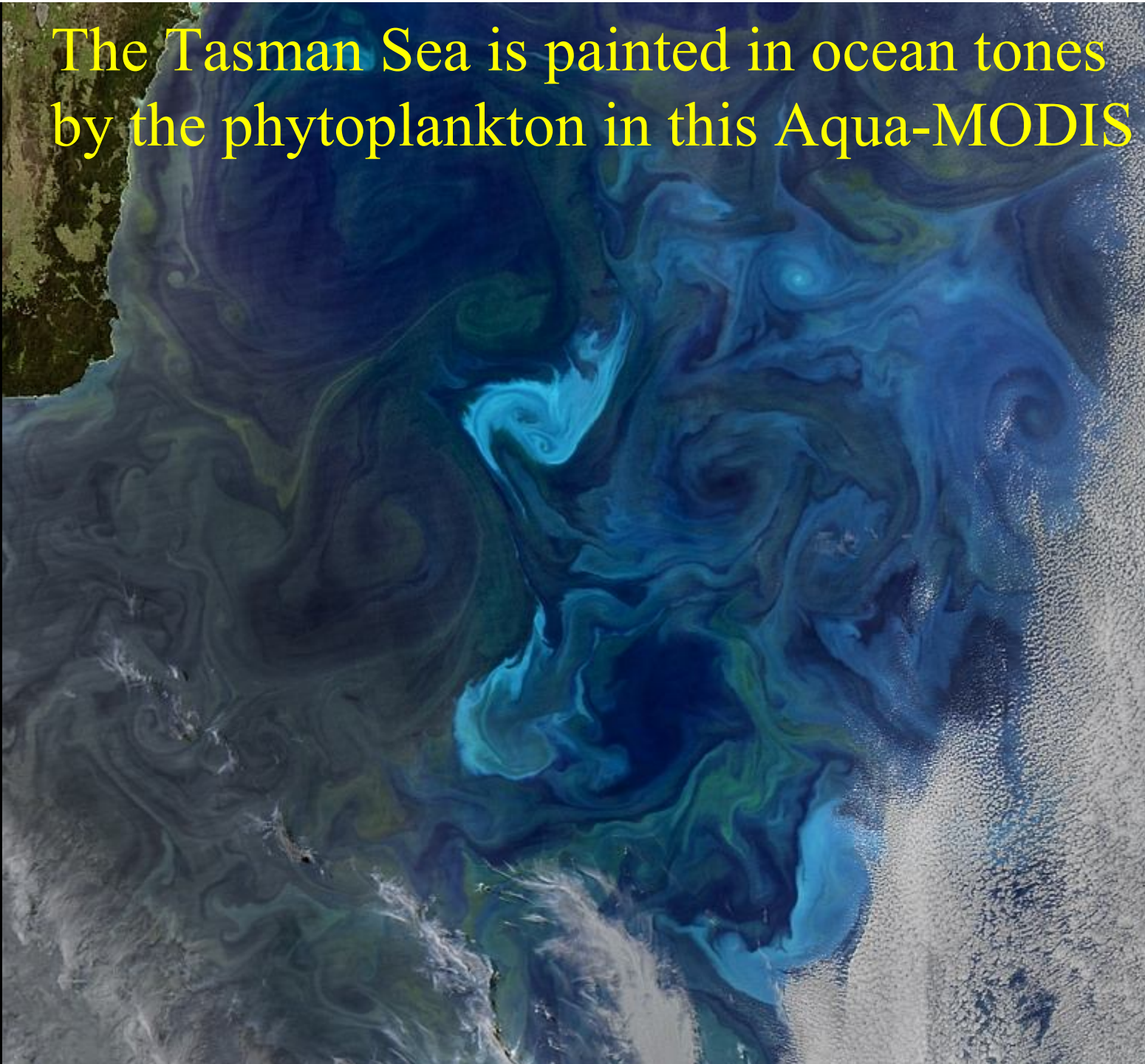


Mesoscale and submesoscale currents in the ocean south of Africa. A zoom into snapshots of surface normalized relative vorticity (a measure of rotation and turbulence) from a $1/60^\circ$ of horizontal resolution numerical simulation. (Image credit: Arne Biastoch, Franziska Schwarzkopf, GEOMAR)

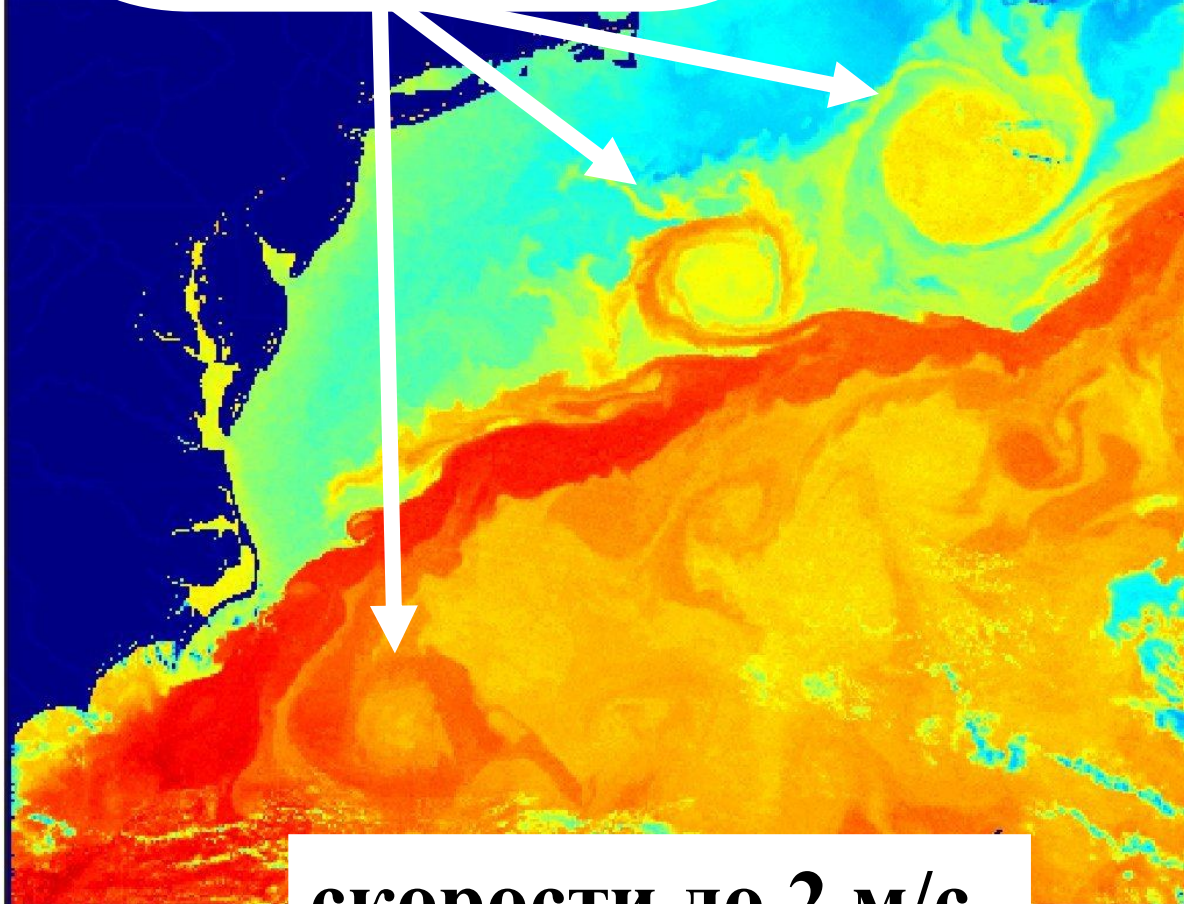
*Phytoplankton blooms observed by the
Aqua MODIS and Landsat 8 OLI satellites
on July 23, 2018. (Image credit: NASA)*



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



ринги
Гольфстрима



скорости до 2 м/с



CoastWatch

AVHRR Temperature

Filename: E9716211.ND7

IMGMAP Image

NOAA 12 Orbit: 31555

6/11/97 JD 162 11:27 GMT

Pixel Size: 4.17 km

Lat Range: 29.94N to 45.82N

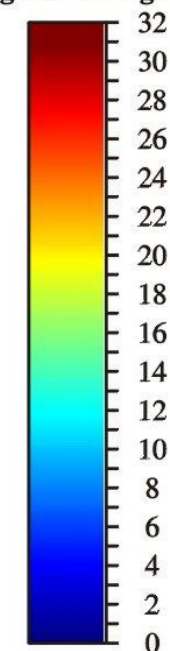
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

**Surface Temperature
(Degrees Centigrade)**

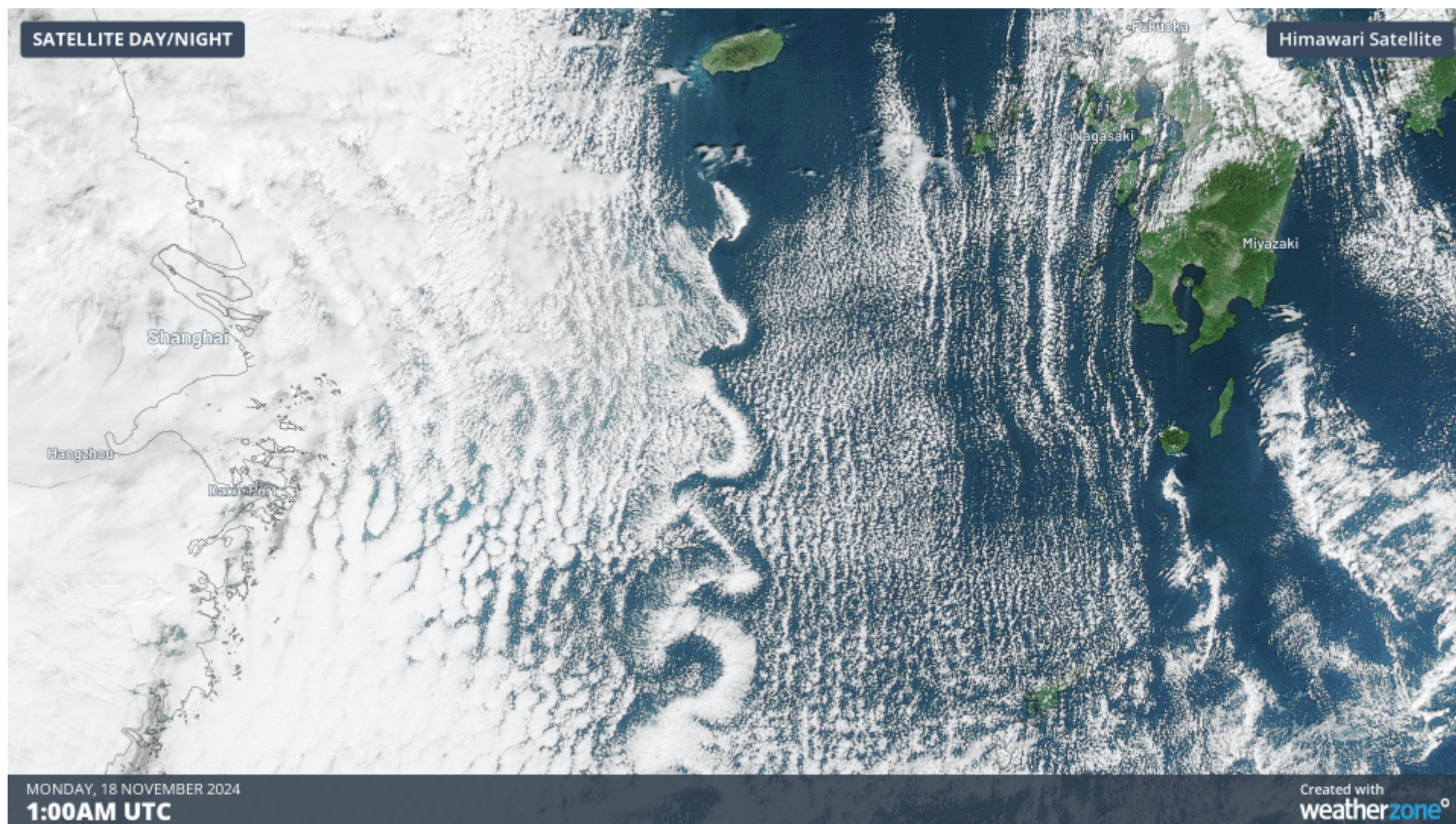




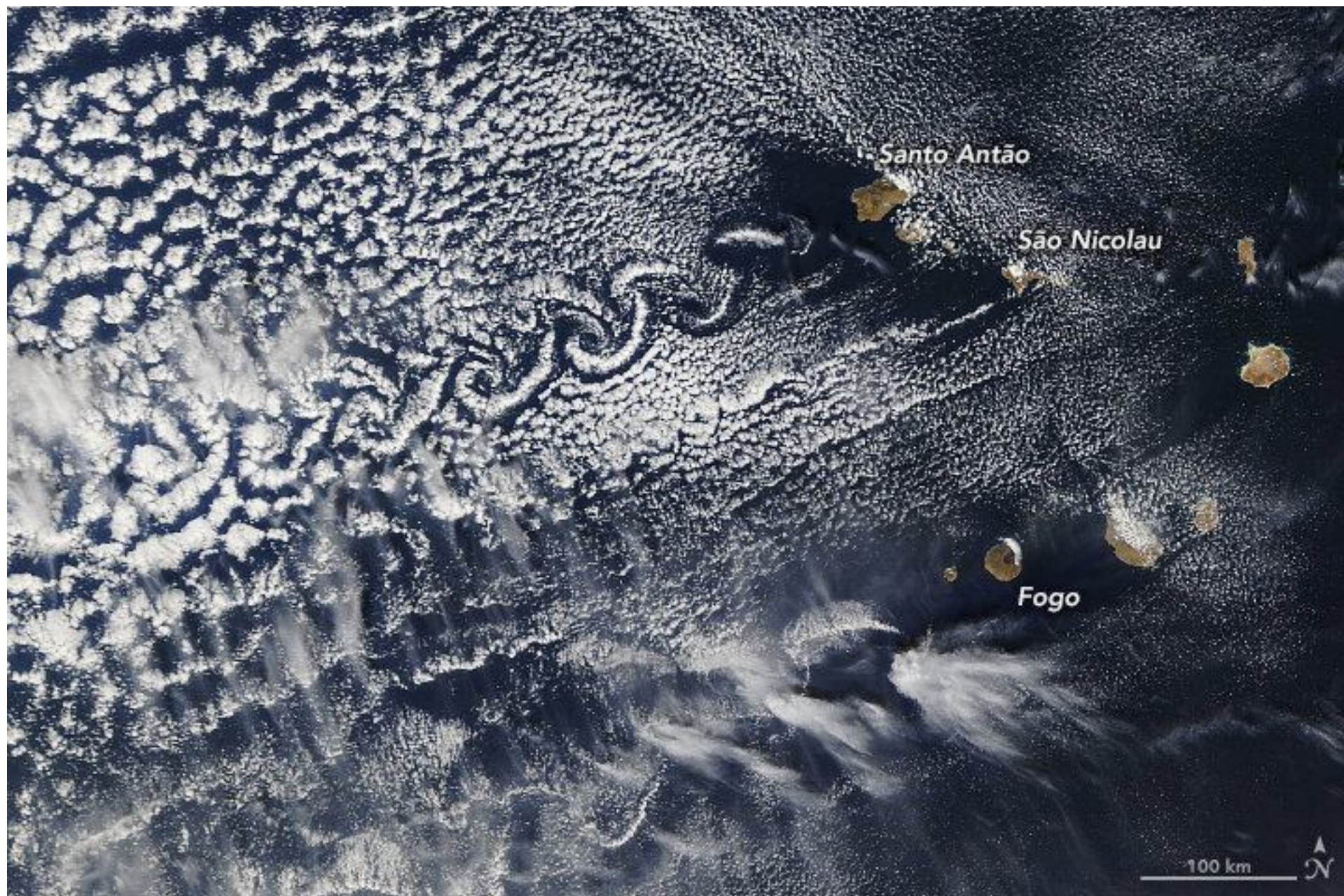
Вихревой характер поверхностных течений в Черном море. Обычно течения визуализируются за счет фитопланктона, но в данном случае визуальный эффект создал богатый карбонатами ил, который был занесен в воду после тропического шторма.



Вихри у побережжя Японії при цунамі 2011 г

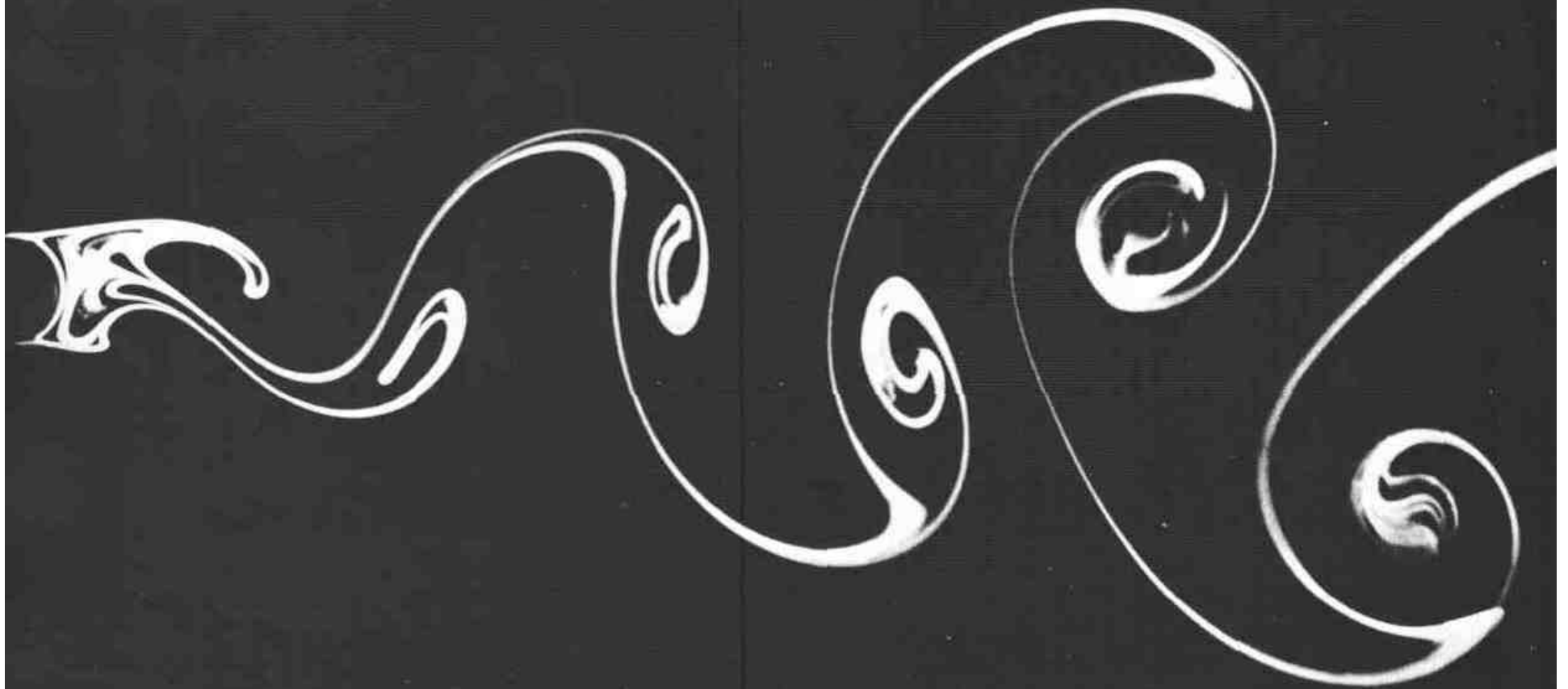


Вихревая дорожка Кармана, образованная в атмосфере потоком воздуха, обтекающим остров (East China Sea between Japan and China, South Korea's Jeju Island on November 18, 2024)



Вихревая дорожка Кармана за группой островов (Cape Verde)

$Re=140$



Неустойчивость течений

Сдвиговая неустойчивость

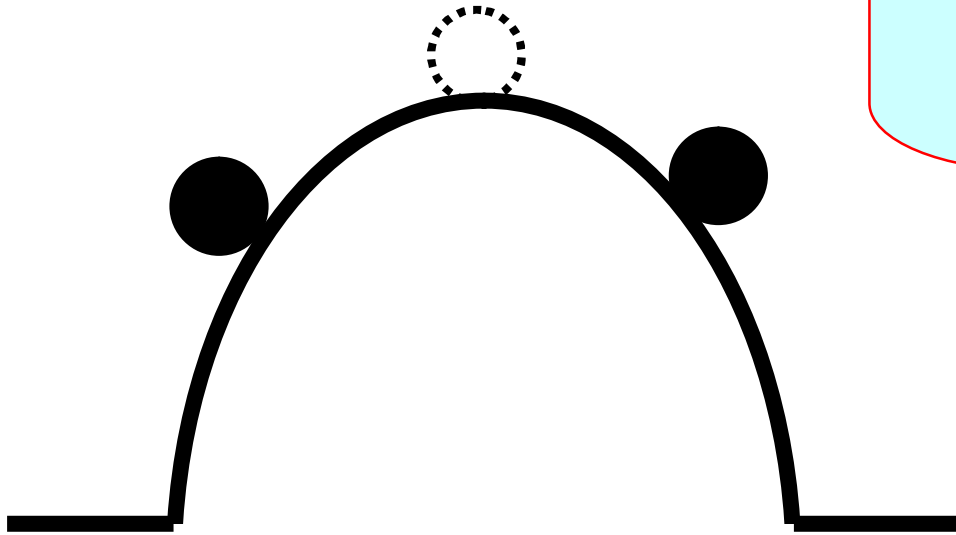


“Sunset at Rock Mountain Beach”

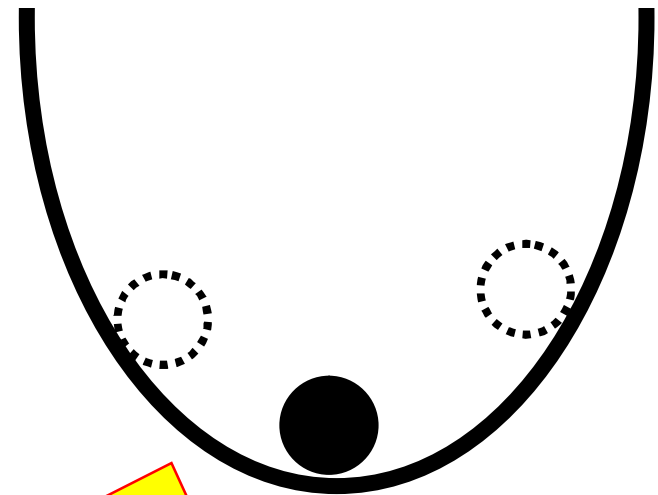
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO

Устойчивость

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

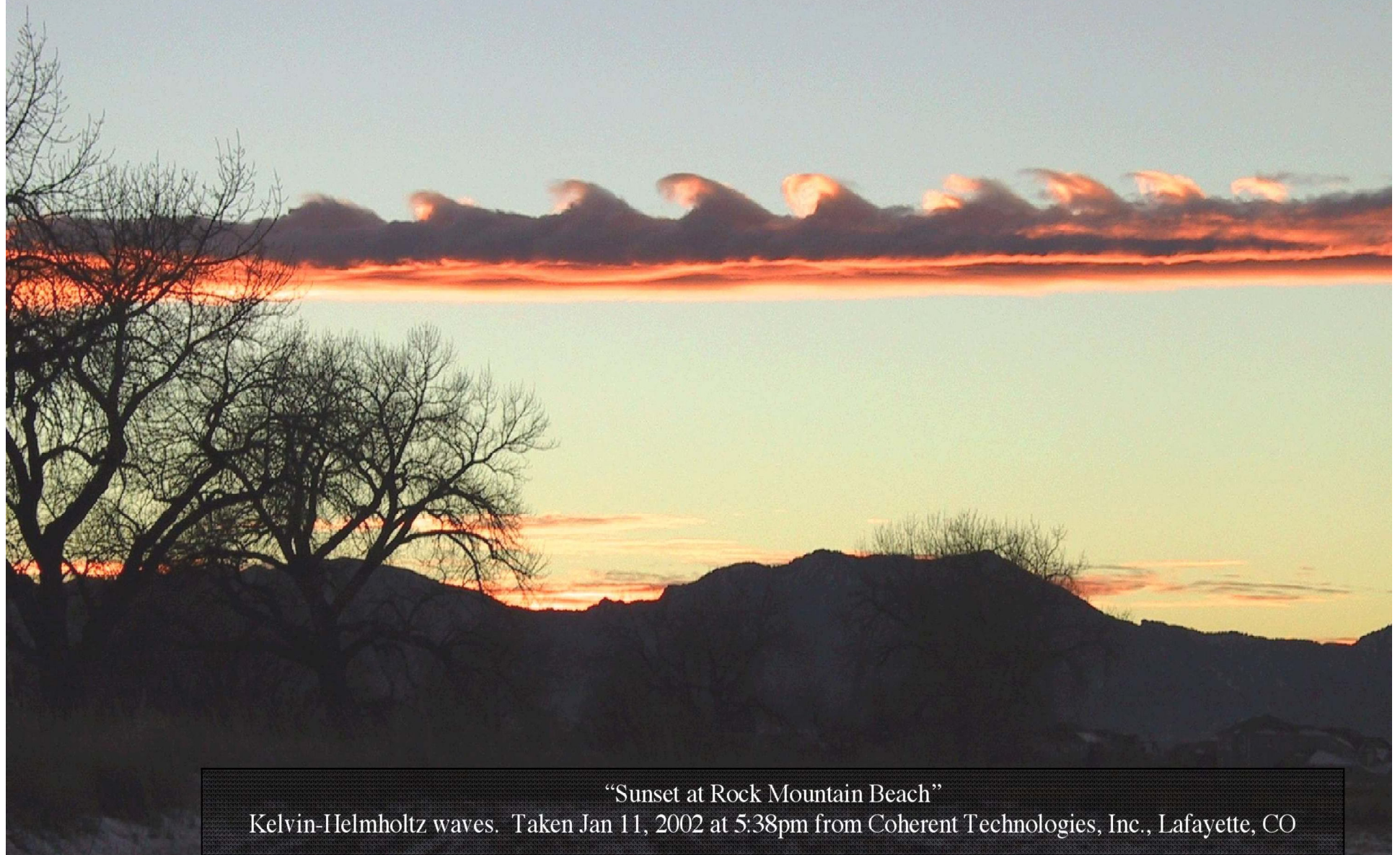


Малые
возмущения
нарастают со
временем



Малые
возмущения
затухают

Волны Кельвина-Гельмгольца

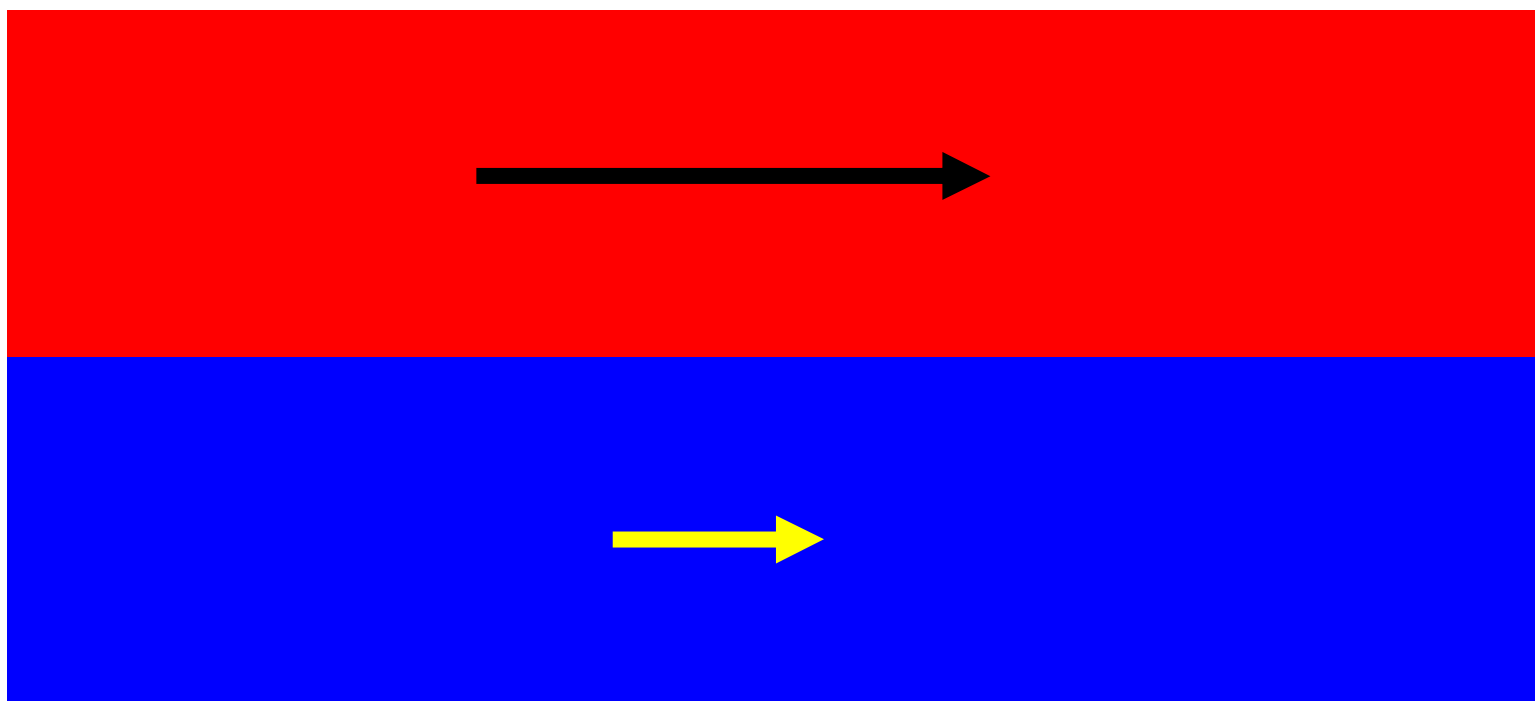


“Sunset at Rock Mountain Beach”

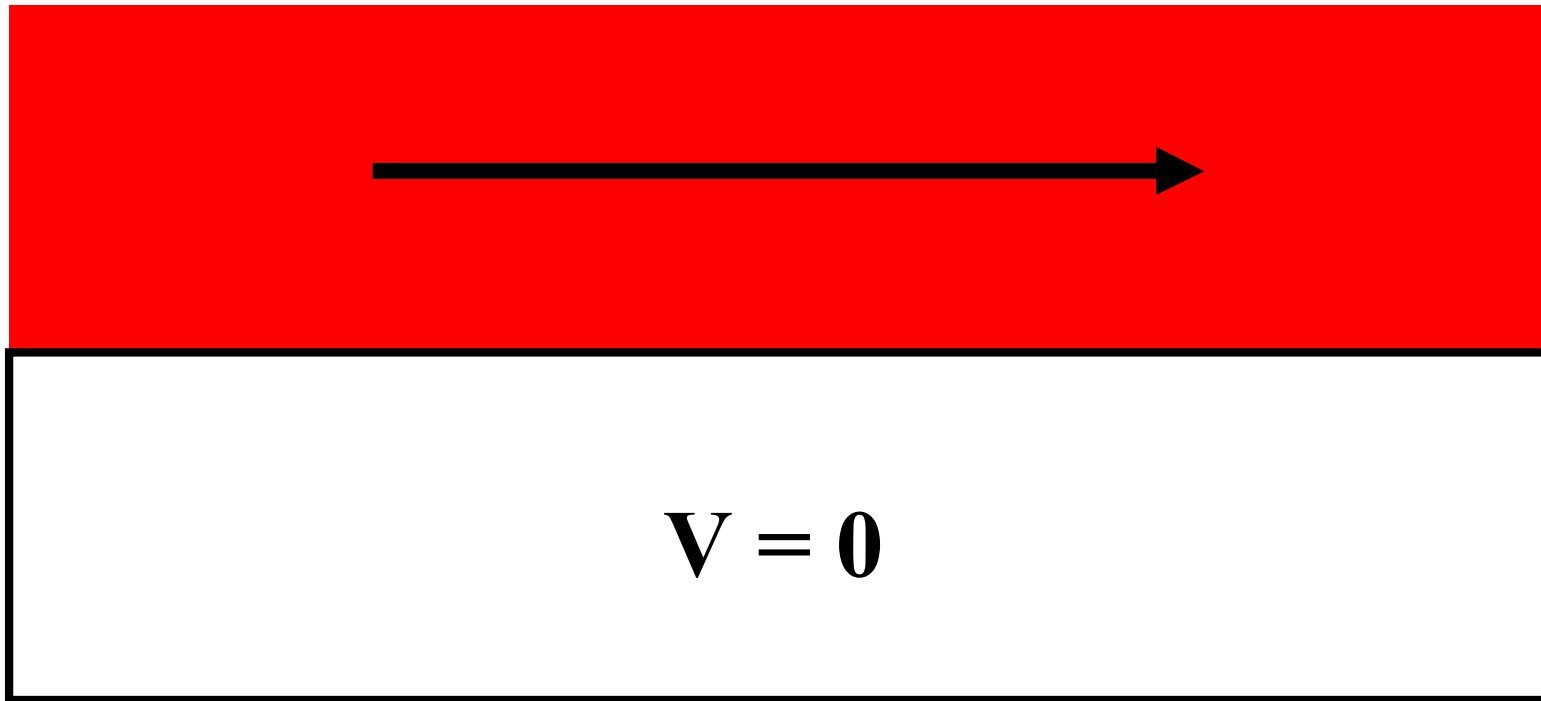
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO



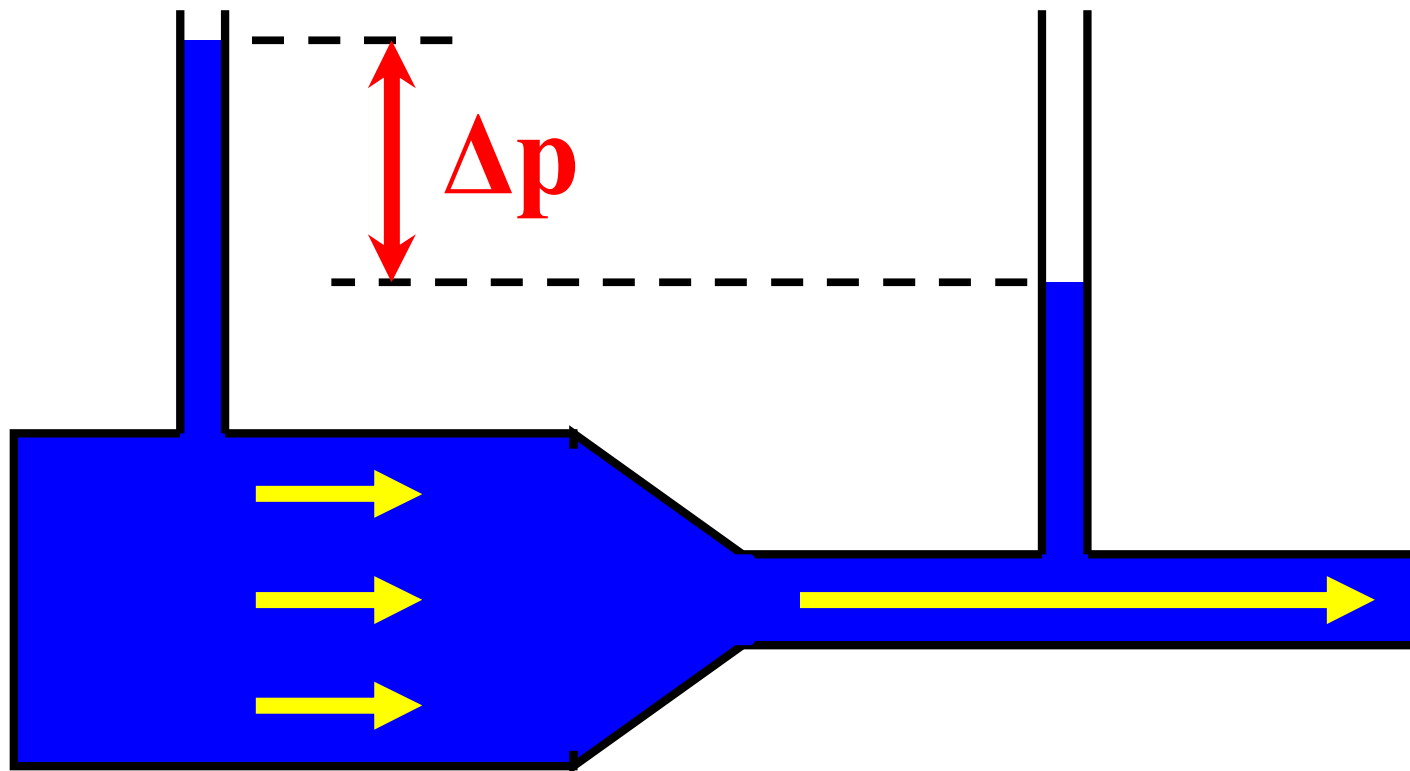
Сдвиговая неустойчивость



Сдвиговая неустойчивость



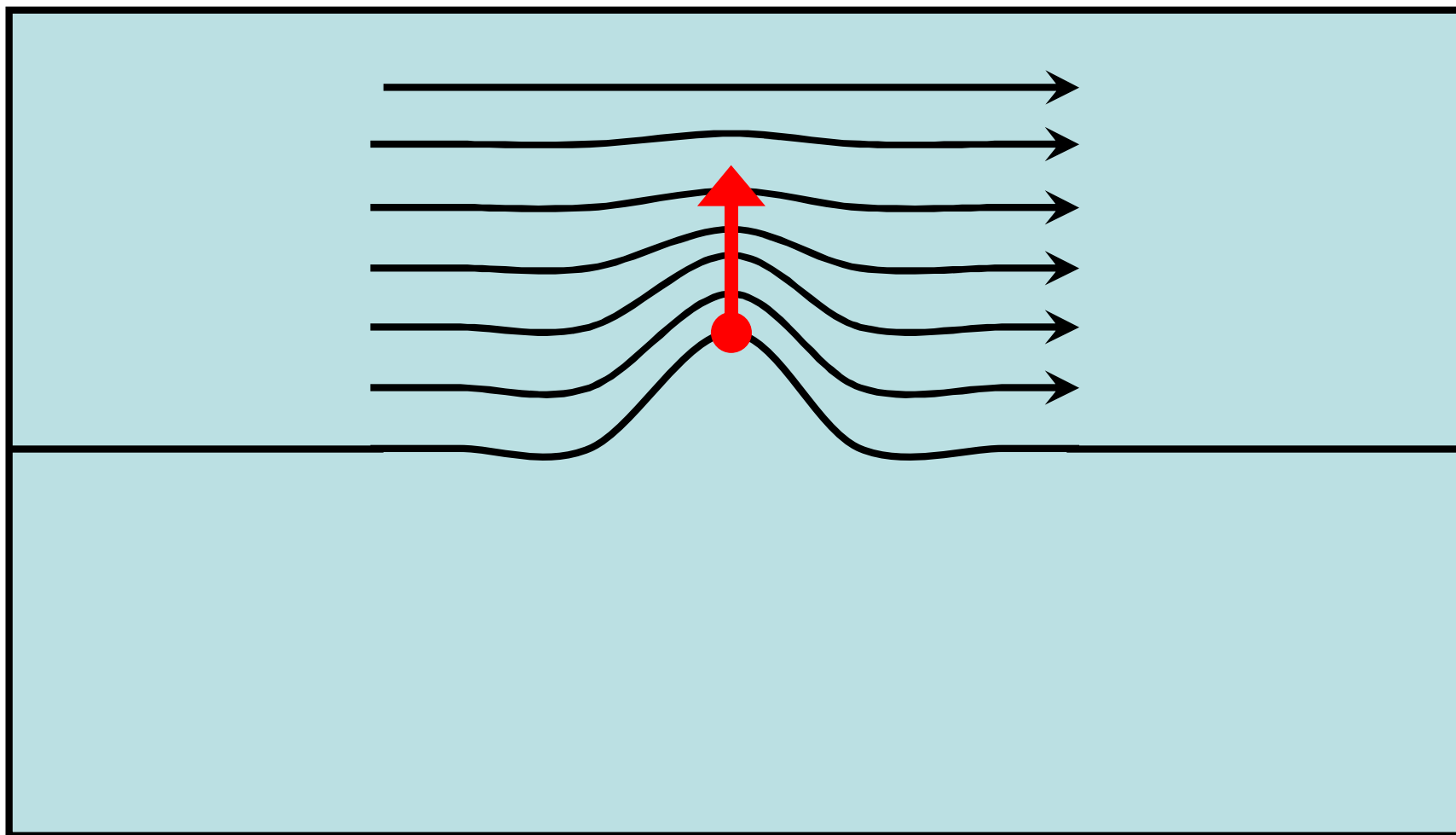
Парадокс гидромеханики



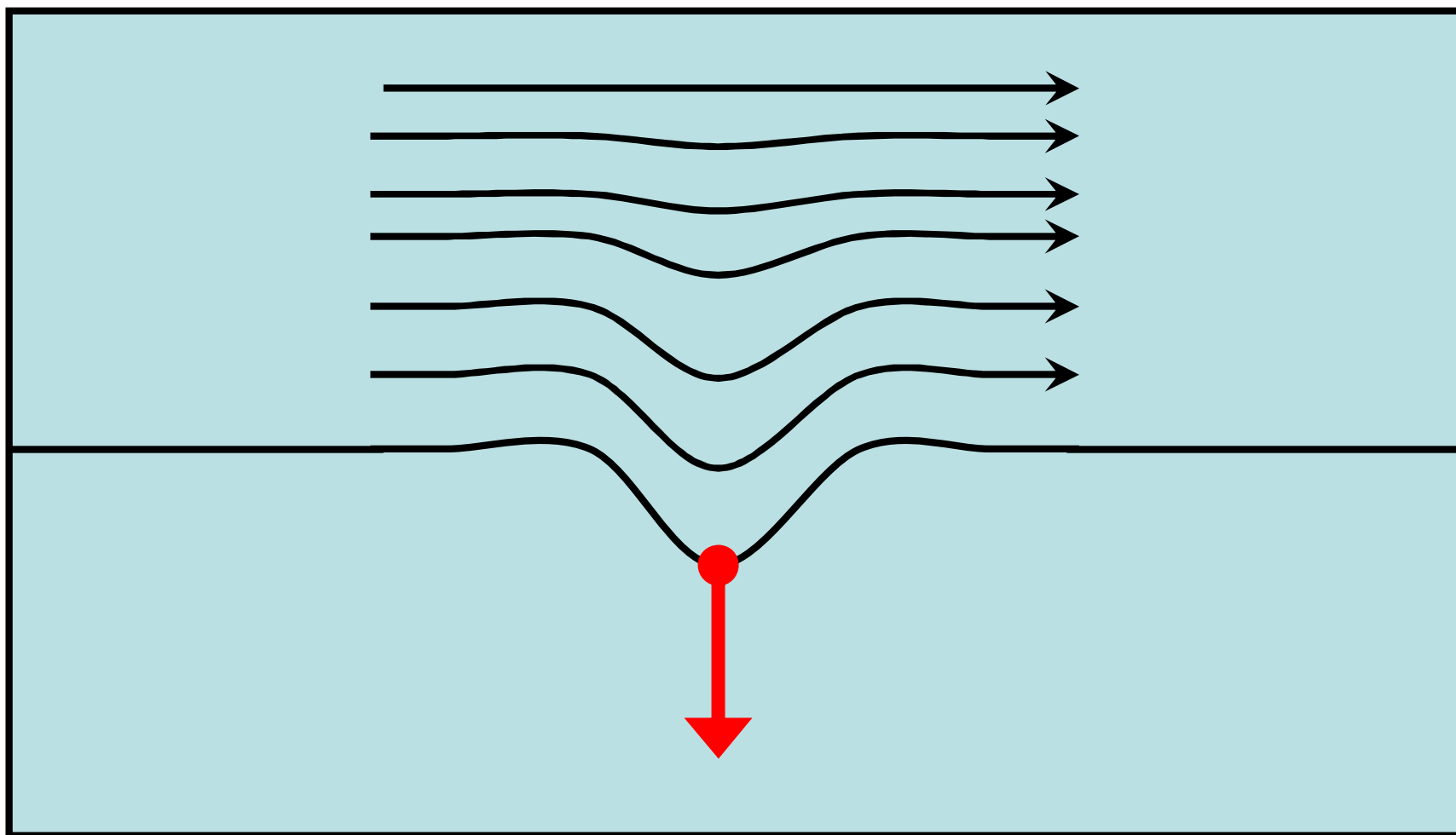
$$\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

уравнение Бернулли

Сдвиговая неустойчивость



Сдвиговая неустойчивость





Турбулентность

последняя нерешенная
проблема классической
физики!

течения

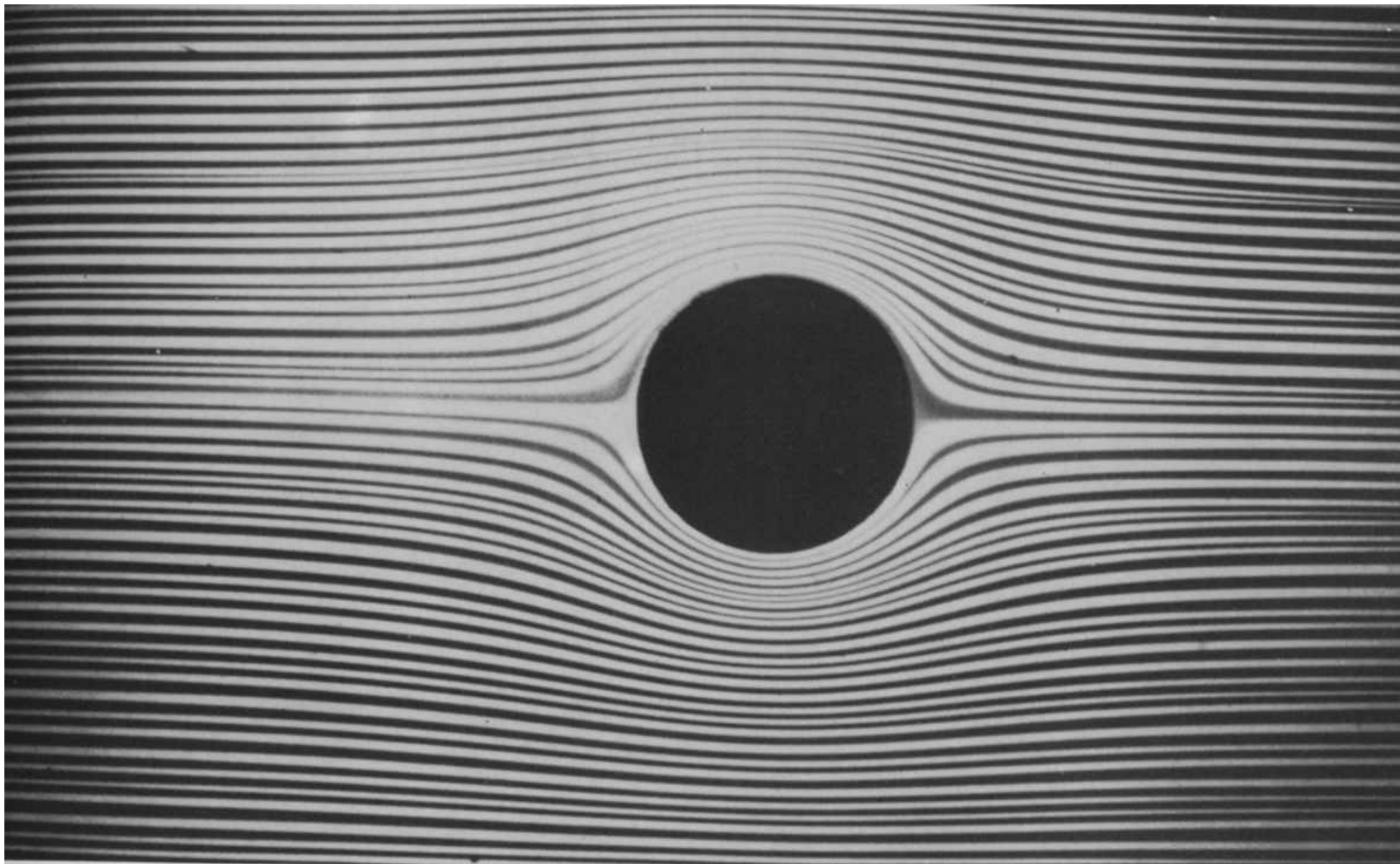
```
graph TD; A[течения] --> B[ламинарные]; A --> C[турбулентные];
```

ламинарные

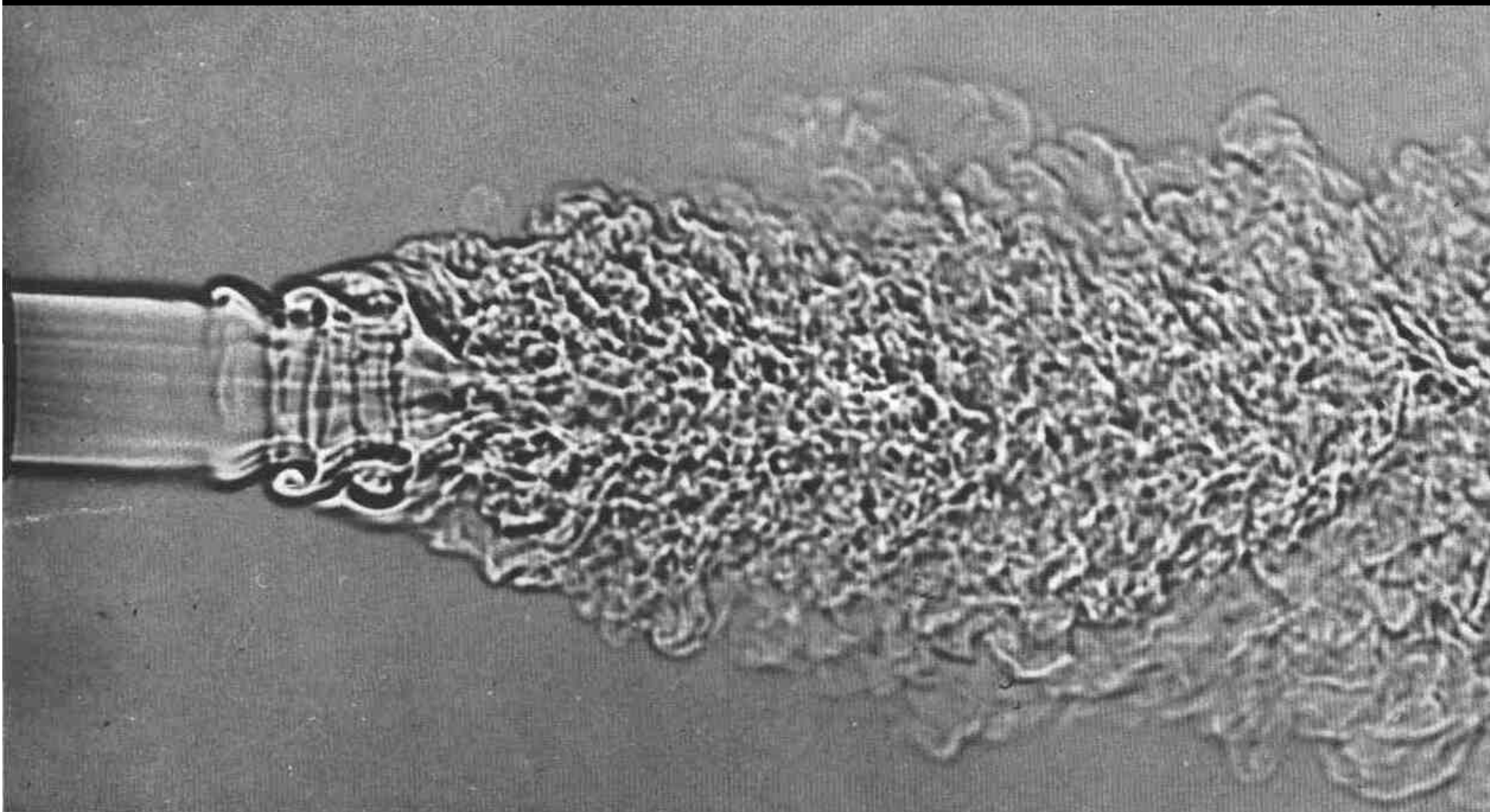
**спокойные и плавные
течения, меняющиеся
лишь в связи с
изменениями
действующих сил или
внешних условий**

турбулентные

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

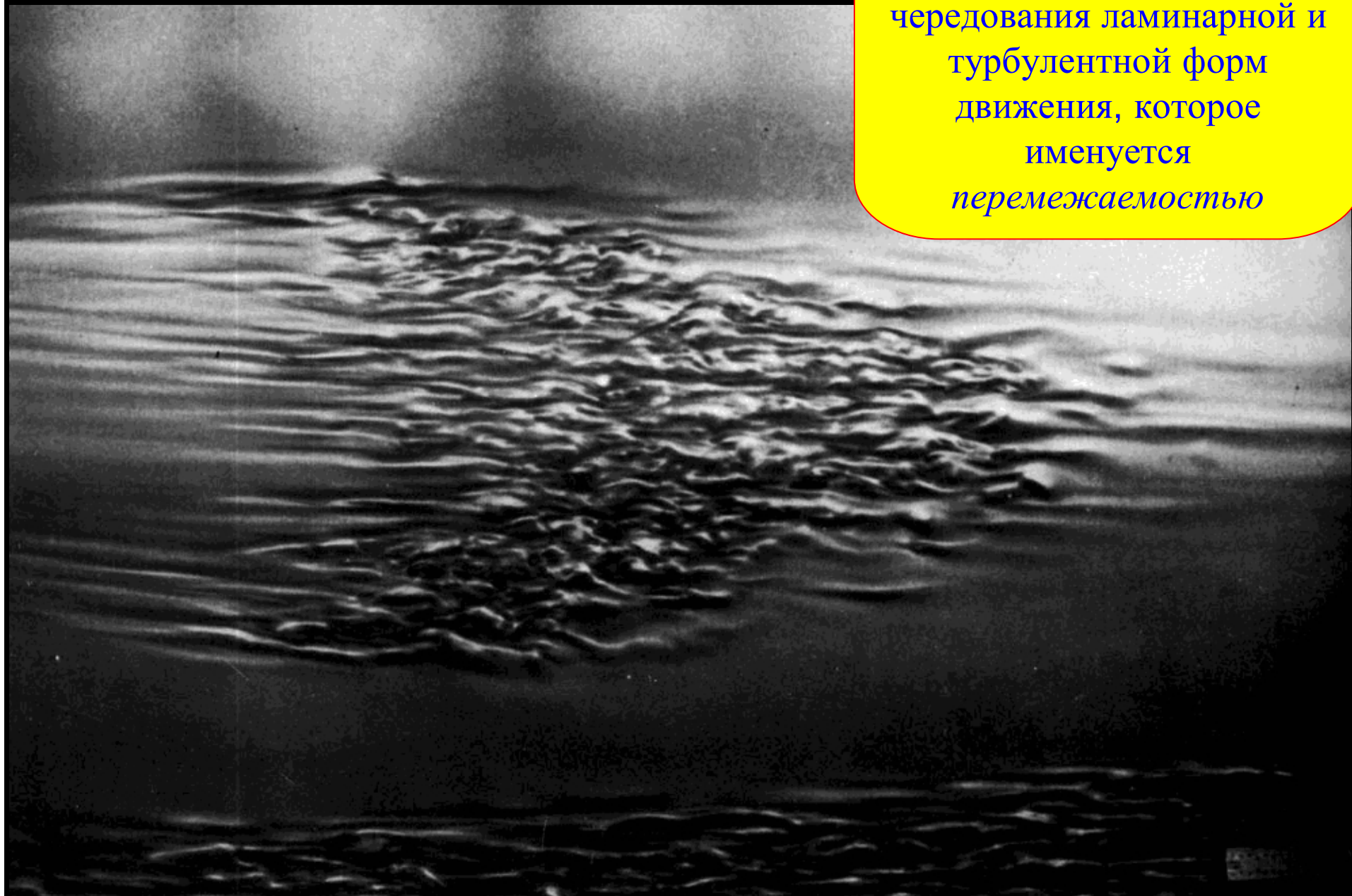


Ван-Дайк М. Альбом течений жидкости и газа. 1986



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.

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).

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.

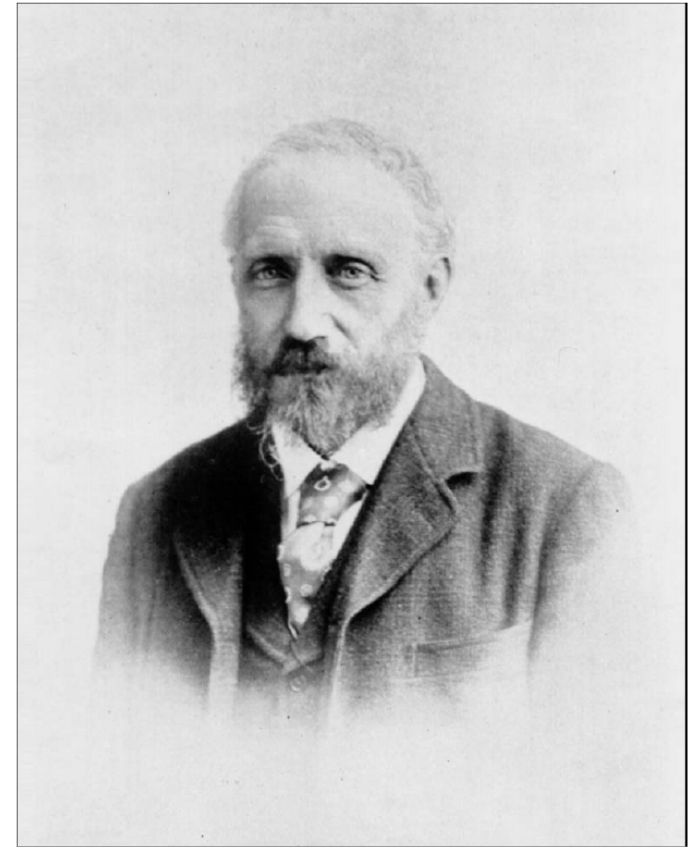
Такая невоспроизводимость есть следствие сложной динамики среды, определяемой неустойчивостью индивидуальных движений, и она не связана с неполнотой описания, флуктуациями или действием внешних шумов

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)

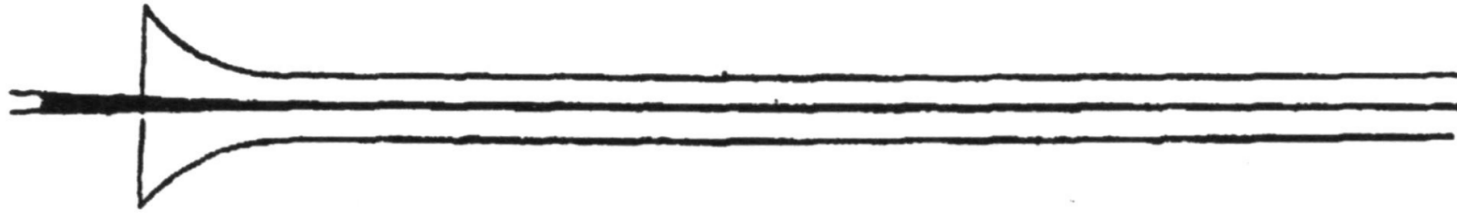
Osborne Reynolds
(1842 – 1912)

Reynolds' experiment, described in his paper published in 1883

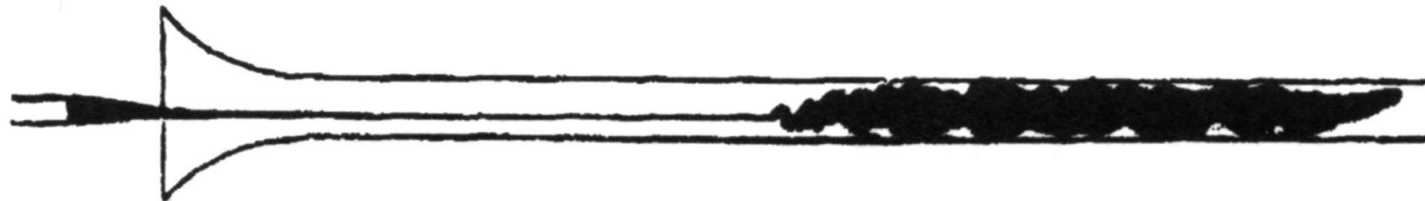


Figure 1

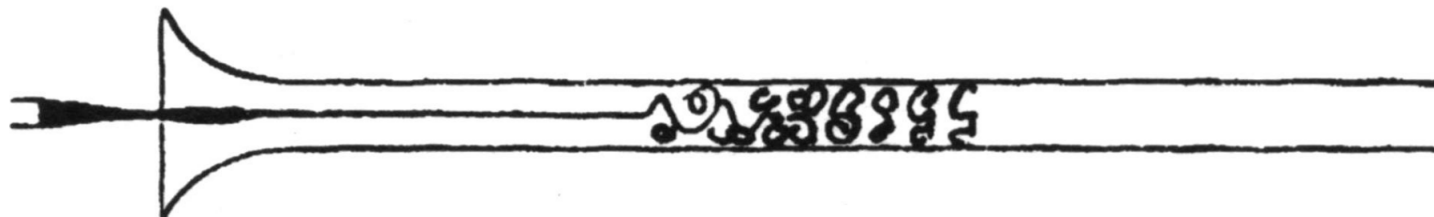
Osborne Reynolds tank today, The University of Manchester.



“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

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

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

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

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

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

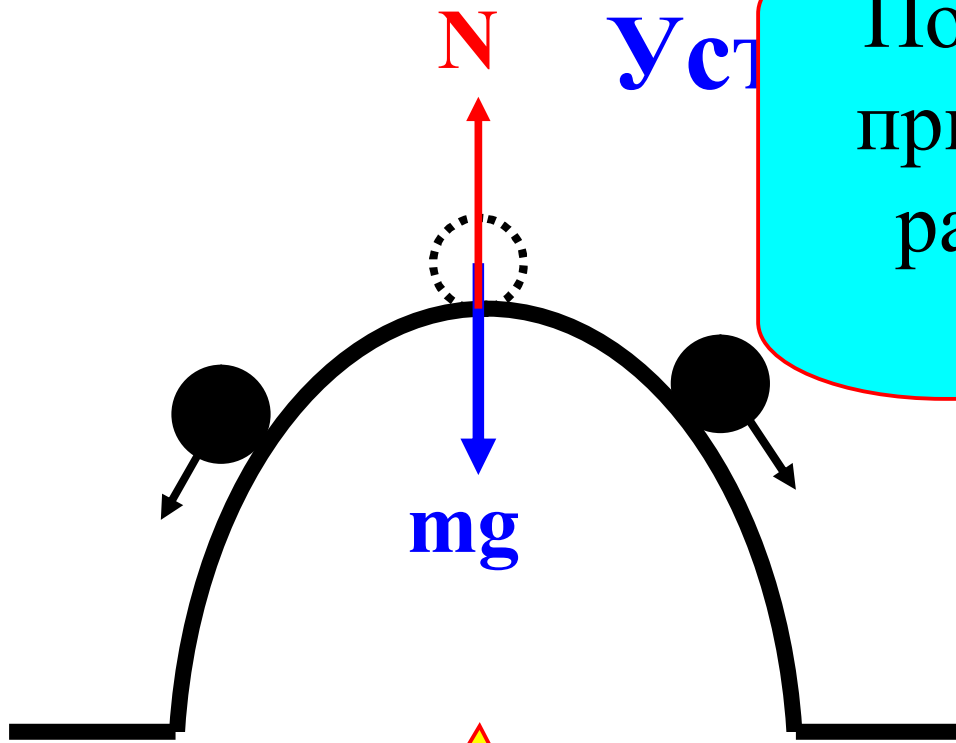
$$Re_{\text{атмосфера}} \sim \frac{10[\text{м/с}] \times 10^3[\text{м}]}{1.5 \cdot 10^{-5}[\text{м}^2/\text{с}]} \approx 10^9$$

Почему течение становится турбулентным?

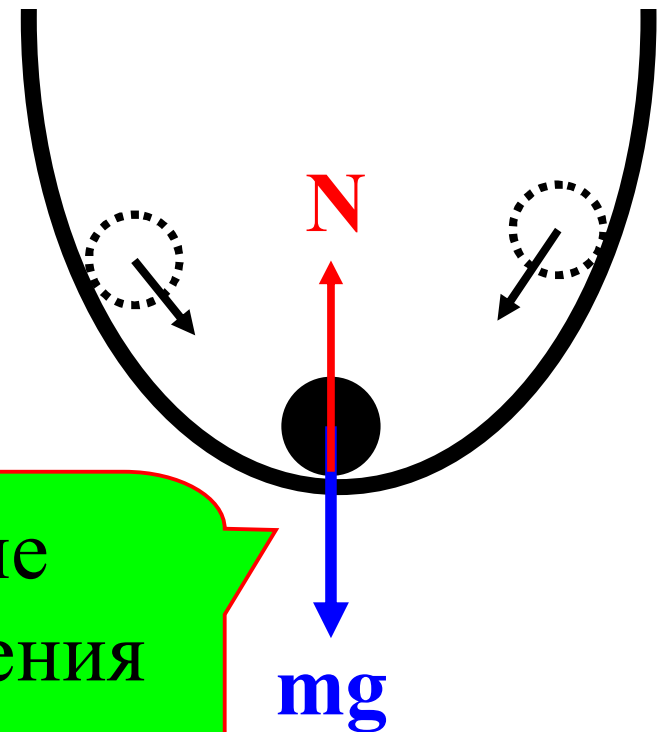
Неустойчивости (основные):

- ❑ Сдвиговая неустойчивость (Кельвина-Гельмгольца, shear instability)
- ❑ Конвективная неустойчивость (Рэля-Бенара)
- ❑ ...

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

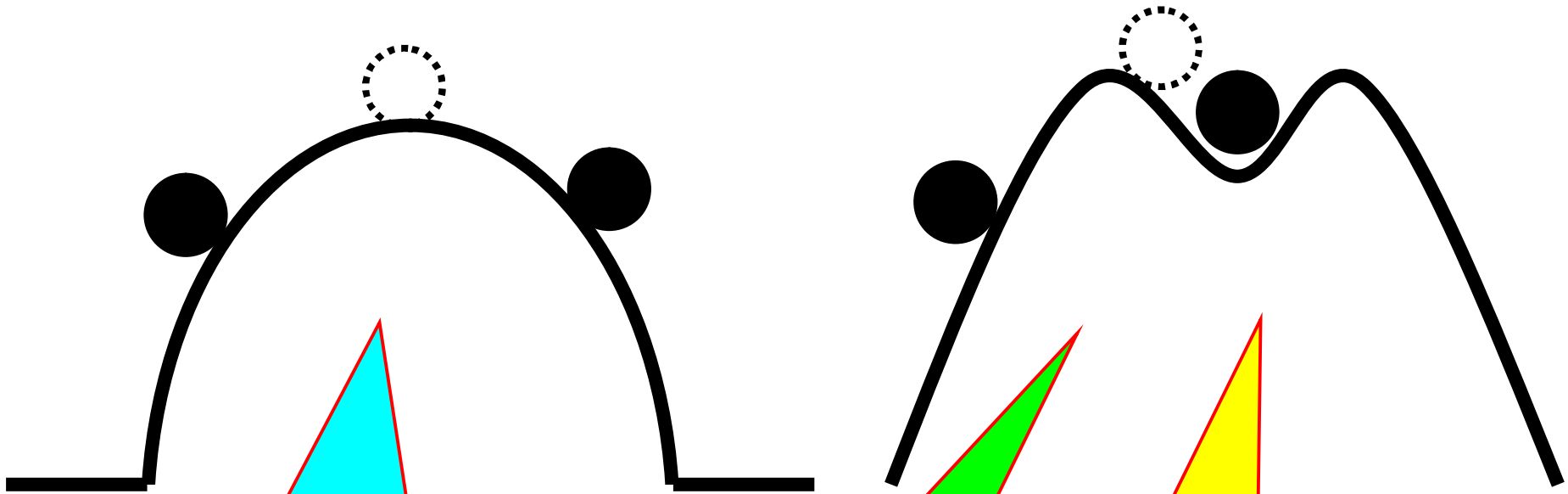


Малые
возмущения
нарастают со
временем



Малые
возмущения
затухают

Устойчивость



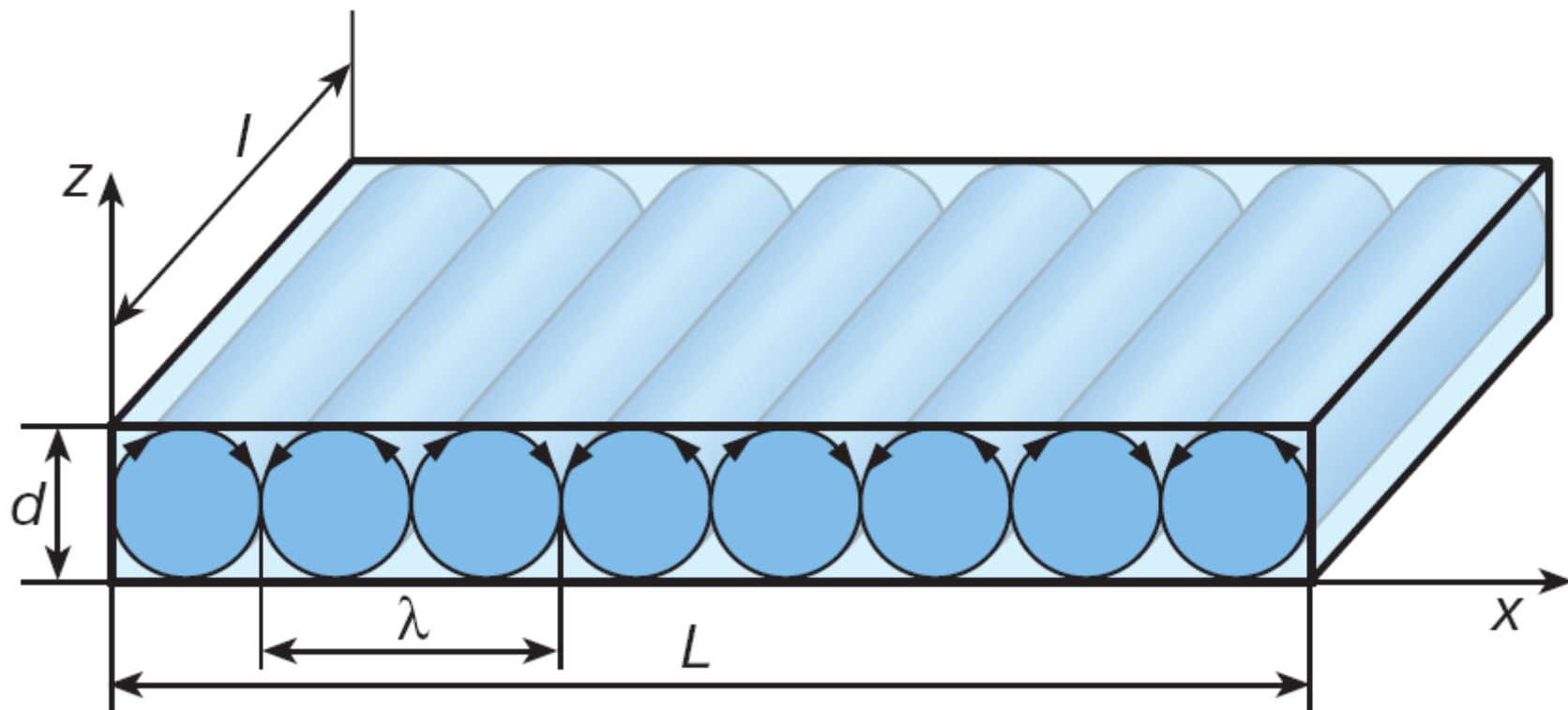
неустойчива по
отношению к
бесконечно
малым
возмущениям

малые
возмущения
затухают

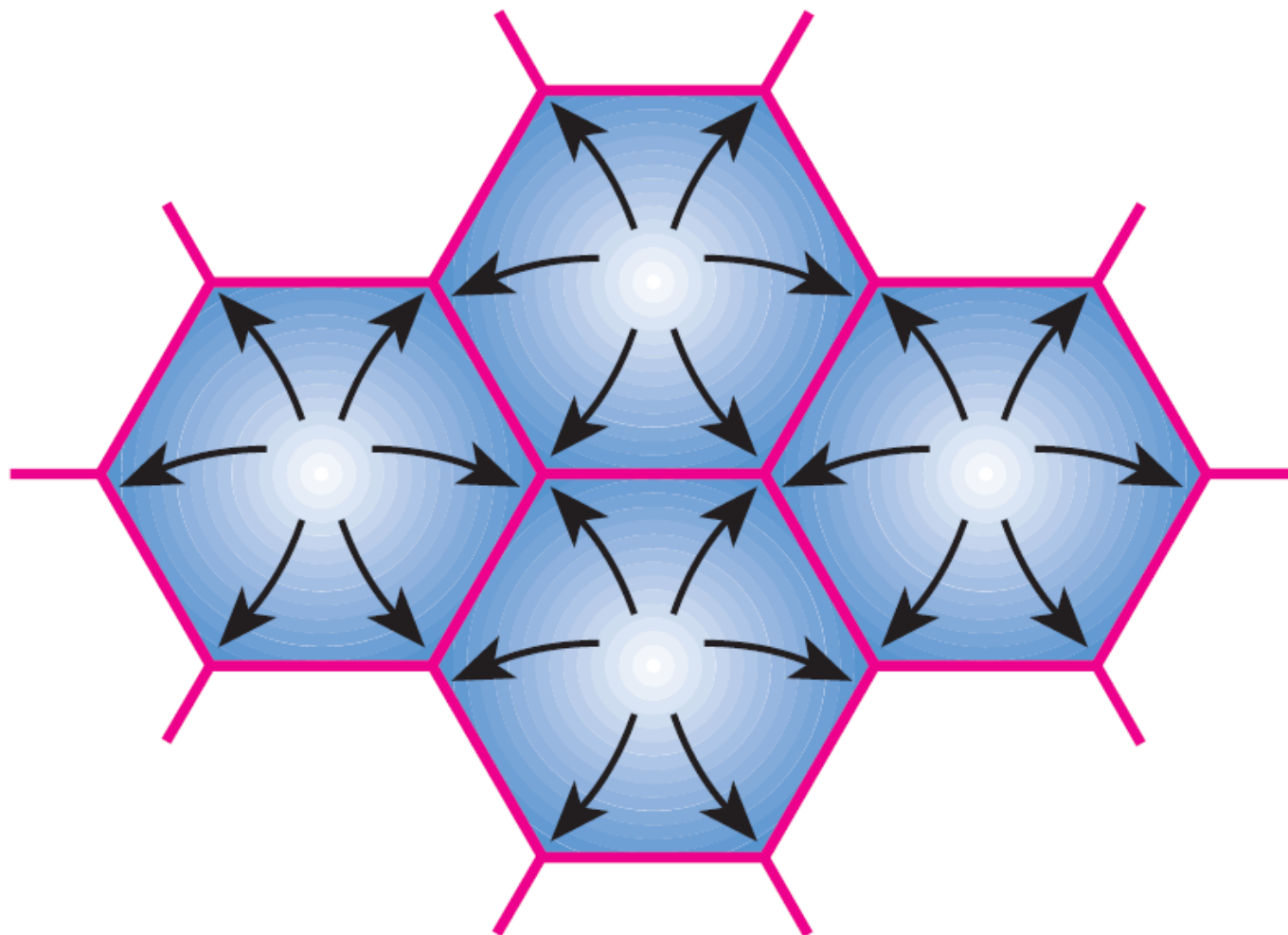
большие
возмущения
нарастают со
временем

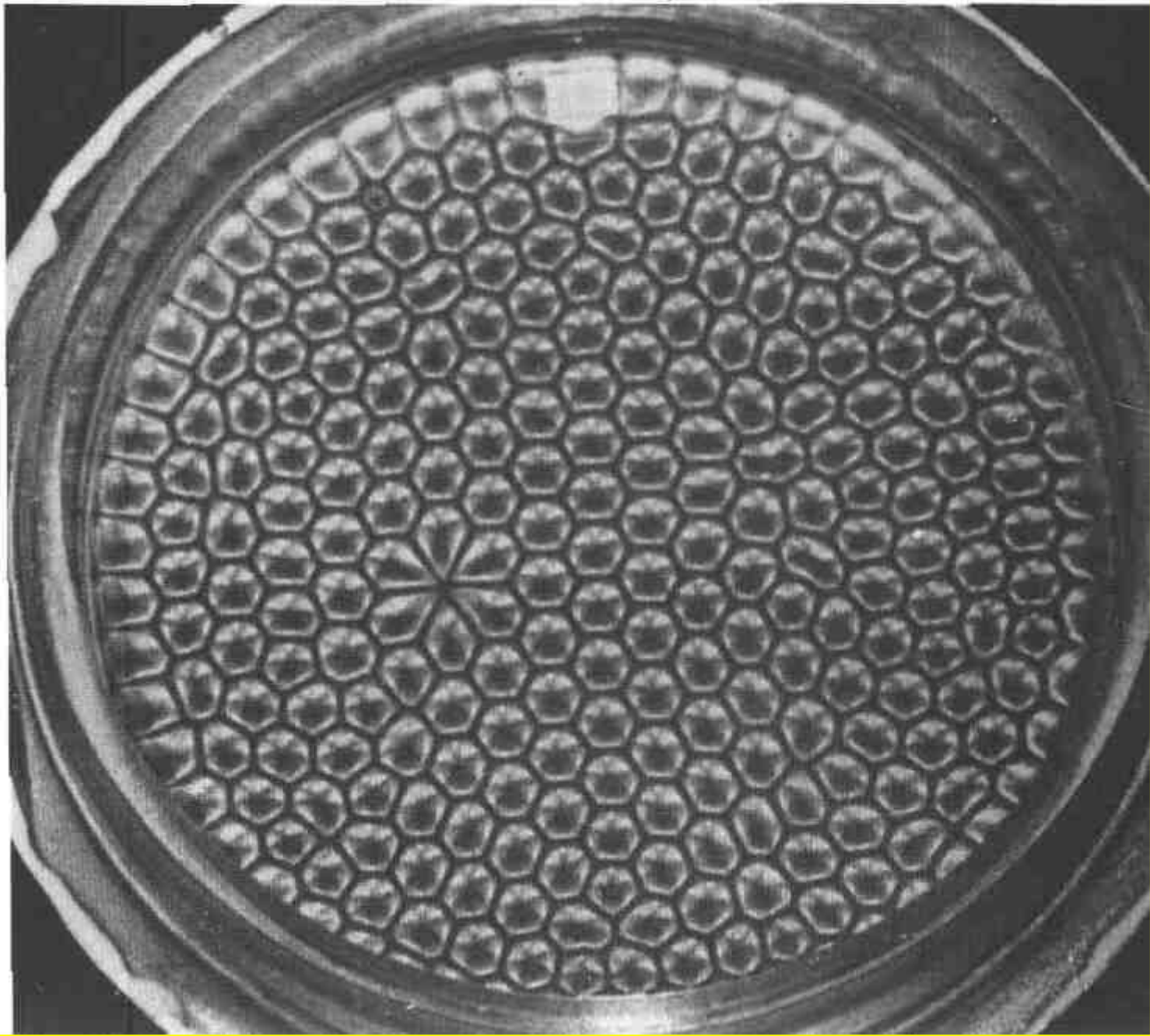
**Конвективной (Рэля-Бенара)
неустойчивостью** называется
неустойчивость в газовой или
жидкой среде, находящейся в поле
силы тяжести, которая
пронизывается потоком тепла в
направлении противоположном
вектору g

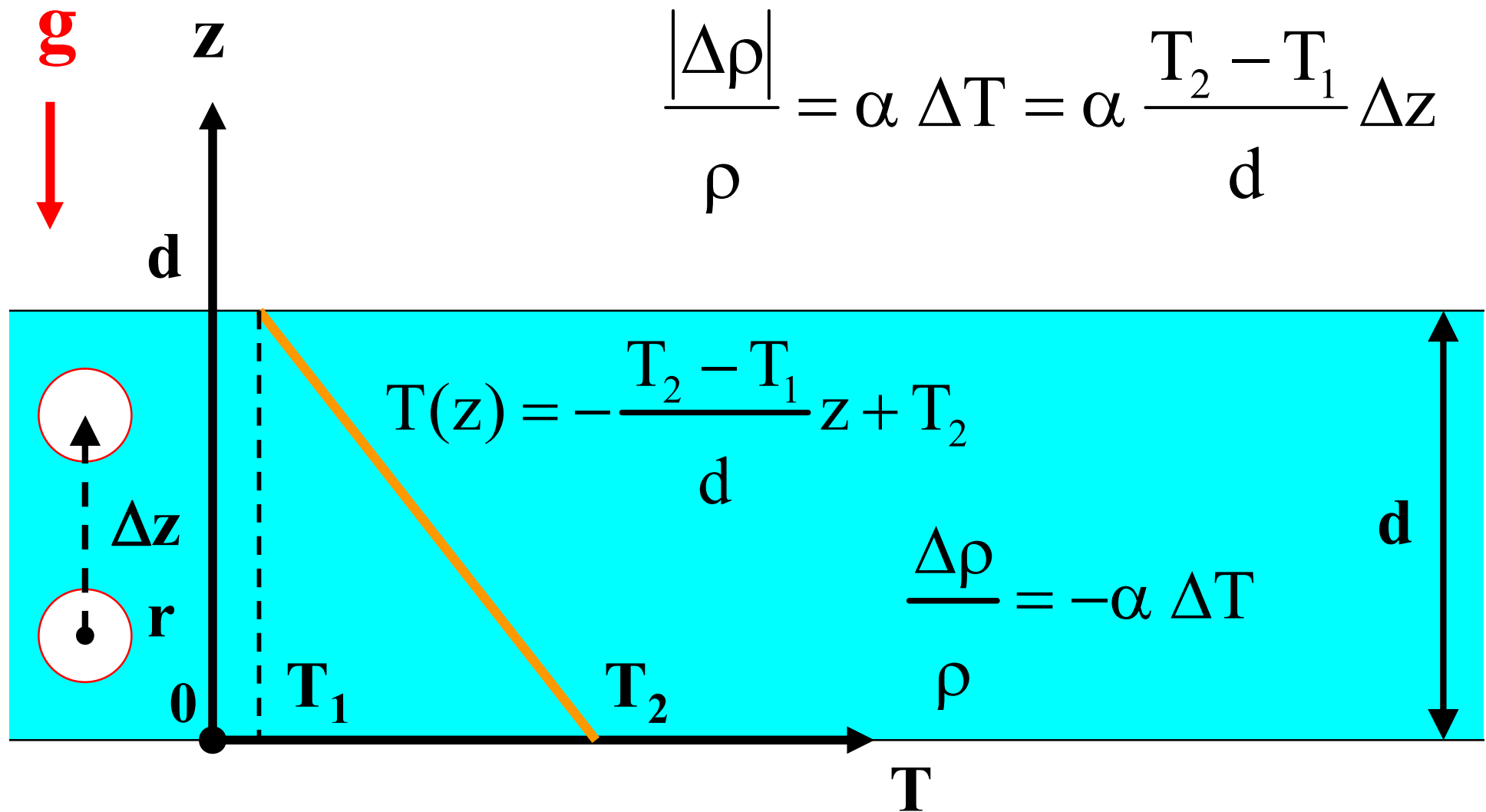
т.е. жидкость или газ подогреваются снизу



Конвективные ячейки Бенара с восходящим потоком в центре







ρ - плотность; ν - вязкость; χ - температуропроводность;

α - коэффициент объемного температурного расширения

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

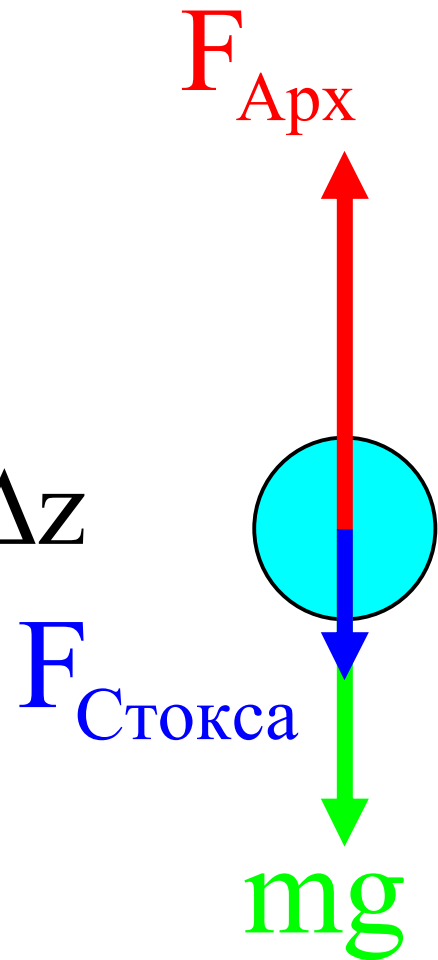
$$F_{\text{Аpx}} - mg = gV \Delta \rho \sim g r^3 \Delta \rho$$

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

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

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

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



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

?

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

Температуро-
проводность

$\chi [\text{м}^2 / \text{с}]$

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

$r \sim d$

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

Число
Рэля

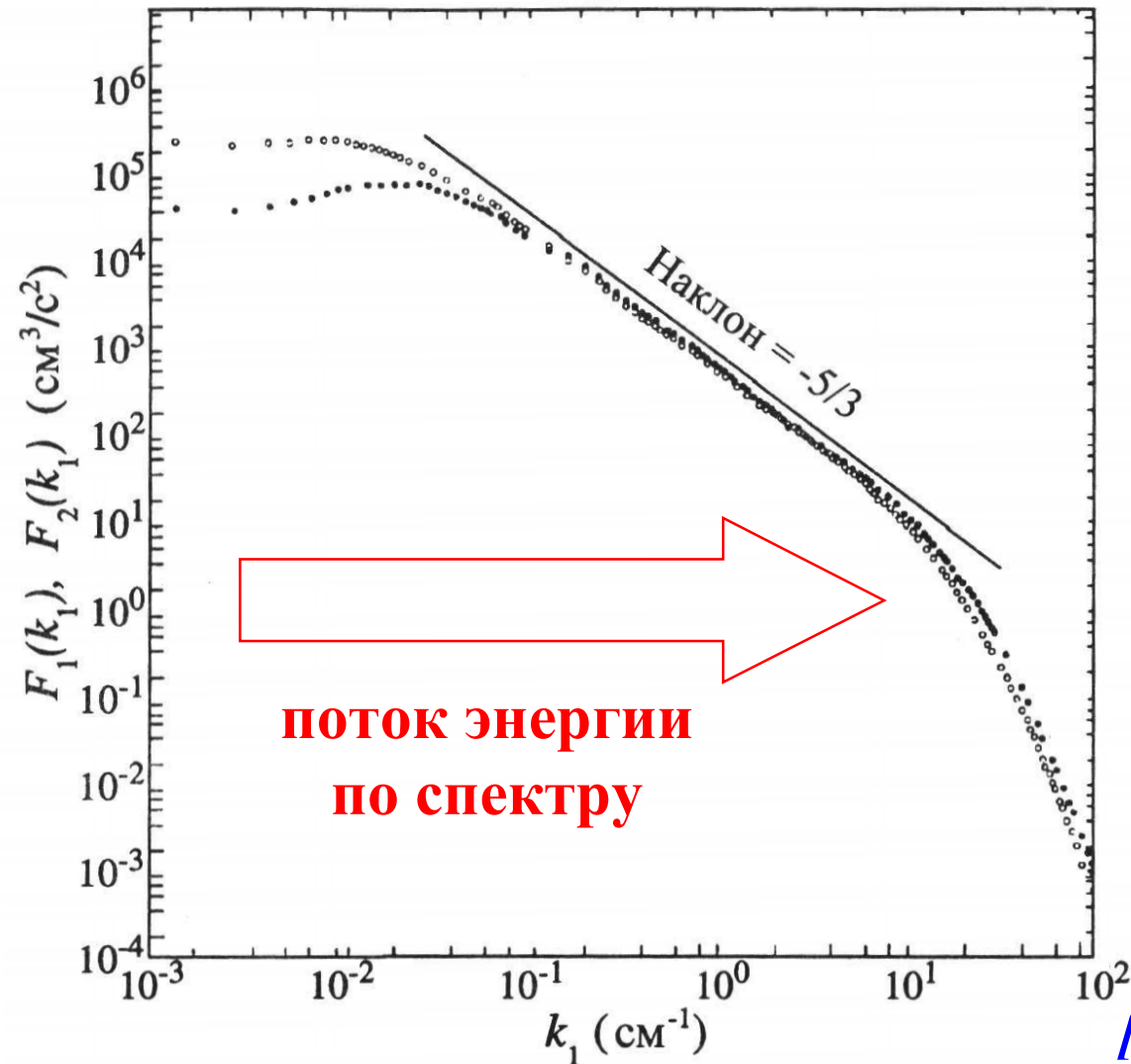
конвекция развивается при $\text{Ra} > \text{Ra}_{\text{кр}} \sim 10^3$

Спектр развитой турбулентности

область
энергии

инерционный
интервал

область
диссипации



[Frisch, 1995]

Математическое описание турбулентности

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

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

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

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

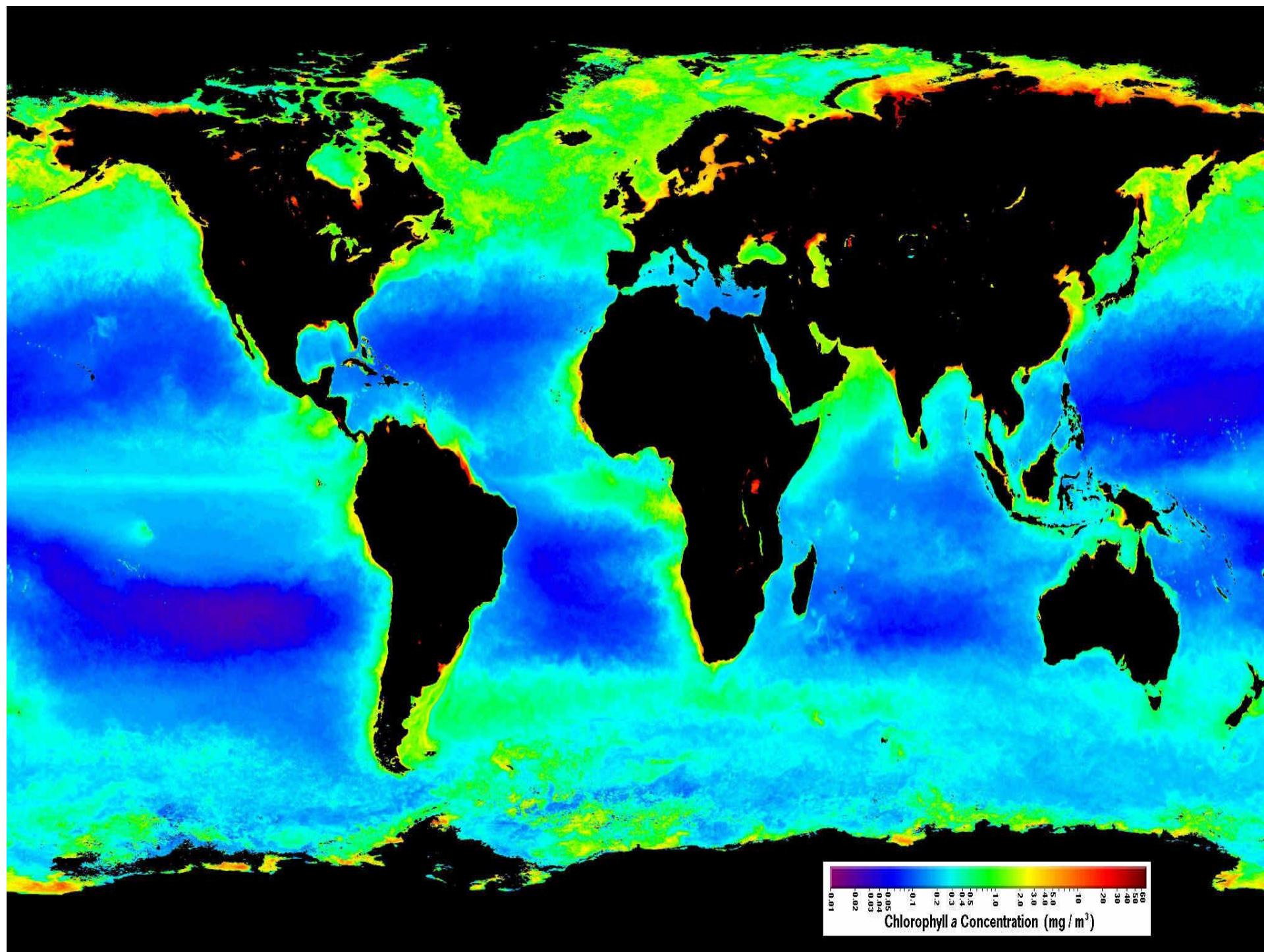
$$\overline{u_i}$$

$$\overline{p}$$

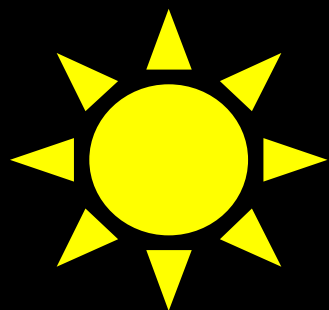
$$\overline{u'_i u'_j}$$

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**



Теплообмен между океаном и атмосферой



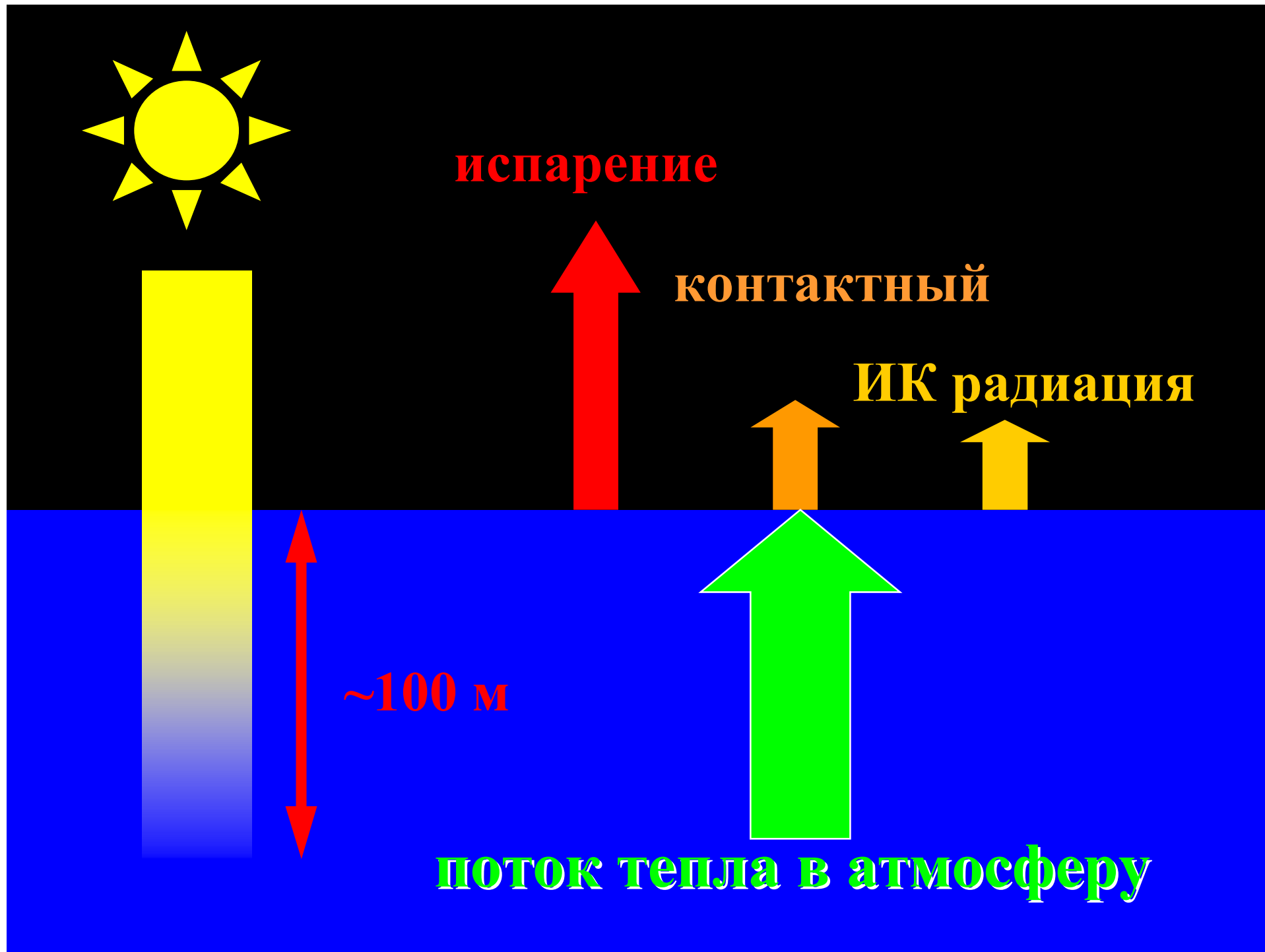
испарение

контактный

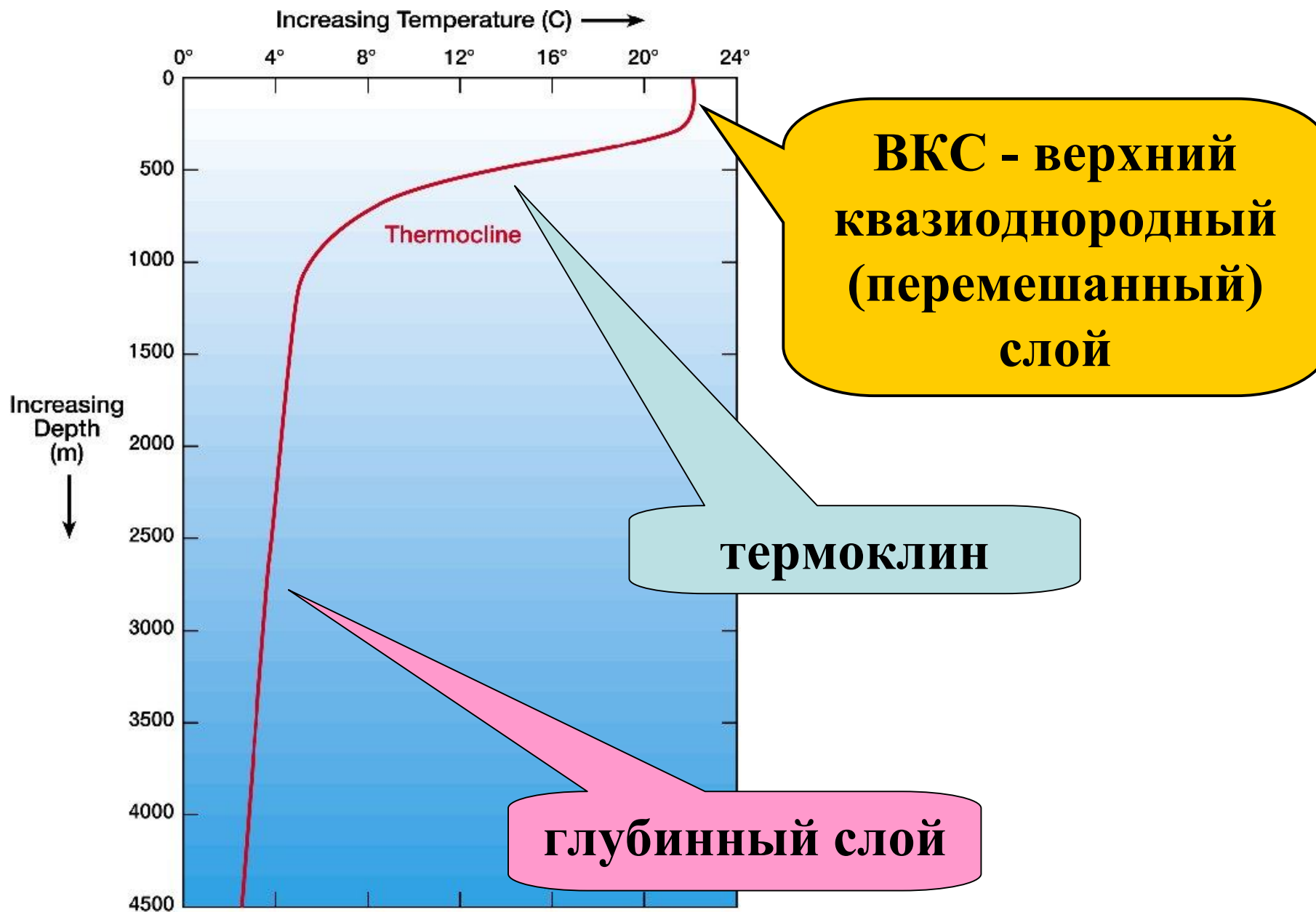
ИК радиация

~100 м

поток тепла в атмосферу



Типичный вертикальный профиль температуры в океане

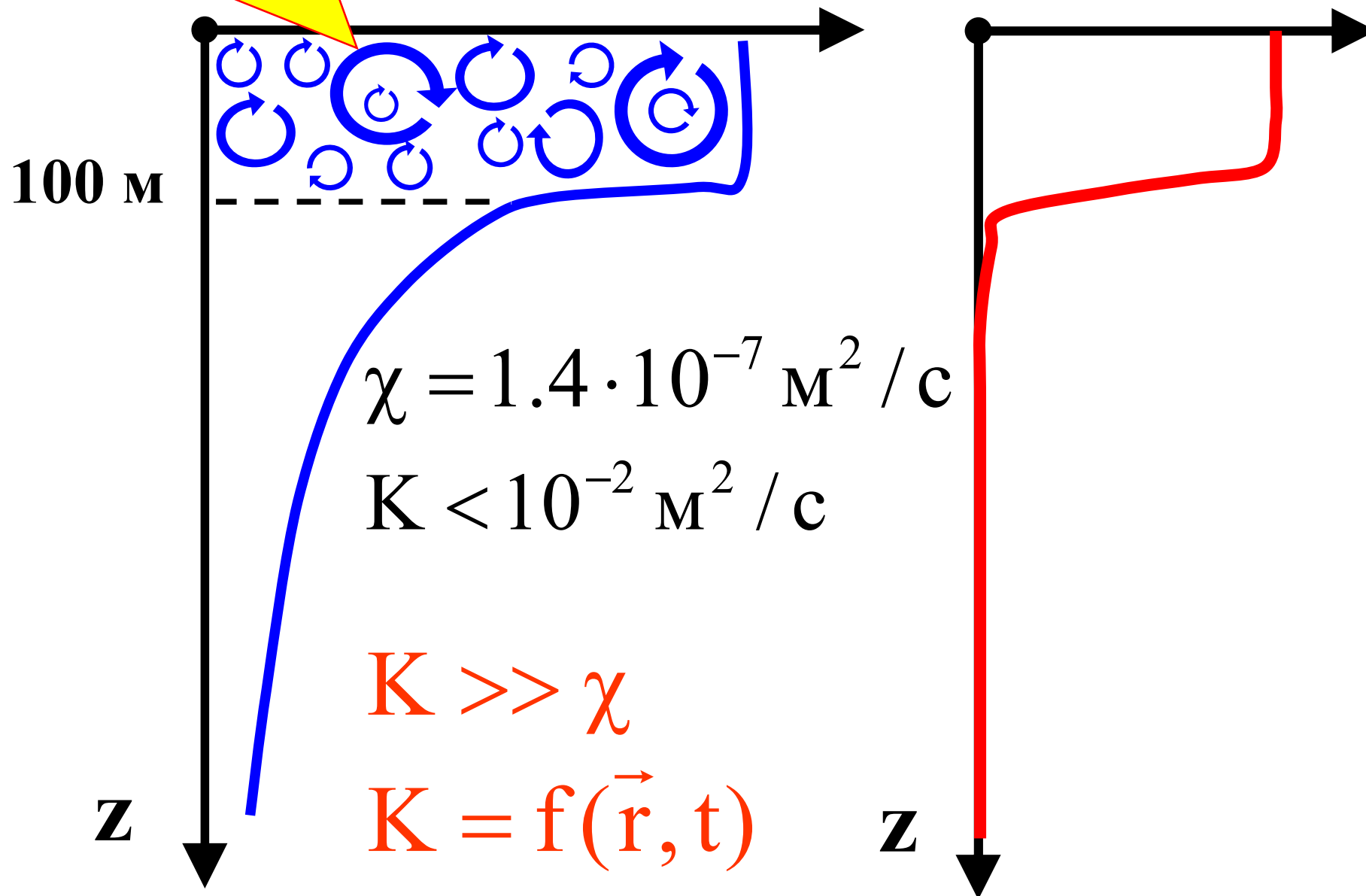


~~$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z)$$~~

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

**Коэффициент турбулентного
обмена теплом**

турбулентные вихри



$$b = \frac{u'^2 + v'^2 + w'^2}{2} \left[\frac{M^2}{c^2} \right] \begin{array}{l} \text{энергия} \\ \text{турбулентности на} \\ \text{единицу массы} \end{array}$$

$$L \quad [M] \quad \begin{array}{l} \text{масштаб} \\ \text{турбулентности} \end{array}$$

$$K \quad \left[\frac{M^2}{c} \right] \quad \begin{array}{l} \text{коэффициент} \\ \text{турбулентного} \\ \text{обмена} \end{array}$$

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

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

Молекулярные коэффициенты

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

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

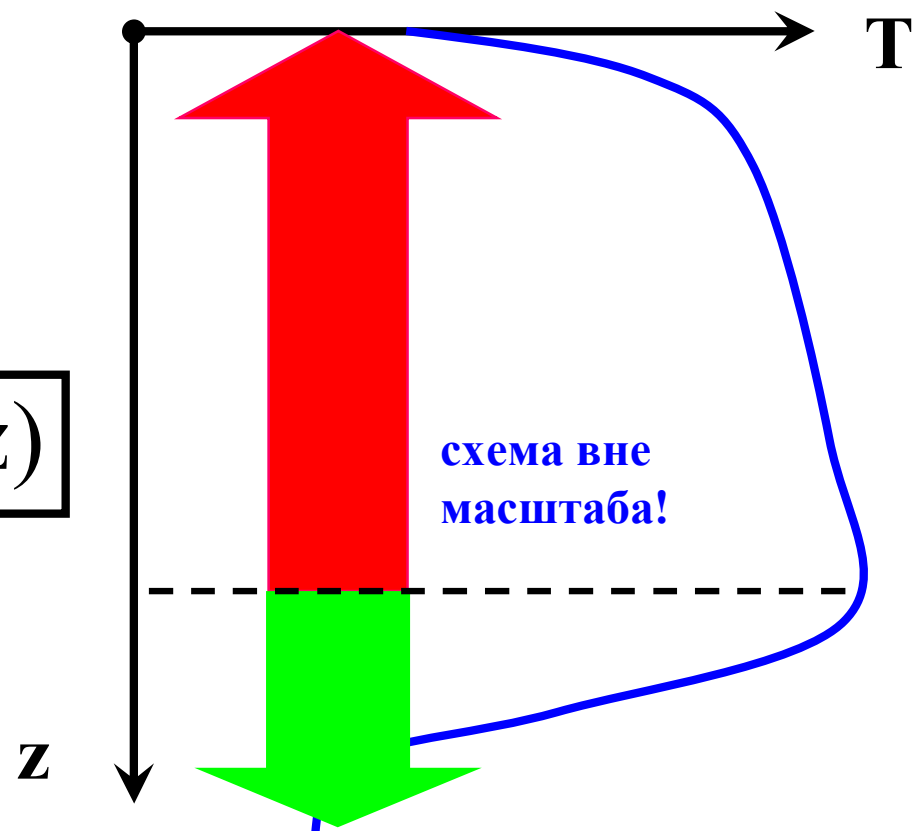
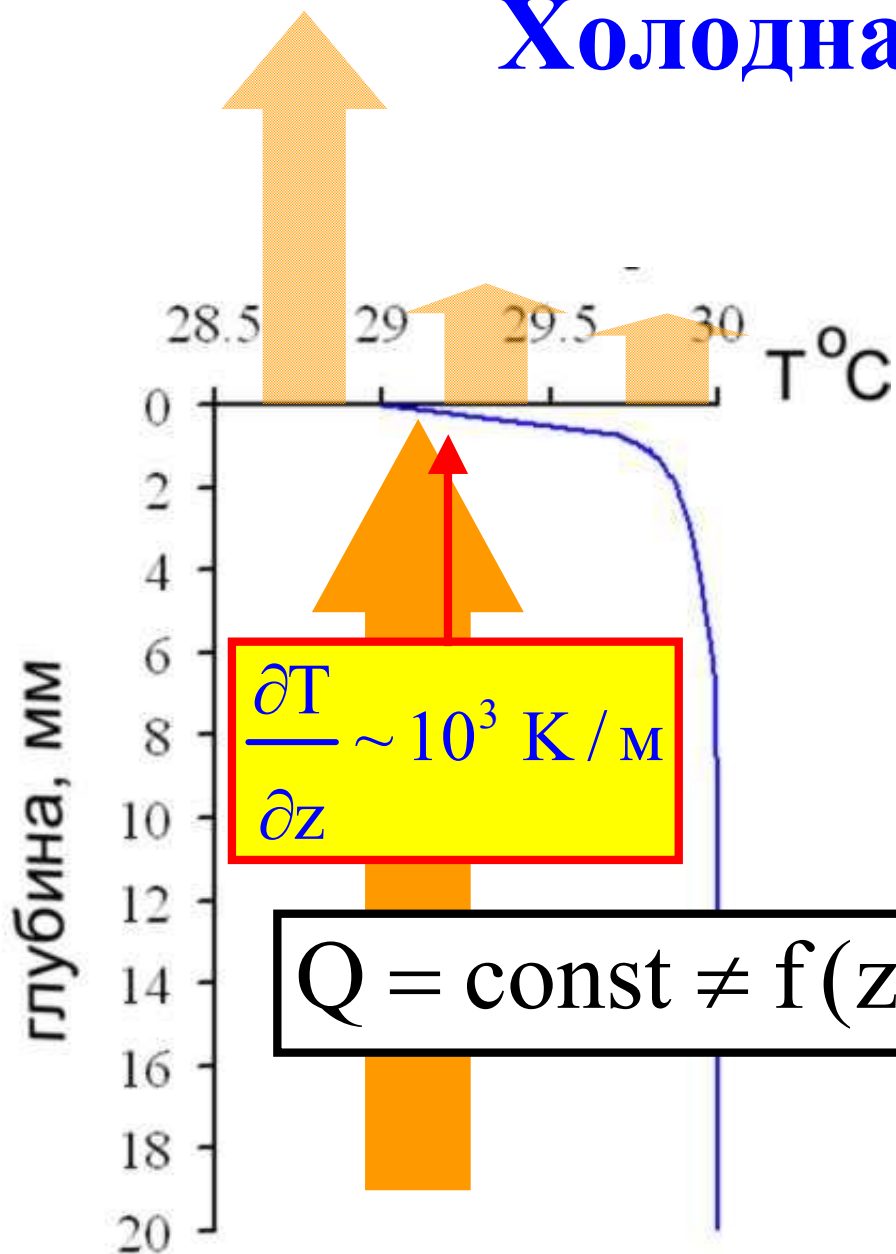
Турбулентные коэффициенты

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

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

Холодная пленка

$$Q \sim -[\chi + K(z)] \frac{\partial T}{\partial z}$$



турбулентные вихри

100 м

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

$$K < 10^{-2} \text{ м}^2 / \text{с}$$

$$K \gg \chi$$

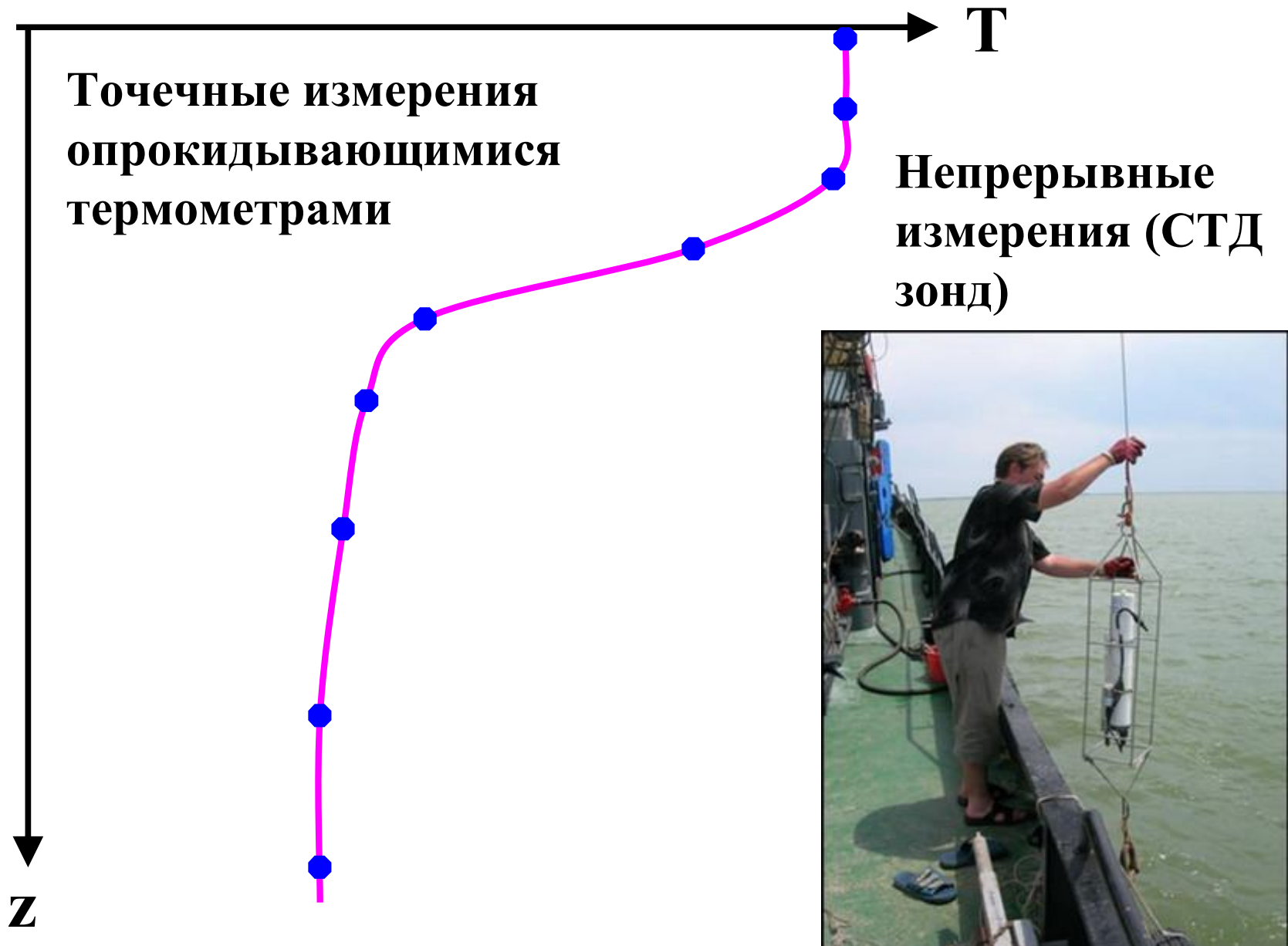
$$K = f(\vec{r}, t)$$

0

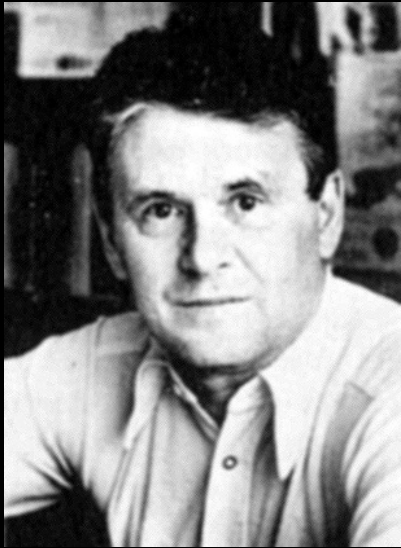
K

K → 0 при
приближении к
поверхностям

Методика измерения вертикального профиля температуры



Тонкая термохалинная структура

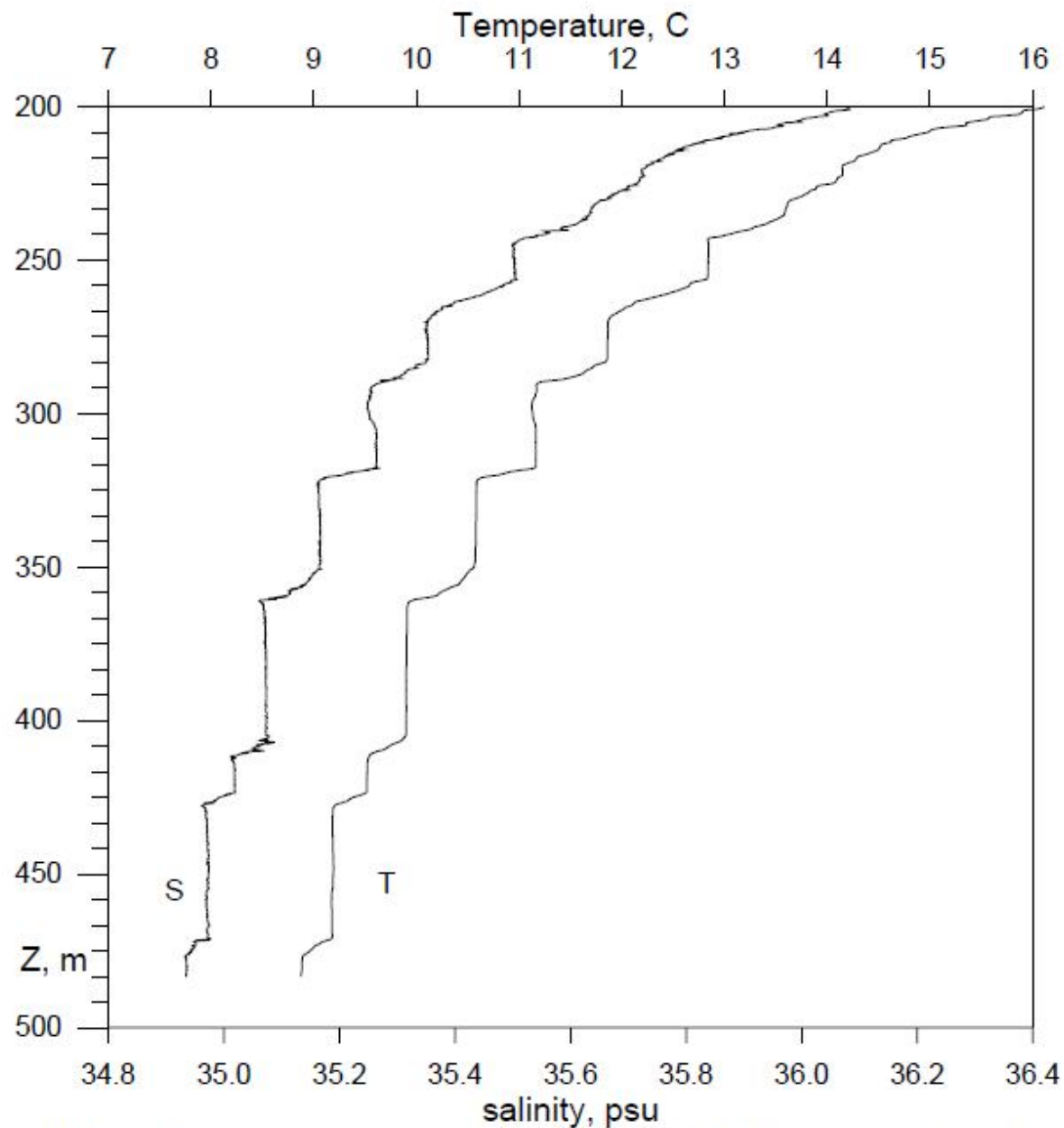


**Константин Николаевич
Федоров
1927-1988**
российский океанолог, член
корр. АН СССР

**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



[Zhurbas]

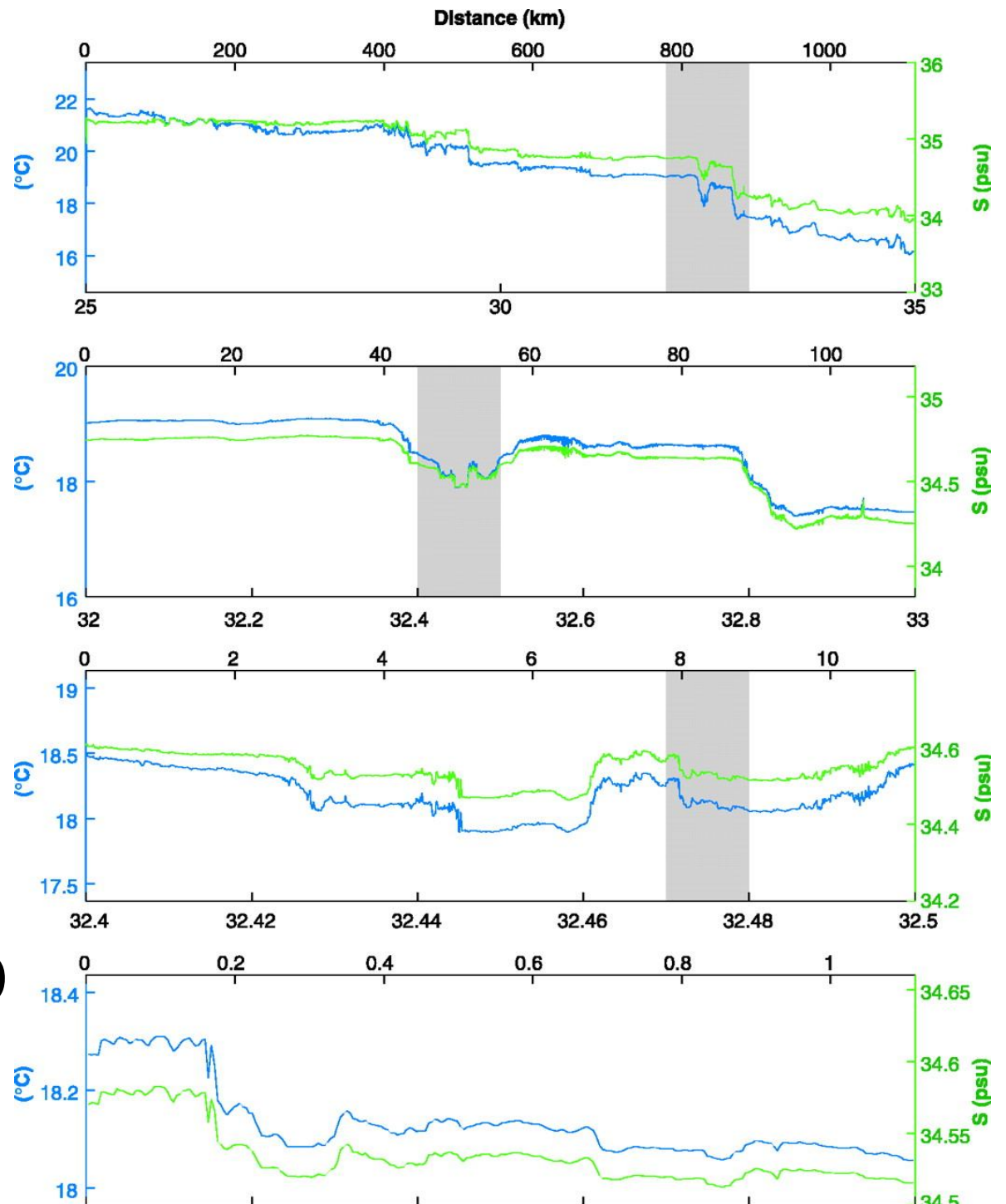
Step-like finestructure in the Northwest Tropical Atlantic

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]



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

