



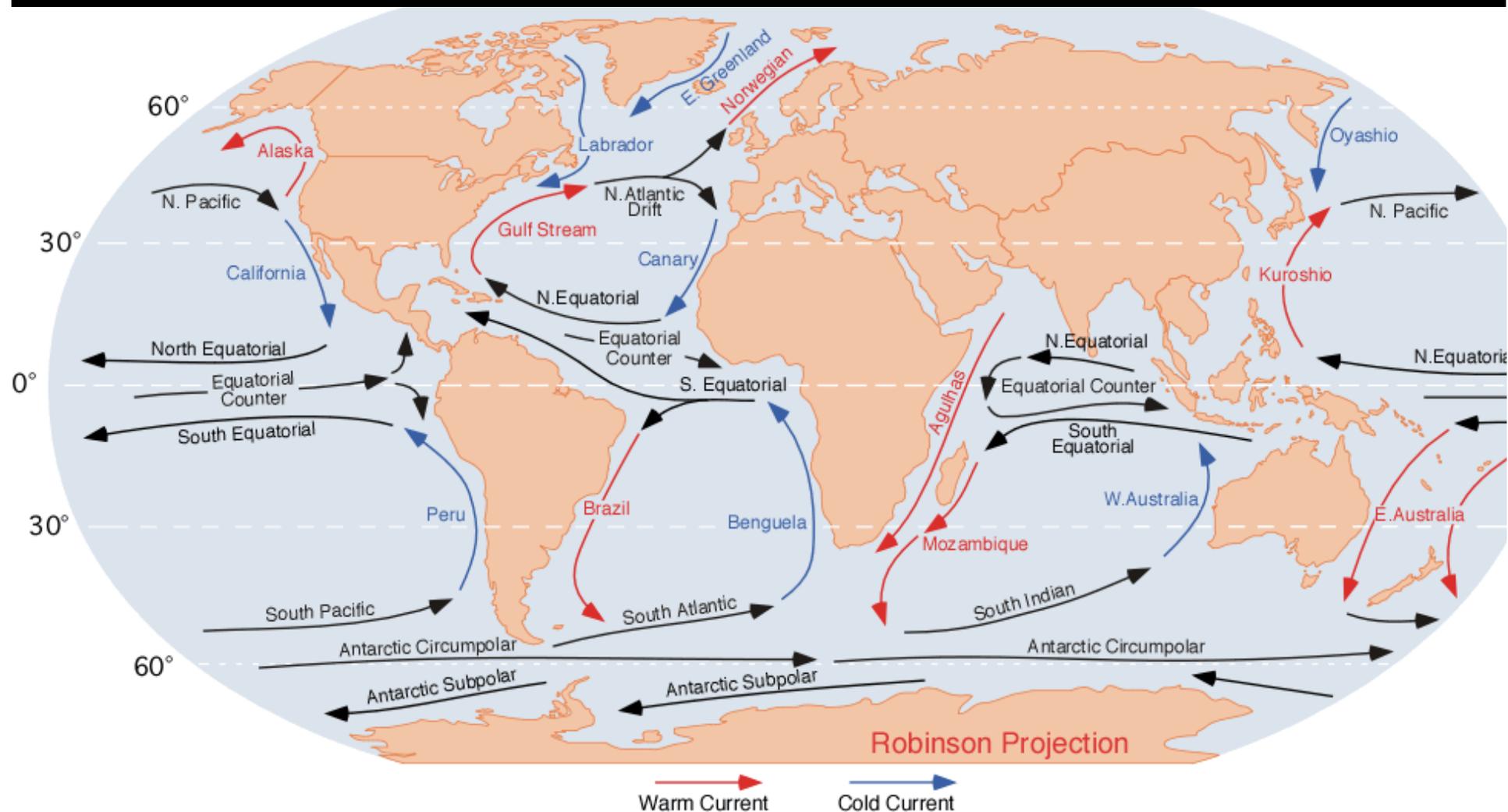
Океаническая турбулентность

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

Важность изучения турбулентности
для динамики океана (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**

Течения на поверхности Мирового океана

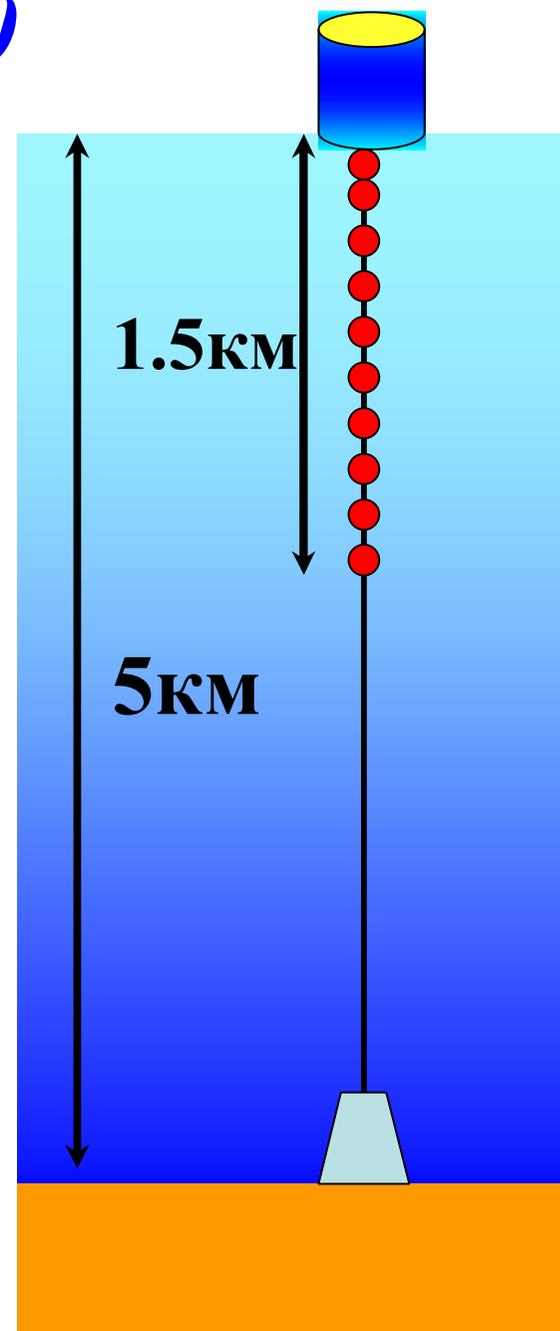
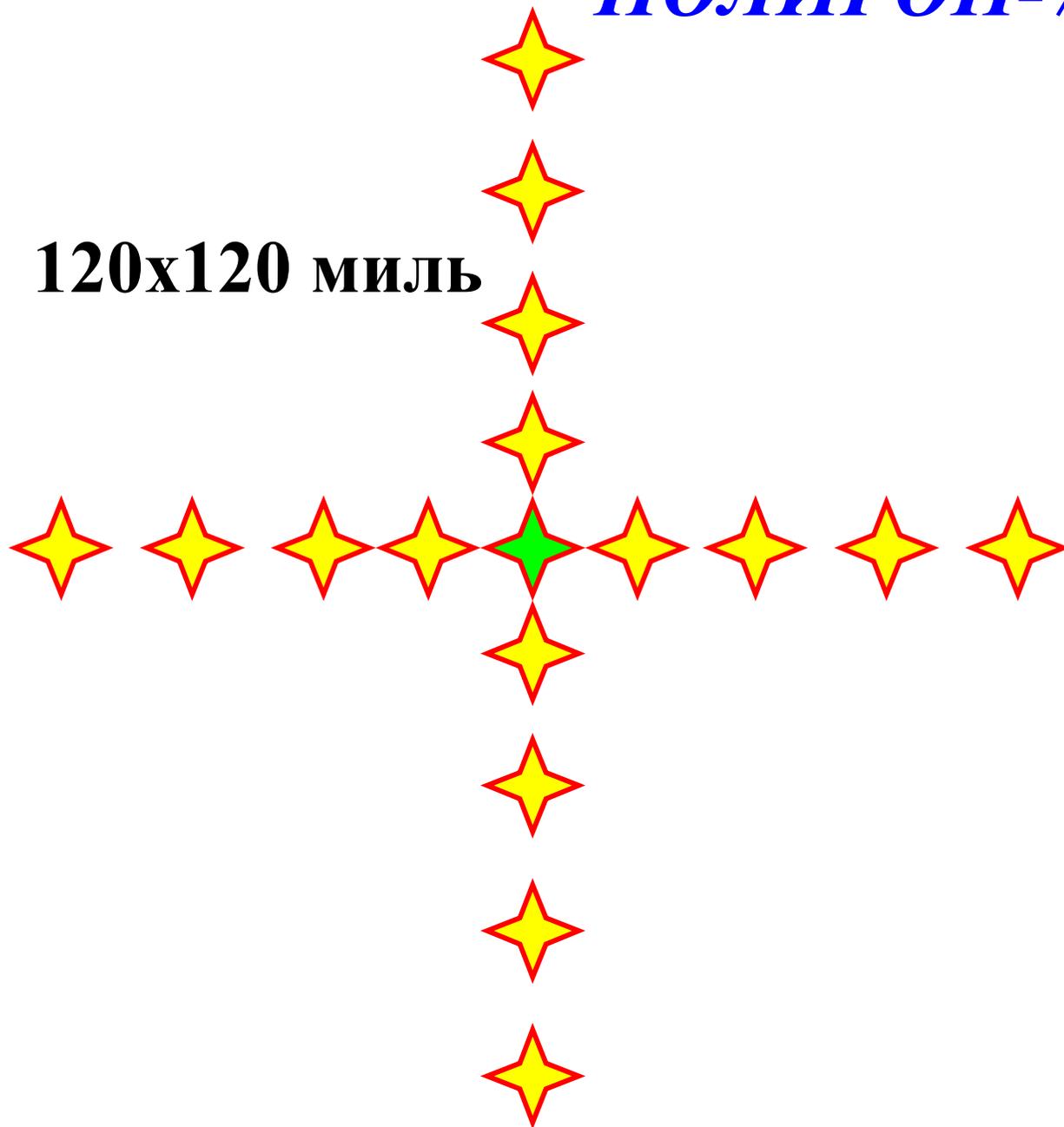


Синоптические вихри в океане

- ❑ Впервые обнаружены в 1970 г. в районе Северного пассатного течения в Атлантическом океане (эксперимент Полигон-70, НИС «Академик Курчатов», «Дмитрий Менделеев», «Андрей Вилькицкий»)

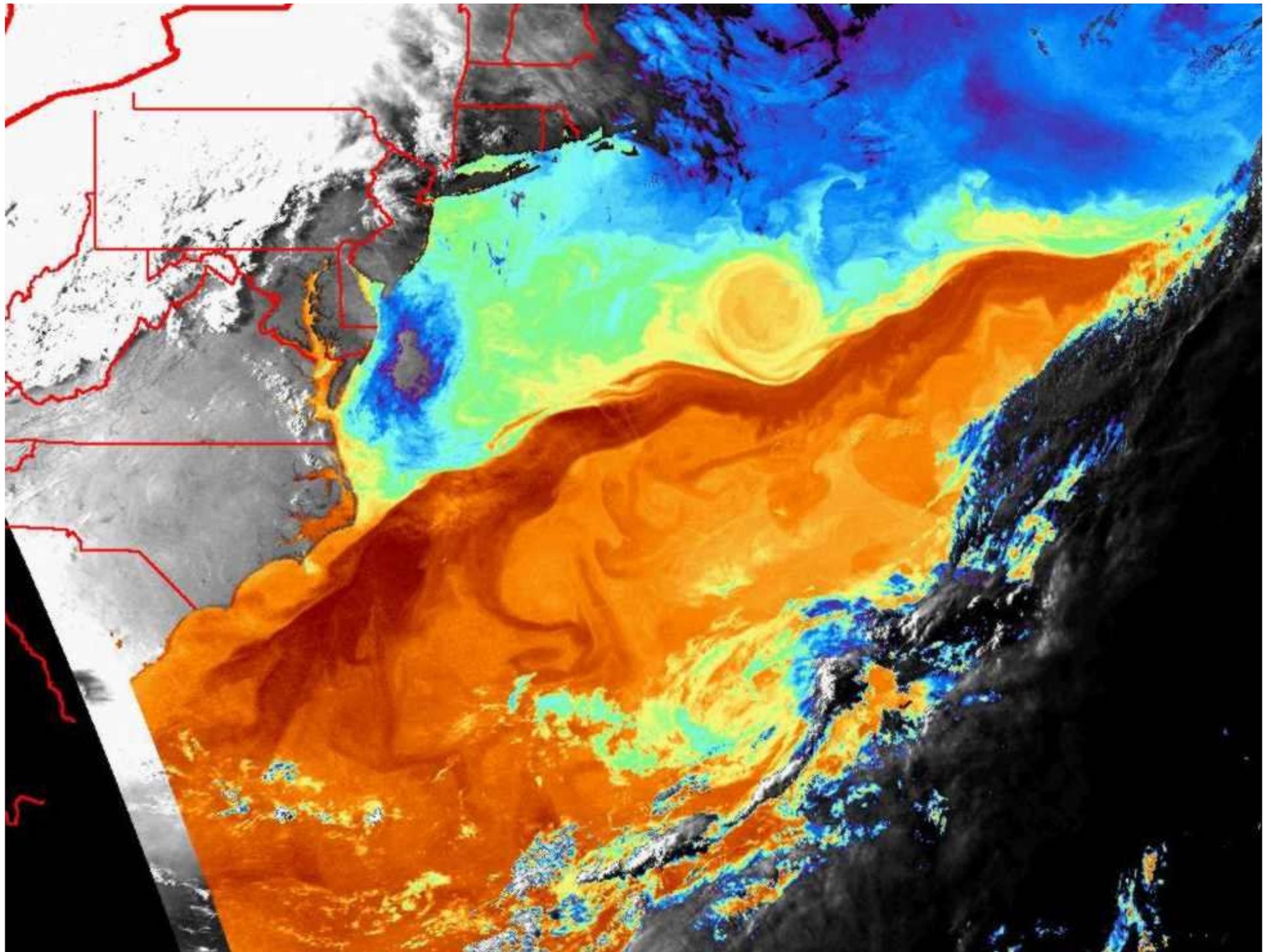
ПОЛИГОН-70

120x120 миль

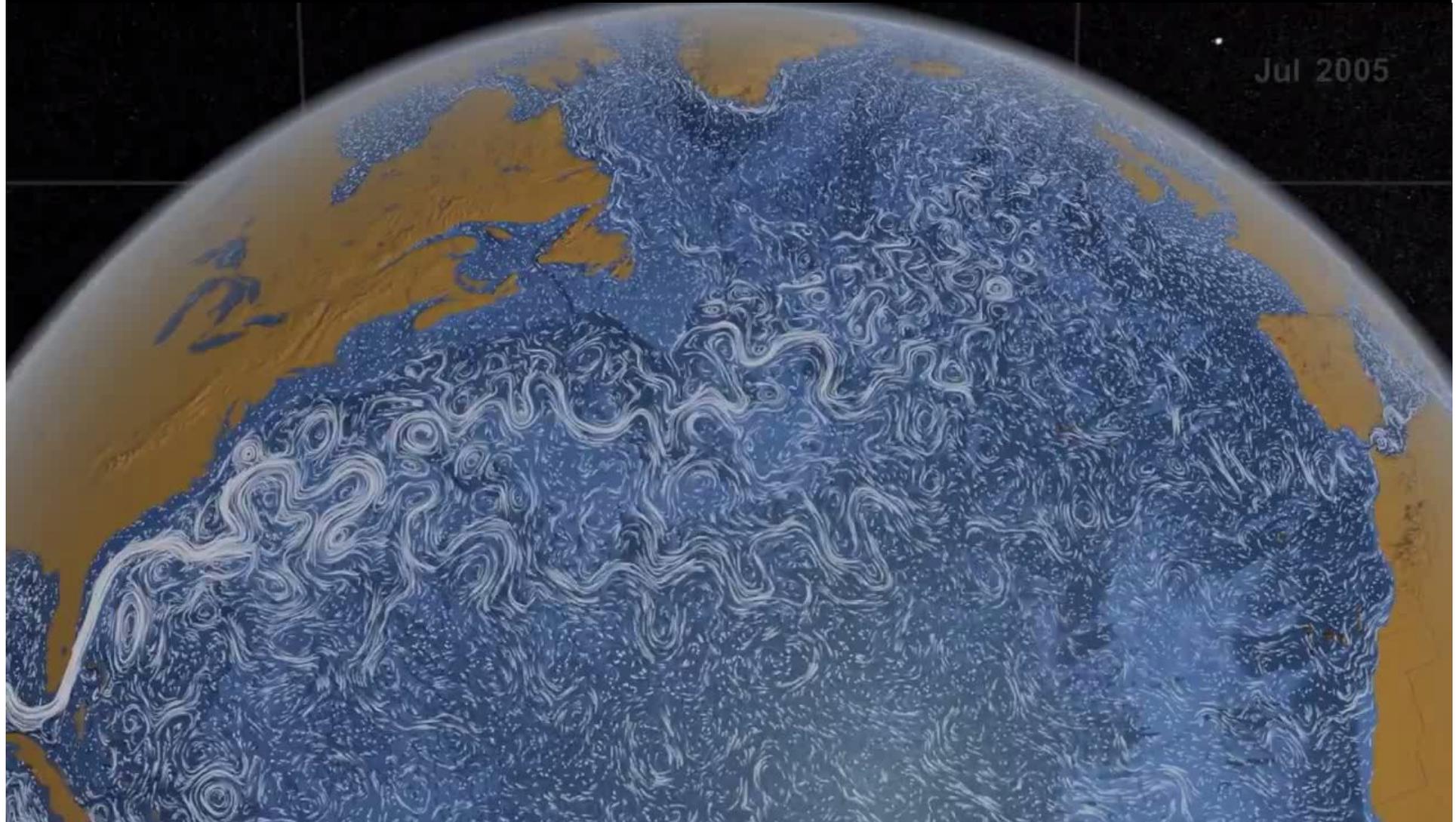


Синоптические вихри

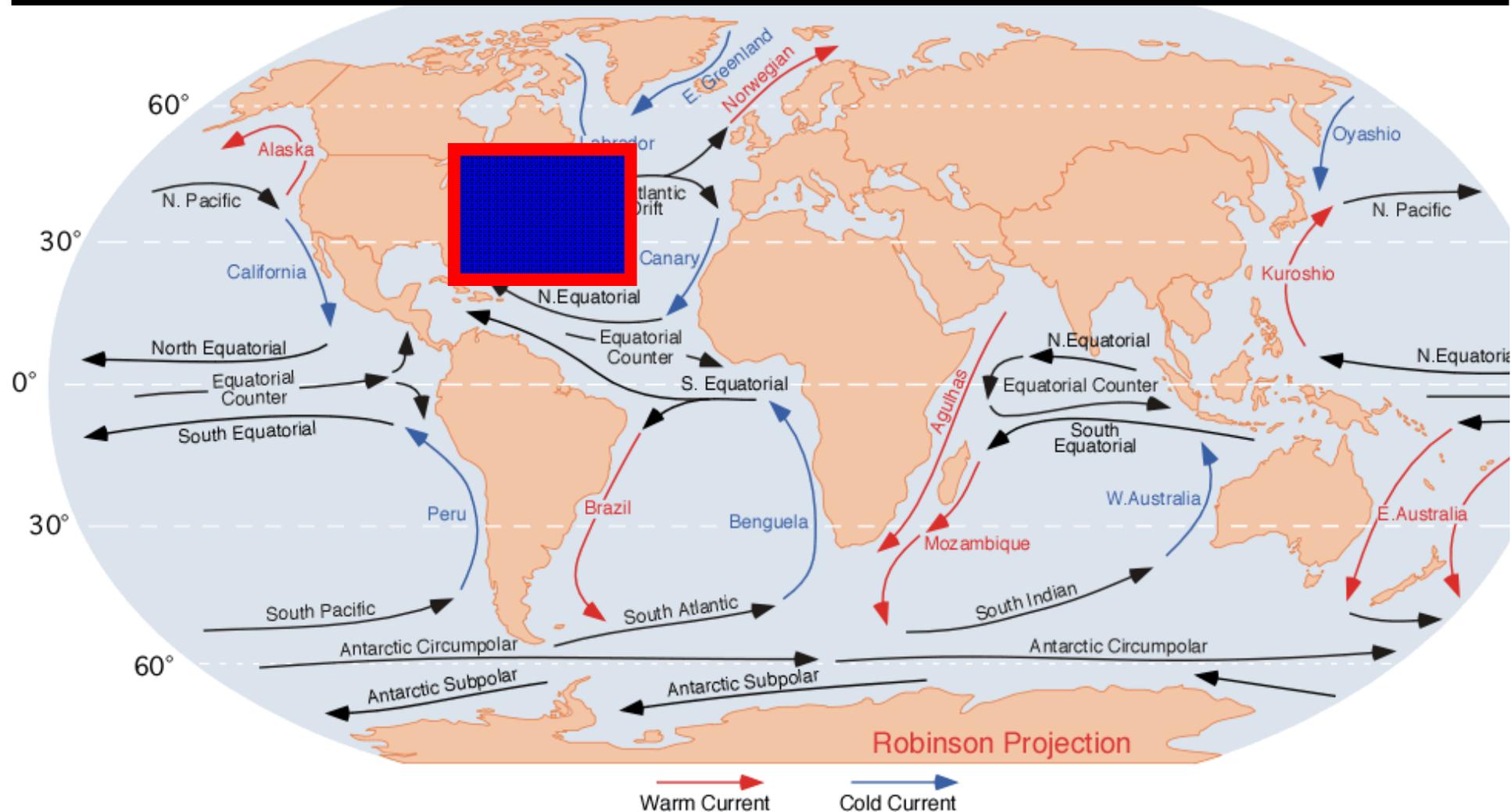
- ❑ Впервые обнаружены в 1970 г. в районе Северного пассатного течения в Атлантическом океане (эксперимент Полигон-70, НИС «Академик Курчатов», «Дмитрий Менделеев», «Андрей Вилькицкий»)
- ❑ Диаметр 100-150 км, скорость 10-20 см/с, скорость перемещения центра 5 см/с
- ❑ В 1973 г. существование синоптических вихрей подтверждено американскими океанологами (MODE – Mid Ocean Dynamical Experiment)
- ❑ 1977-1978 эксперимент ПОЛИМОДЕ
 - Обнаружено 20 крупных (200-300 км) и несколько десятков мелких вихрей
 - Установлено, вихрям принадлежит не менее 90% кинетической энергии океана
 - Причина образования – неустойчивость течений



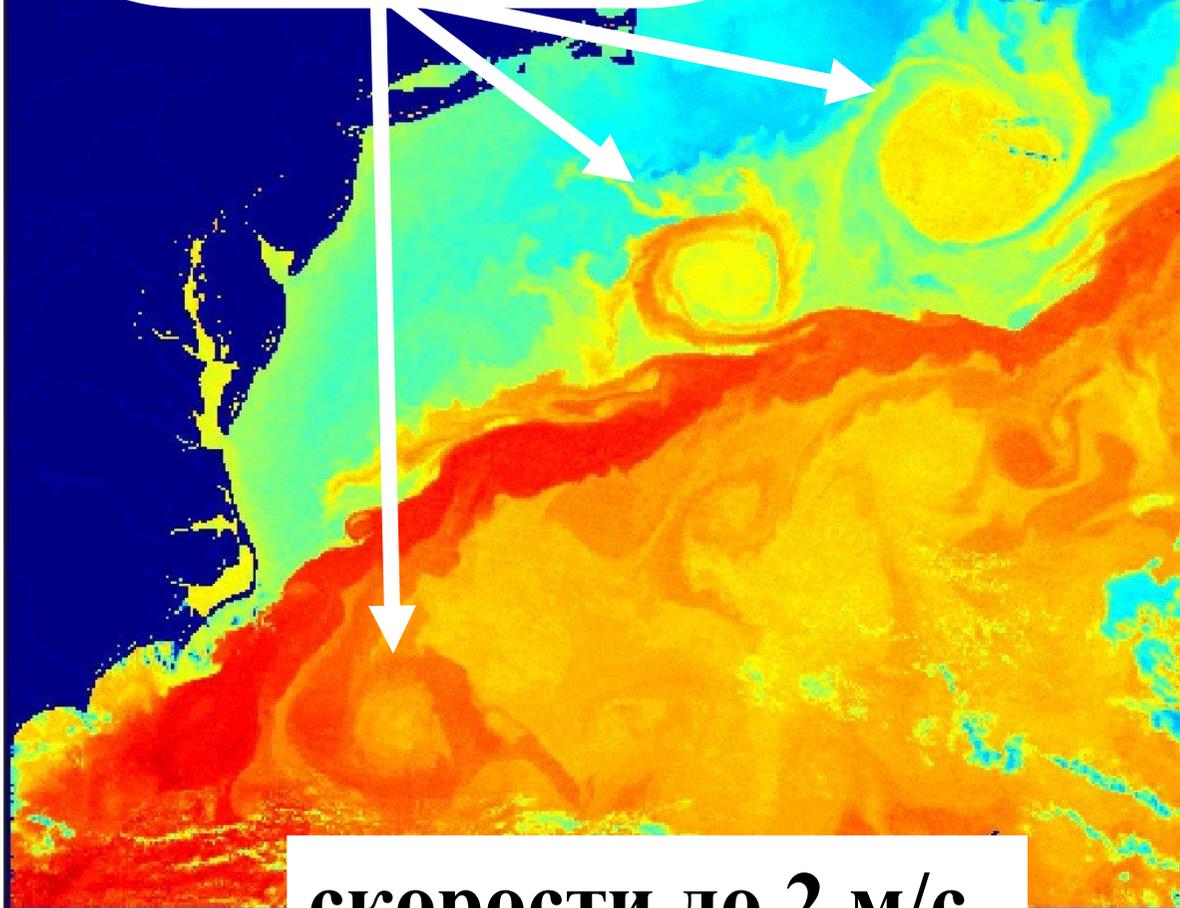
<https://www.youtube.com/watch?v=CCmTY0PKGDs>



Течения на поверхности Мирового океана



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

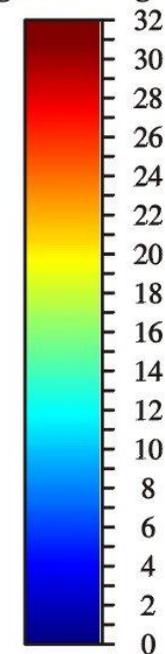
Lon Range: 79.08W to 58.81W

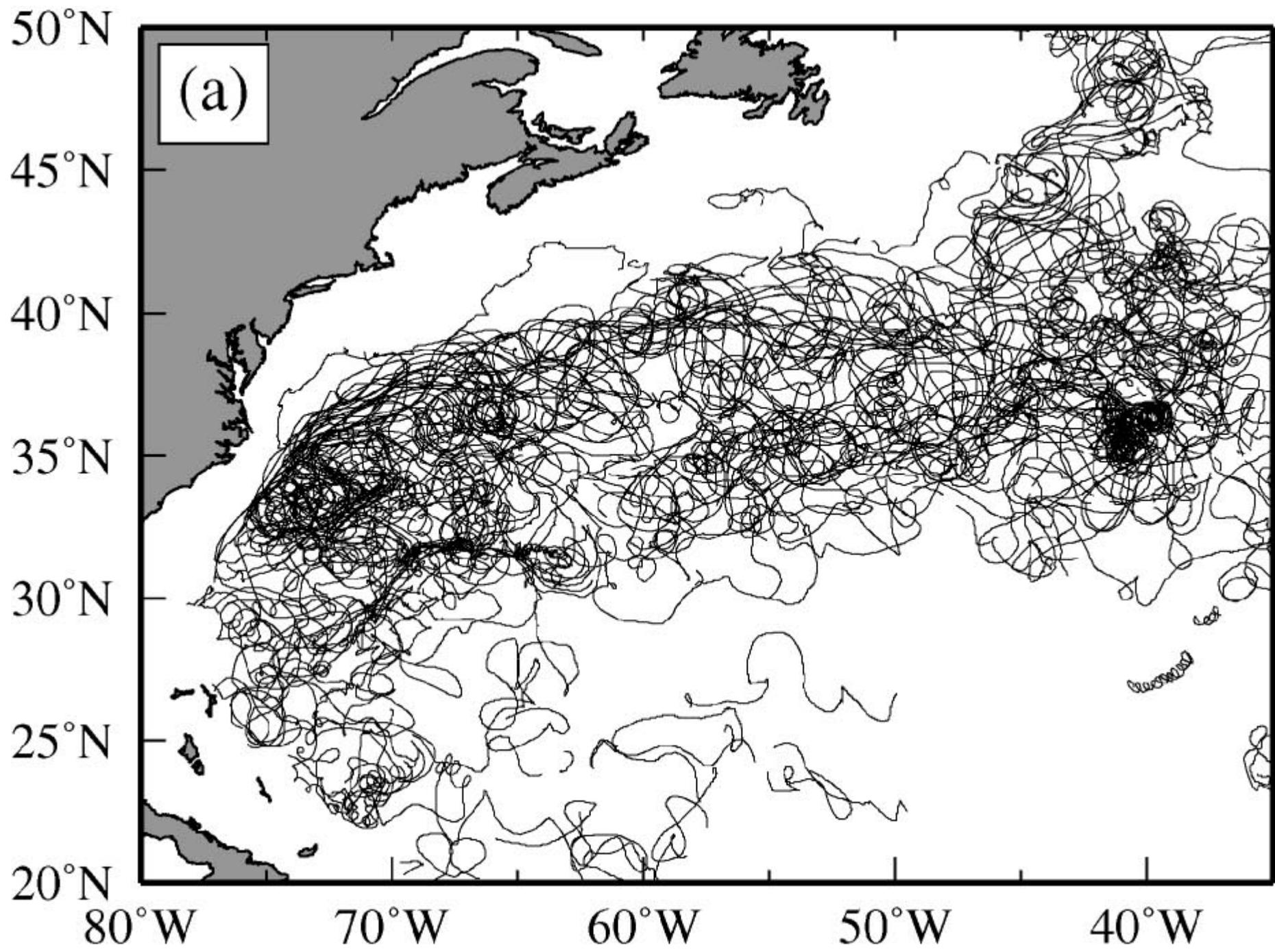
Horiz. Offset: -1994 2

Vert. Offset: 4681 0

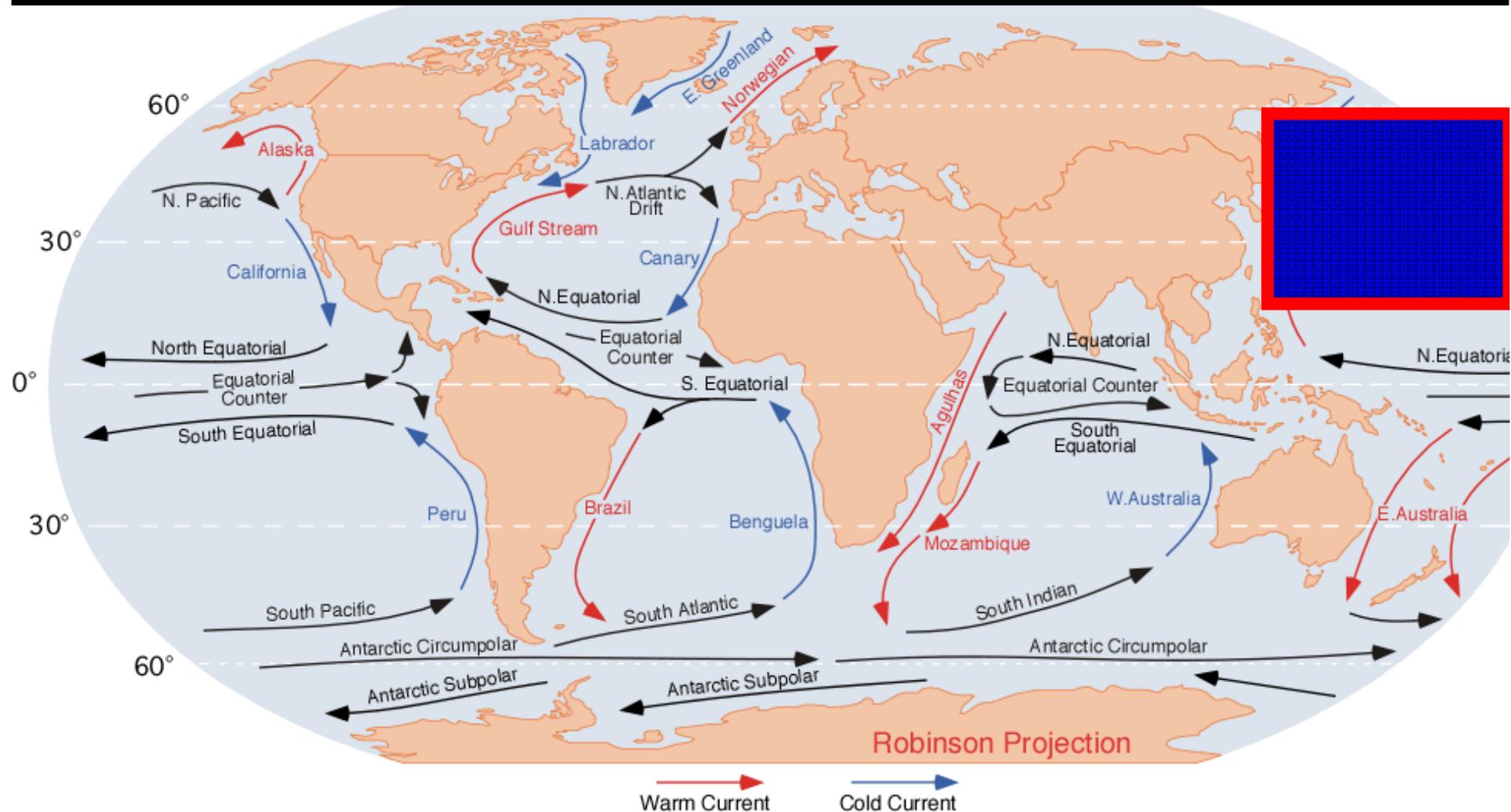
SST - Split Window

Surface Temperature (Degrees Centigrade)

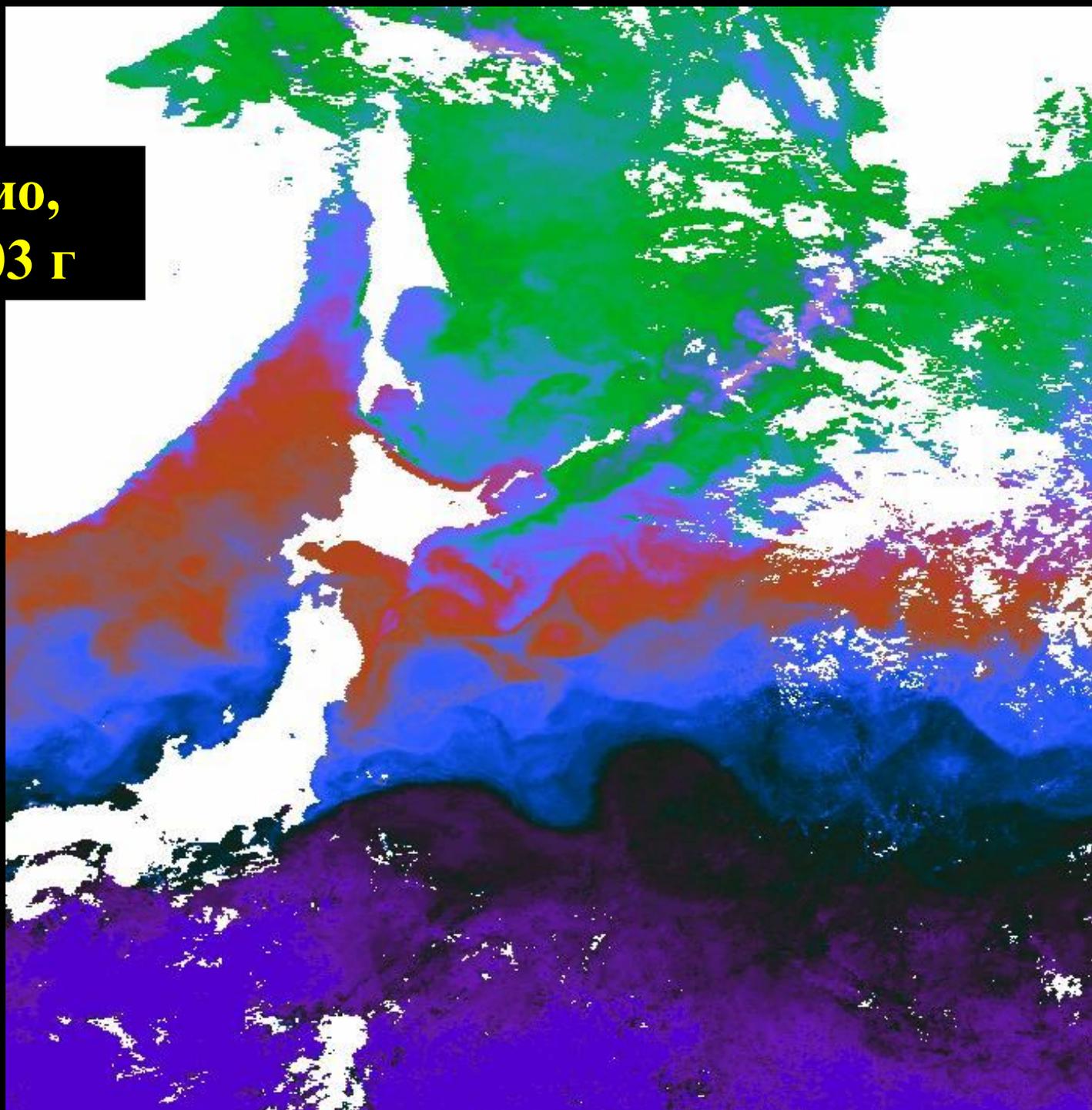




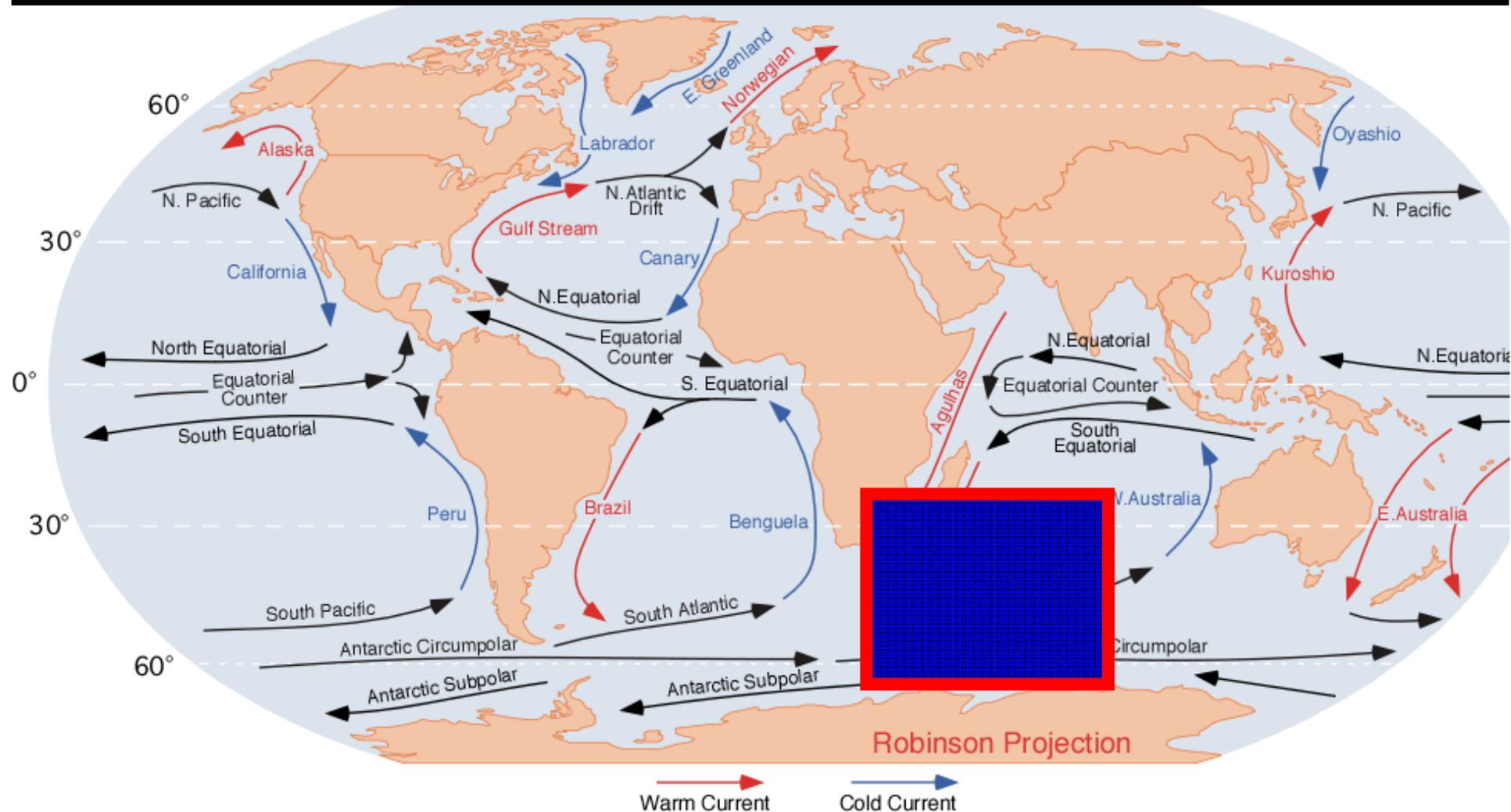
Течения на поверхности Мирового океана



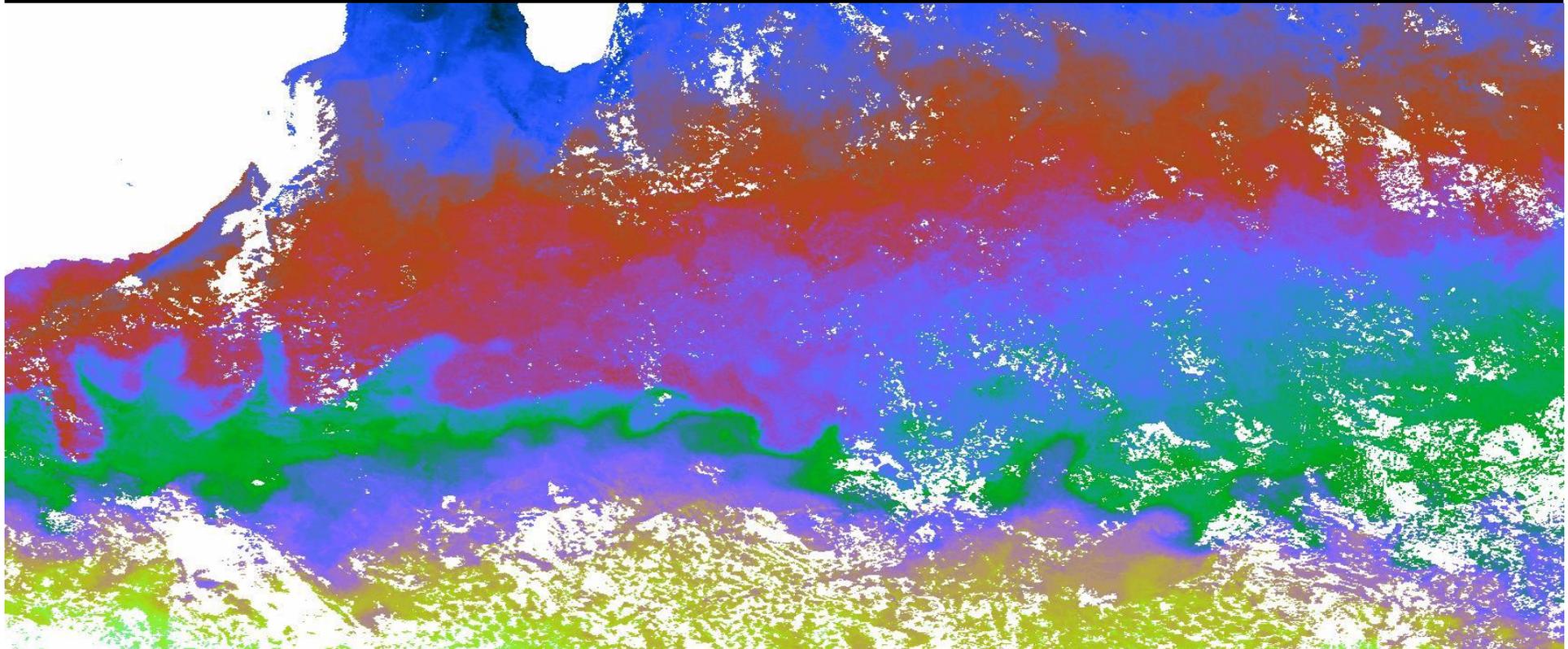
**ТПО, Курошио,
сентябрь 2003 г**



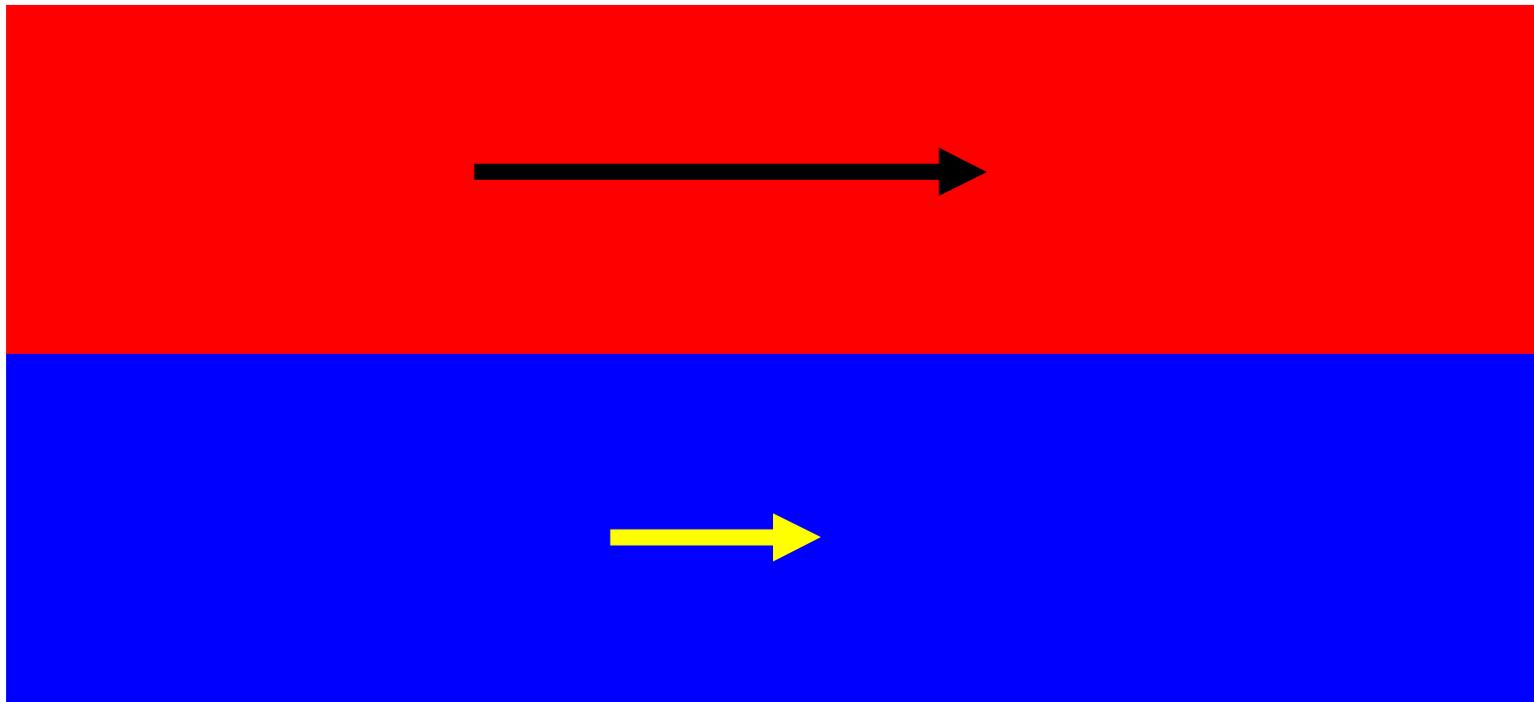
Течения на поверхности Мирового океана



ТПО, Циркумполярное течение, сентябрь 2003 г



Сдвиговая неустойчивость (Кельвина-Гельмгольца)







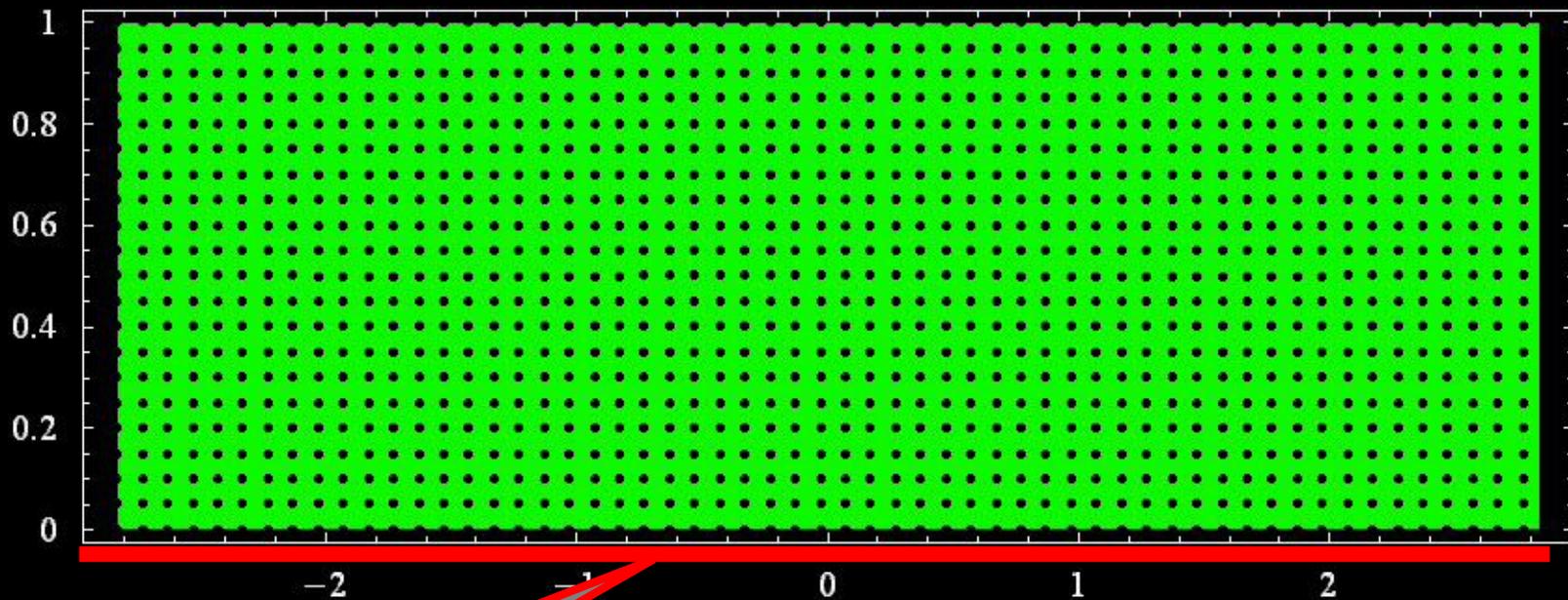


Конвективная неустойчивость

T_1

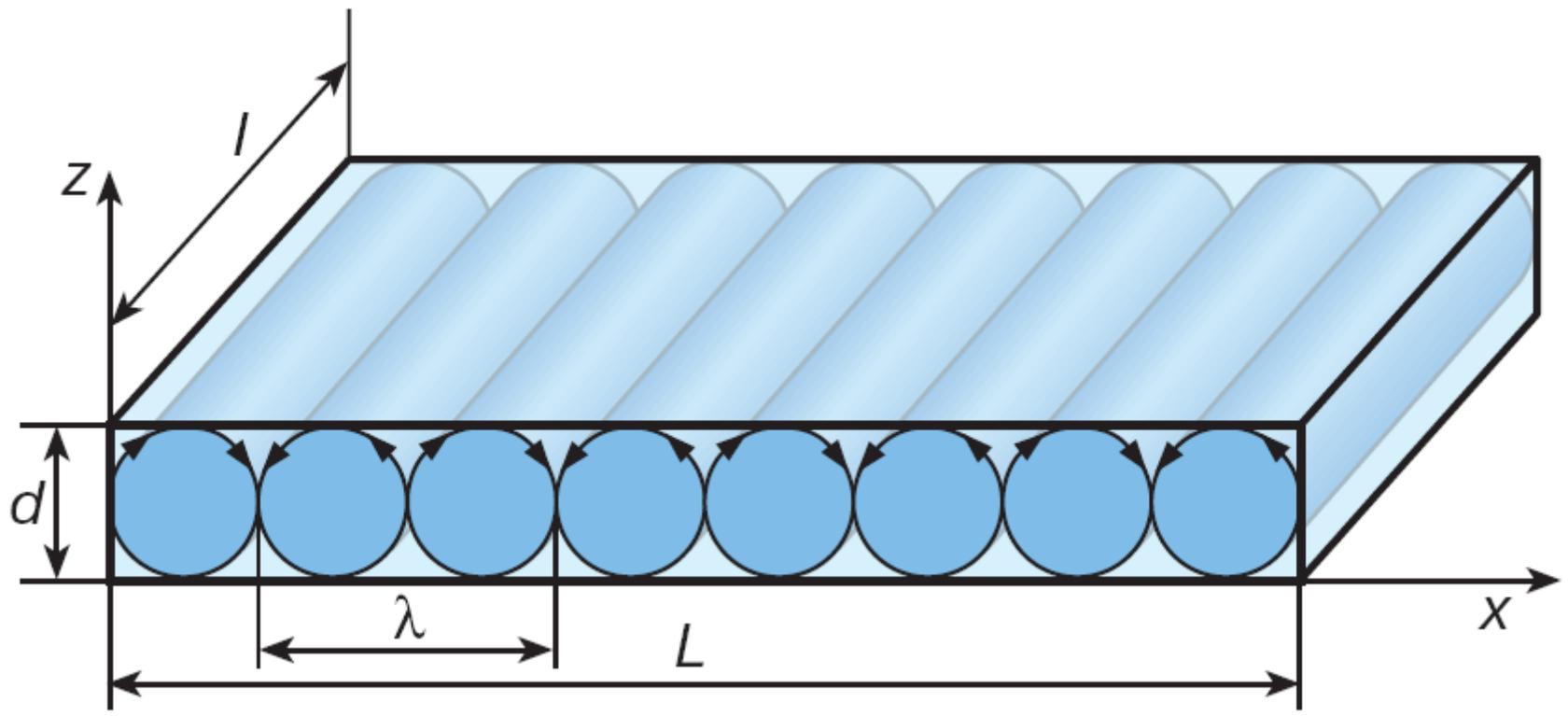
(Рэля-Бенара)

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

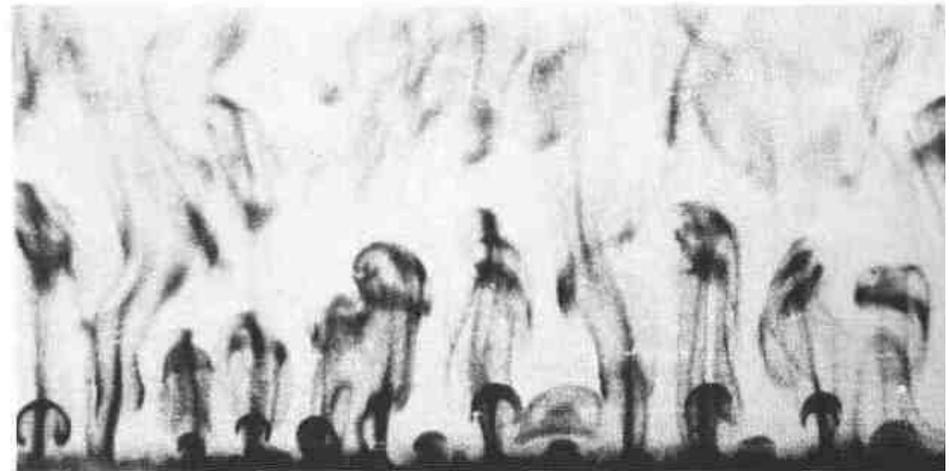
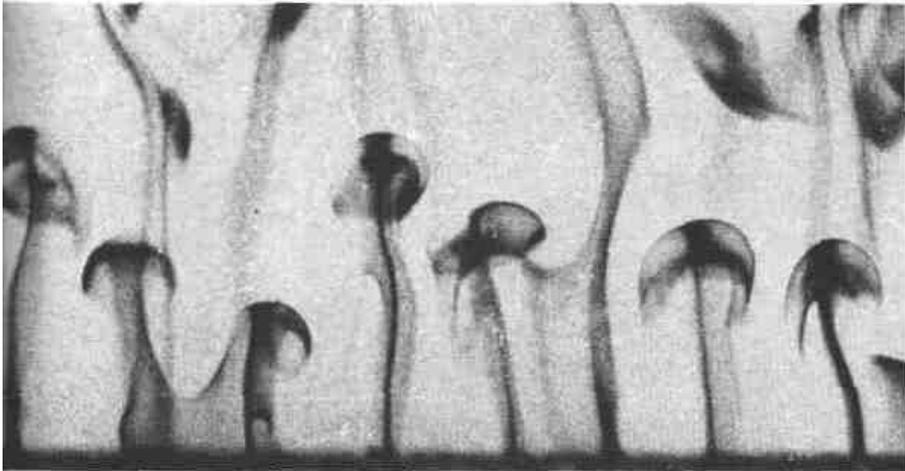


T_2

$T_2 > T_1$



Конвективная неустойчивость (Рэля-Бенара)



Механизмы генерации океанской турбулентности

1. Неустойчивость вертикальных градиентов скорости в дрейфовых течениях. Дрейфовые течения образуются под действием напряжения трения ветра на поверхность океана и охватывают верхний перемешанный слой (ВПС), который характеризуется нейтральной стратификацией.

Неустойчивость дрейфового течения определяется критерием Рейнольдса. В качестве масштаба длины L следует рассматривать вертикальный внешний масштаб турбулентности – толщину ВПС. В качестве масштаба скорости – перепад скорости течения поперек ВПС, который фактически совпадает со скоростью течения на поверхности U .

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \sim 10^8 \gg Re_c \sim 10^3$$

$1 \text{ м/с} \quad 100 \text{ м}$
 $10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$

Механизмы генерации океанской турбулентности

2. Обрушение поверхностных волн (преобладающее влияние) и гидродинамическая неустойчивость течений индуцируемых поверхностными волнами. Этот механизм генерации турбулентности распространен очень широко, он является основным в ВПС.



Механизмы генерации океанской турбулентности

3. Неустойчивость вертикальных градиентов скорости в стратифицированных крупномасштабных океанских течениях. Критерий – число Ричардсона

$$Ri = N^2 / \left(\frac{du}{dz} \right)^2 < 1/4$$

$$N^2 = - \frac{g}{\rho} \frac{d\rho}{dz} \quad \text{- квадрат частоты Вайсяля-Брента}$$

Механизмы генерации океанской турбулентности

4. Неустойчивость квазигоризонтальных мезомасштабных нестационарных течений, вызываемых приливными и инерционными колебаниями (десятки км)

5. Неустойчивость локальных градиентов скорости во внутренних волнах и опрокидывание внутренних волн (например, в течениях с вертикальным сдвигом скорости в результате конвективного сноса вершин). Внутренние волны теряют устойчивость обычно в области гребней и подошв, образуя пятна турбулентности.

Механизмы генерации океанской турбулентности

6. Конвекция в слоях с неустойчивой стратификацией плотности, создаваемая охлаждением поверхности океана в холодные сезоны, накоплением соли в поверхностных слоях при интенсивном испарении, донным прогревом в областях с большим геотермическим потоком, боковыми интрузиями слоев вод пониженной плотности

7. Неустойчивость вертикальных градиентов скорости течений в донном пограничном слое.

С точки зрения генерации турбулентности океан разделяется на три слоя:

масштаб Колмогорова $\lambda_0 = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$

1. Верхний перемешанный слой (ВПС), где главный вклад вносят опрокидывающиеся поверхностные волны

$$\varepsilon \sim 10^{-5} - 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}^3$$

$$\lambda_{0\text{ВПС}} \approx 6 \cdot 10^{-4} \text{ м}$$

2. Толща океана, где основной вклад – неустойчивость внутренних волн

$$\varepsilon \sim 10^{-9} \text{ м}^2 / \text{с}^3$$

$$\lambda_{0\text{Толща}} \approx 6 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

3. Донный перемешанный слой (ДПС), где главный вклад – неустойчивость экмановских течений

$$\varepsilon \sim 10^{-8} \text{ м}^2 / \text{с}^3$$

$$\lambda_{0\text{ДПС}} \approx 3 \cdot 10^{-3} \text{ м}$$

в океане:

абиссаль

$$10^{-10} < \varepsilon [\text{м}^2 / \text{с}^3] < 10^{-1}$$

прибойная зона

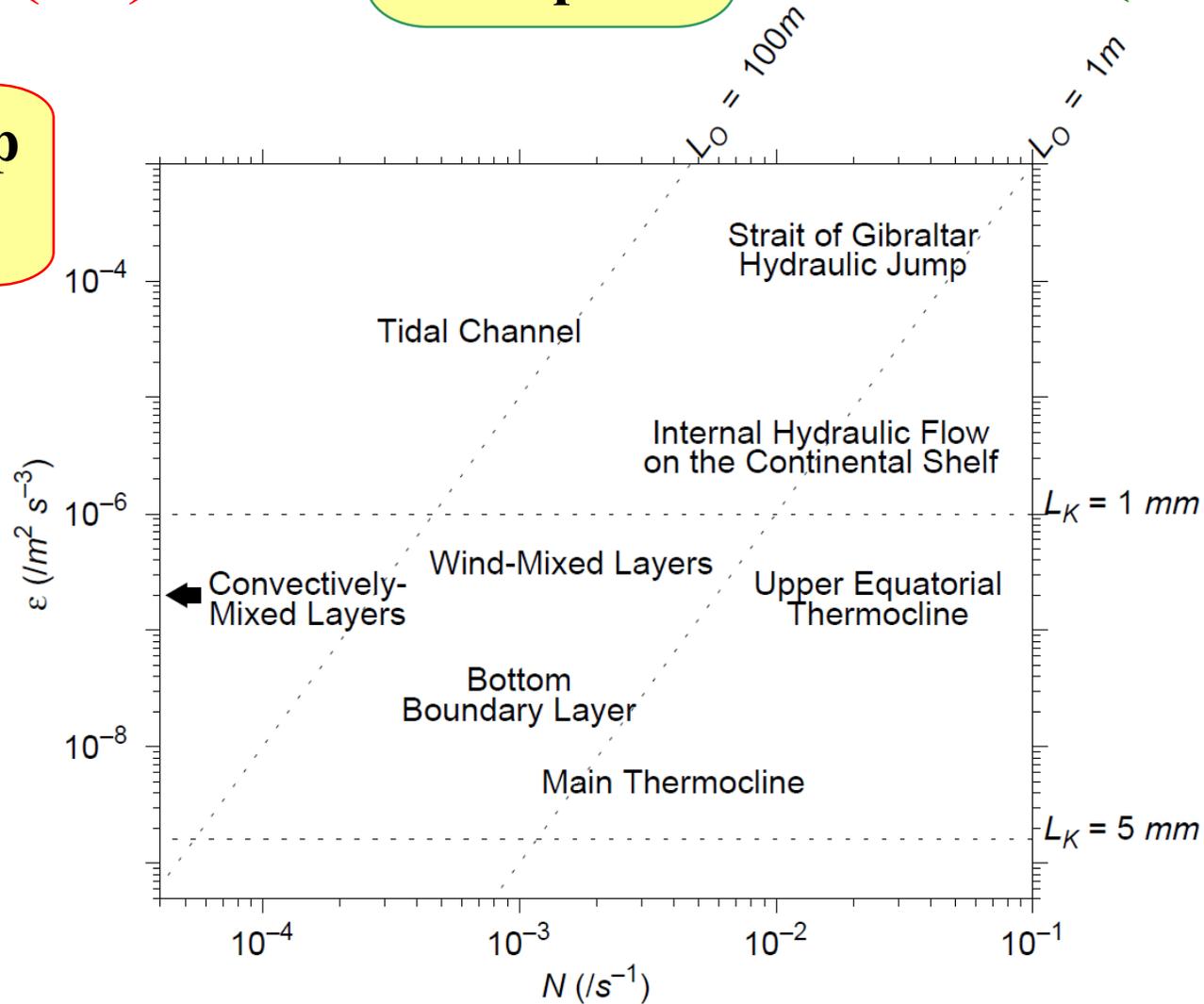
Масштабы Колмогорова (L_K) и Ozmidova (L_O)

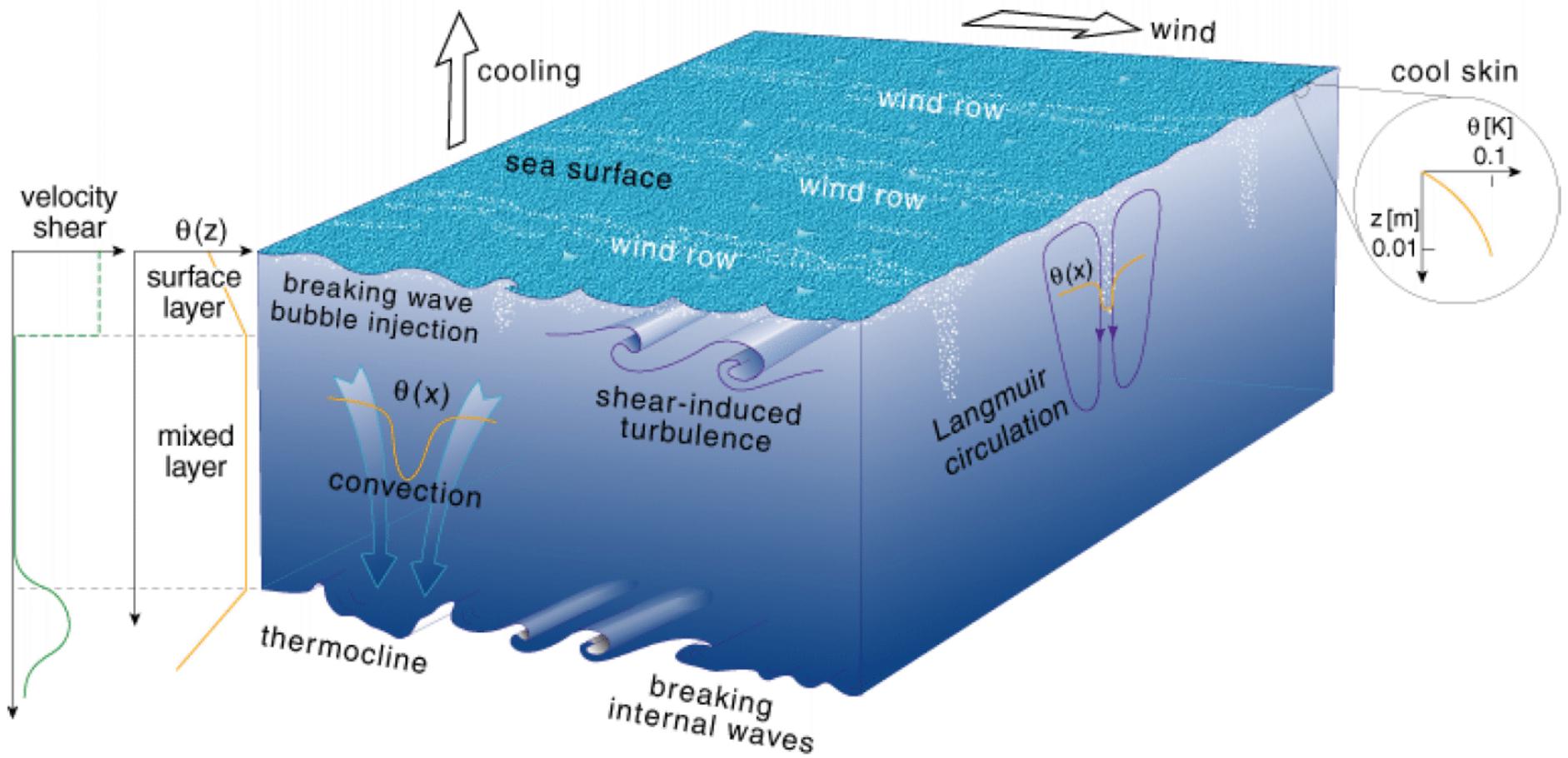
$$L_K \equiv \lambda_0 = \left(\frac{v^3}{\varepsilon} \right)^{1/4}$$

min размер
вихрей

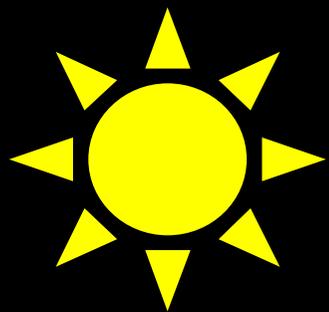
max
размер
вихрей

$$L_O = \left(\frac{\varepsilon}{N^3} \right)^{1/2}$$





Теплообмен между океаном и атмосферой



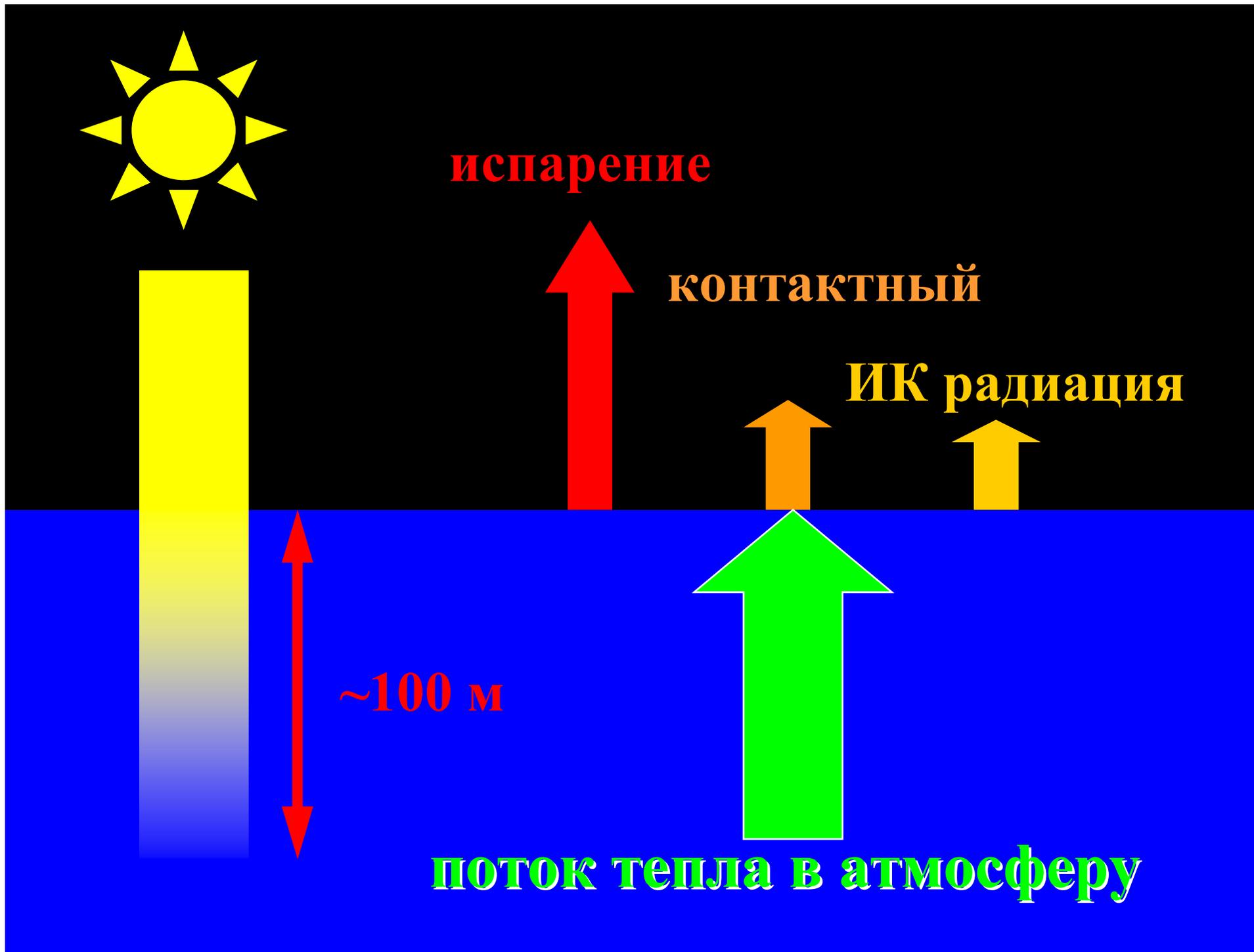
испарение

контактный

ИК радиация

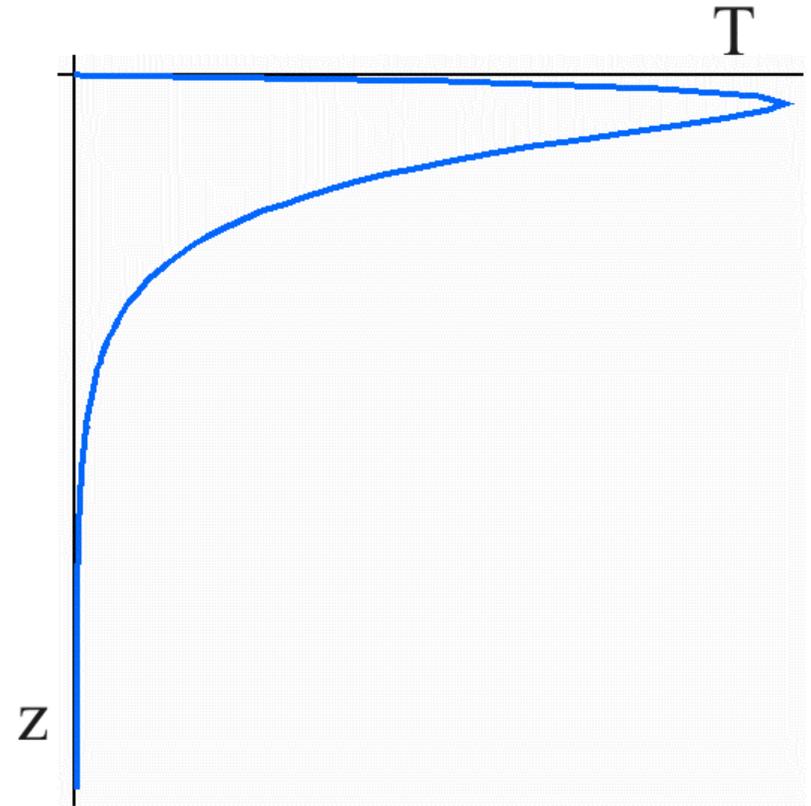
~100 м

поток тепла в атмосферу



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

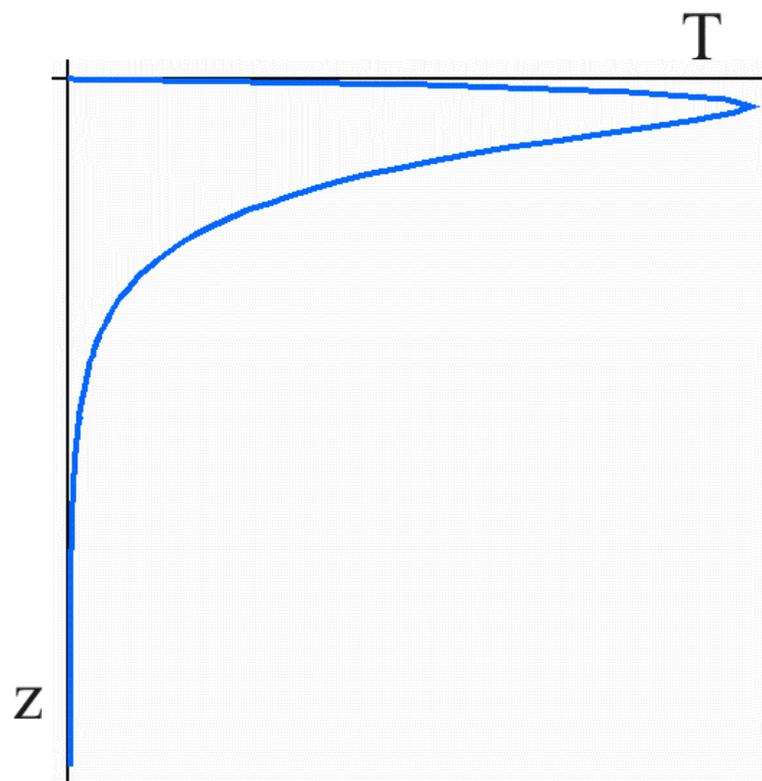
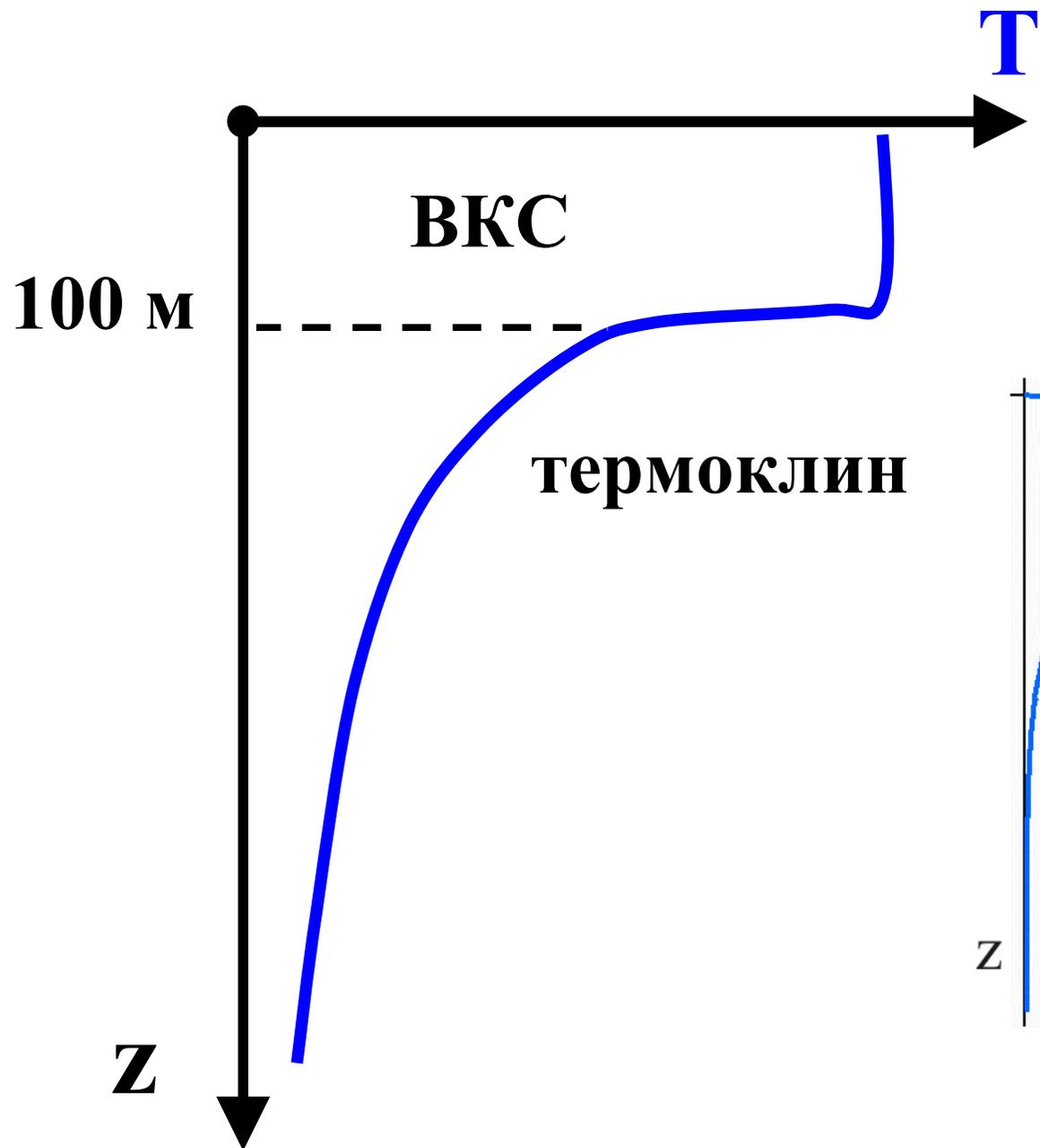
**молекулярная
температуропроводность**



$$Q(z) = C \cdot e^{z/z_0}, \quad C = \text{const}$$

Граничное условие:

$$z = 0: \quad -\frac{\partial T}{\partial z} = B(T_{\text{вода}} - T_{\text{атмосфера}})$$



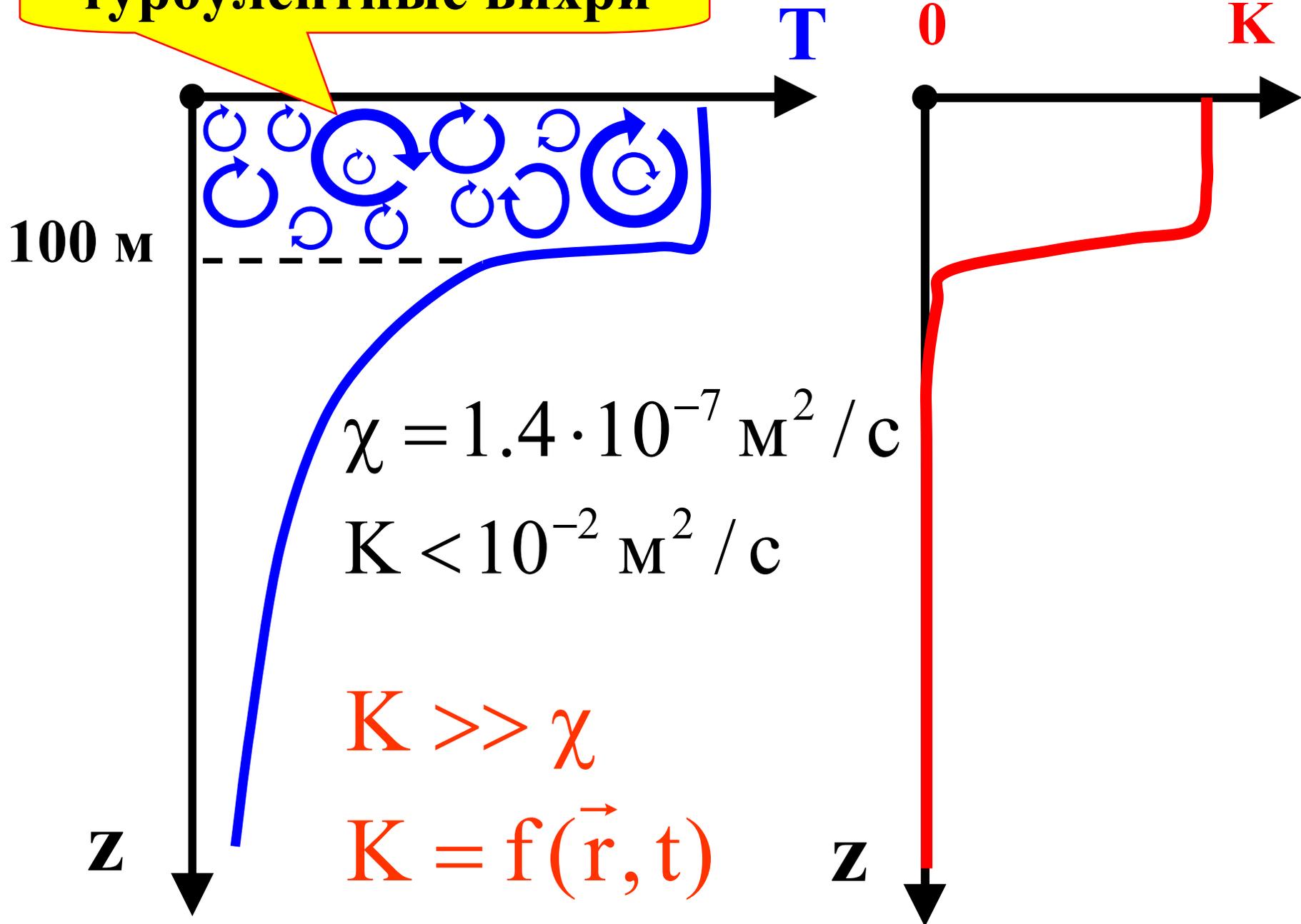
~~$$\frac{\partial T}{\partial t} = \chi \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + Q(z)$$~~

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

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

**Коэффициент турбулентного
обмена теплом**

турбулентные вихри



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

**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

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

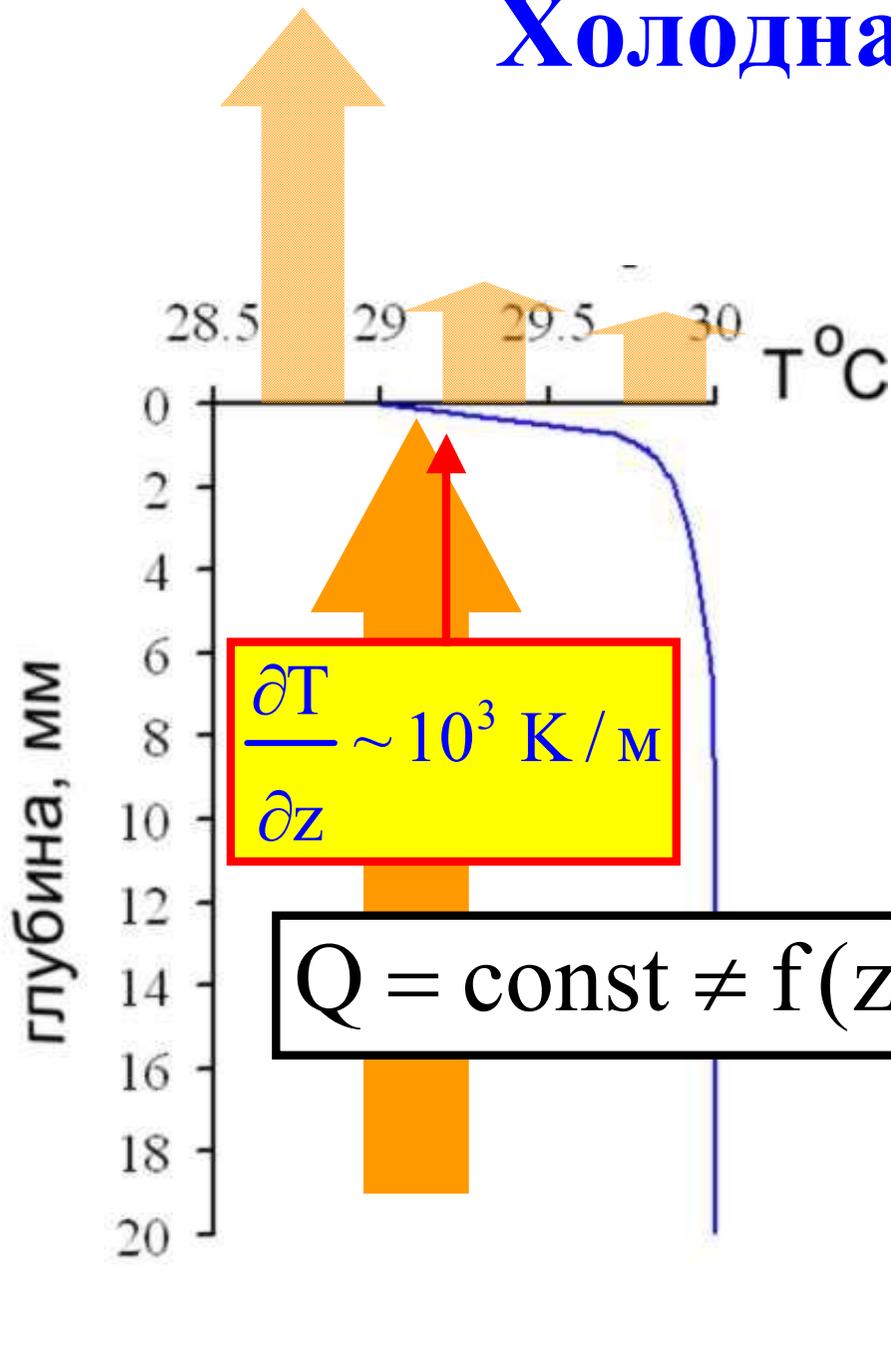
$$\nu = 10^{-6} \text{ м}^2 / \text{с}$$

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

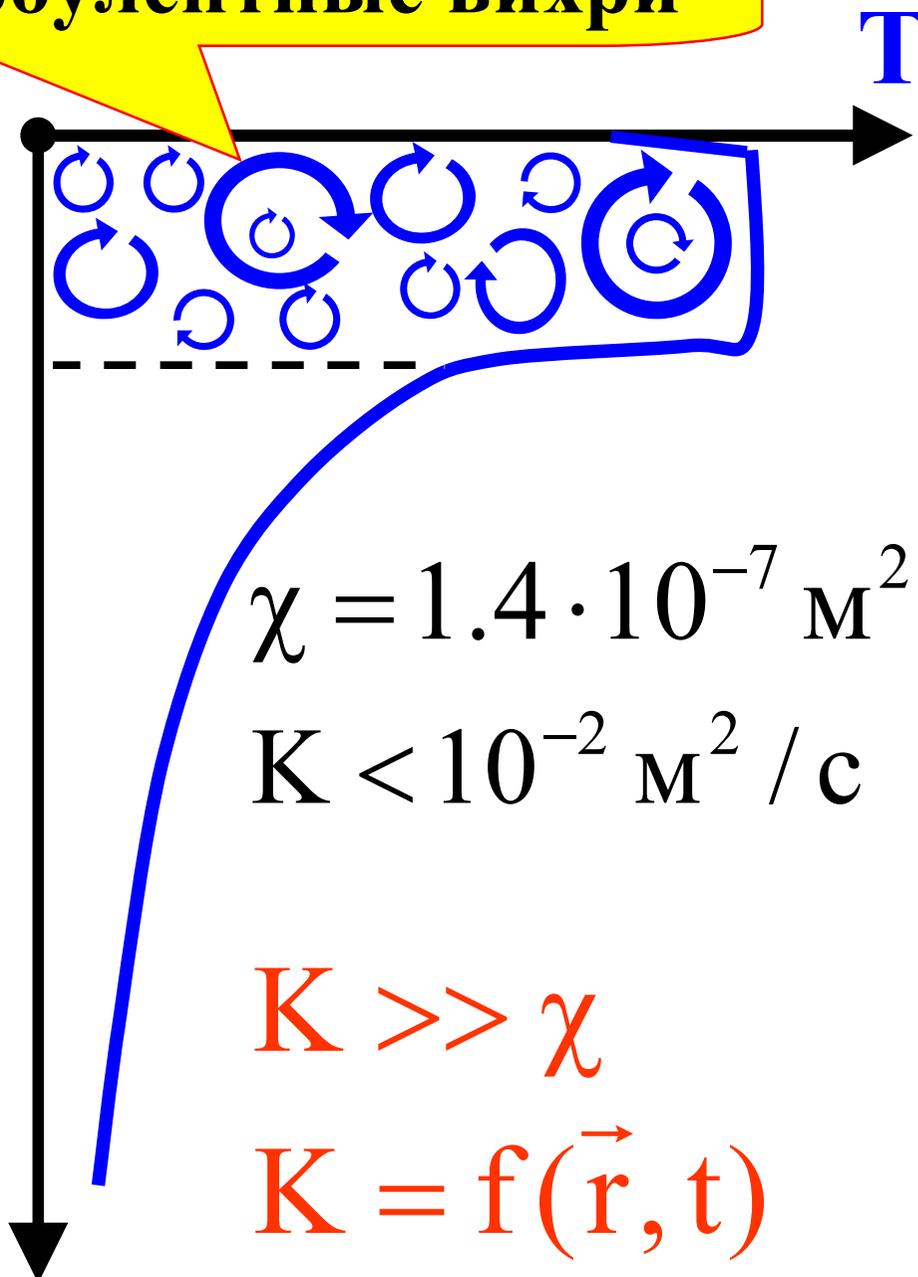


$$Q \sim -[\chi + K(z)] \frac{\partial T}{\partial z}$$

**схема вне
масштаба!**

турбулентные вихри

100 м



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

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

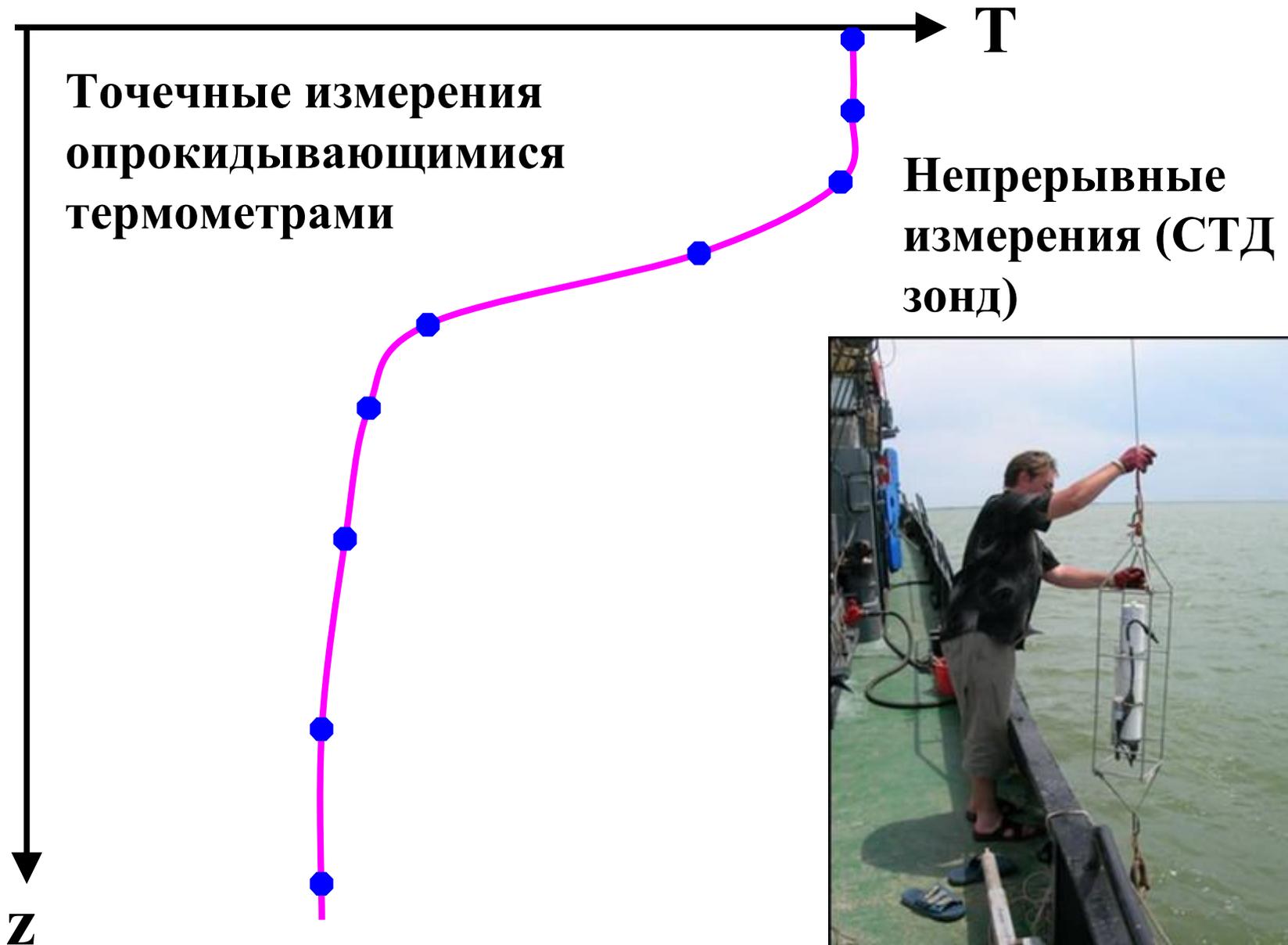
$$K \gg \chi$$

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

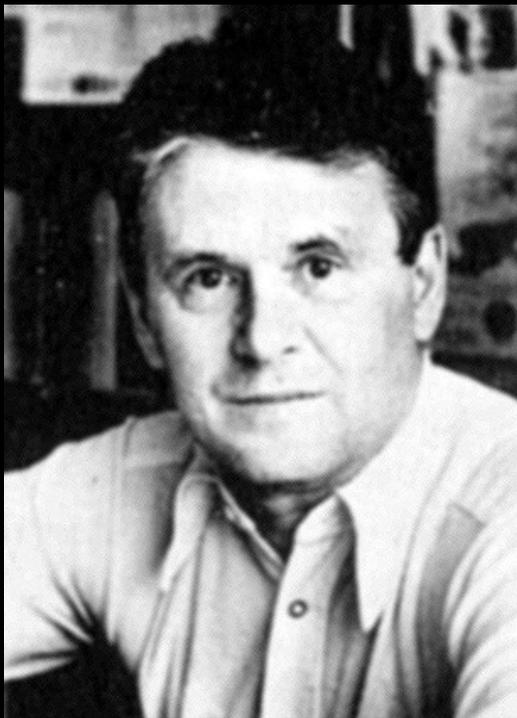


$K \rightarrow 0$ при приближении к поверхностям

Методика измерения вертикального профиля температуры



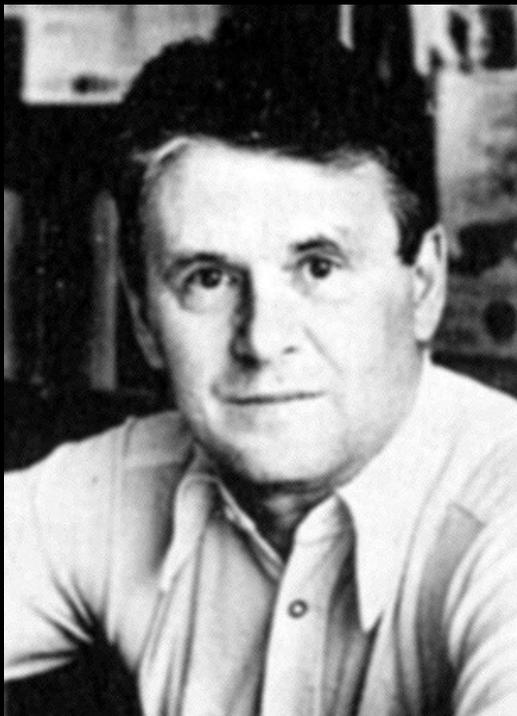
Тонкая термохалинная структура



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

...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 термохалинная структура



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

...океан повсеместно —
тонкослоистая среда, в
которой существуют
сравнительно однородные по
свойствам тонкие слои
толщиной от десятков
метров до десятков
сантиметров, разделенные
более тонкими граничными

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

солености, скорости звука,
плотности, скорости
течения...

Тонкая термохалинная структура

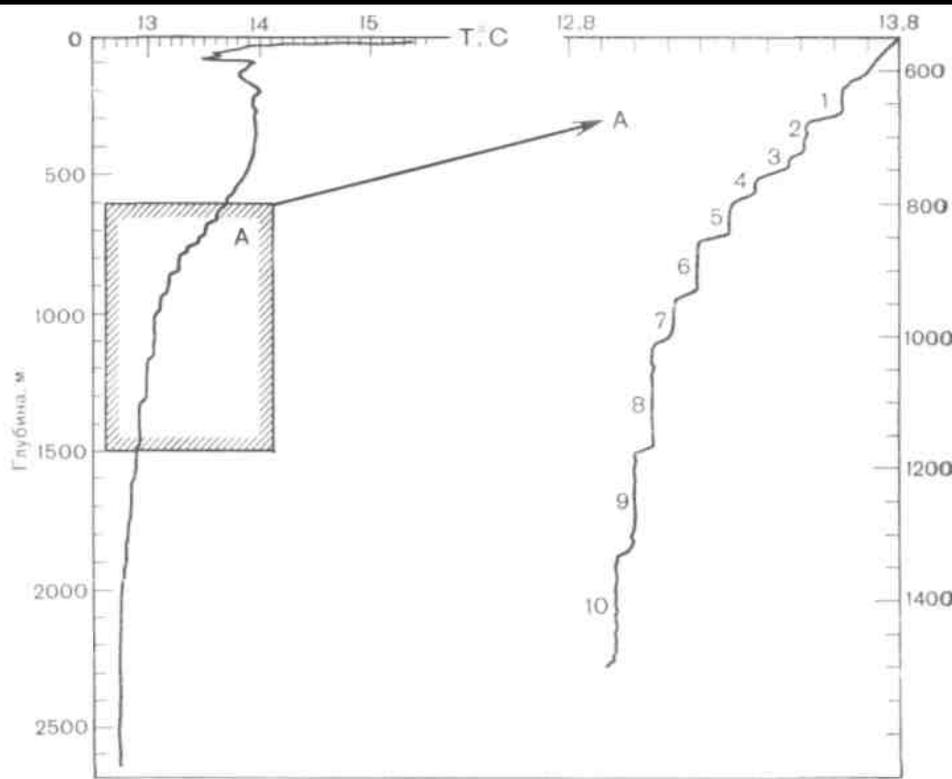


Рис. 4. Вертикальный профиль температуры в Тирренском море с участком ступенчатой структуры А, представленным в увеличенном виде в правой части рисунка (по данным Р. Молкара и А. Уильямса, 1975)

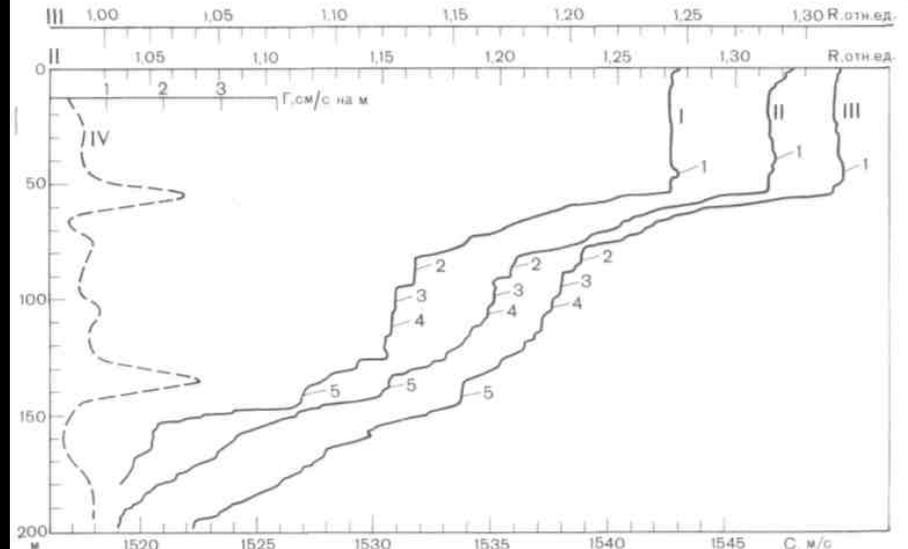


Рис. 1. Сравнение вертикальных профилей термодинамических характеристик океана (профили получены различными приборами в разное время 28 февраля 1972 г. в Индийском океане, НИС «Дмитрий Менделеев», станция № 484)

I — скорость звука C , II и III — относительная электропроводность R (с интервалом в 40 мин.), IV — модуль вертикального градиента скорости течения G , сглаженный с шагом 10 м; 1 — инверсия температуры, 2, 3, 4 — перемешанные по вертикали ступеньки, 5 — перемешанный слой

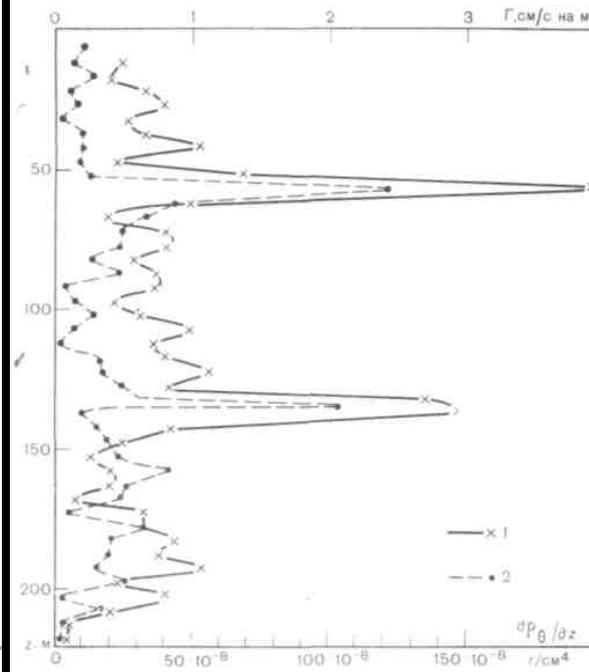
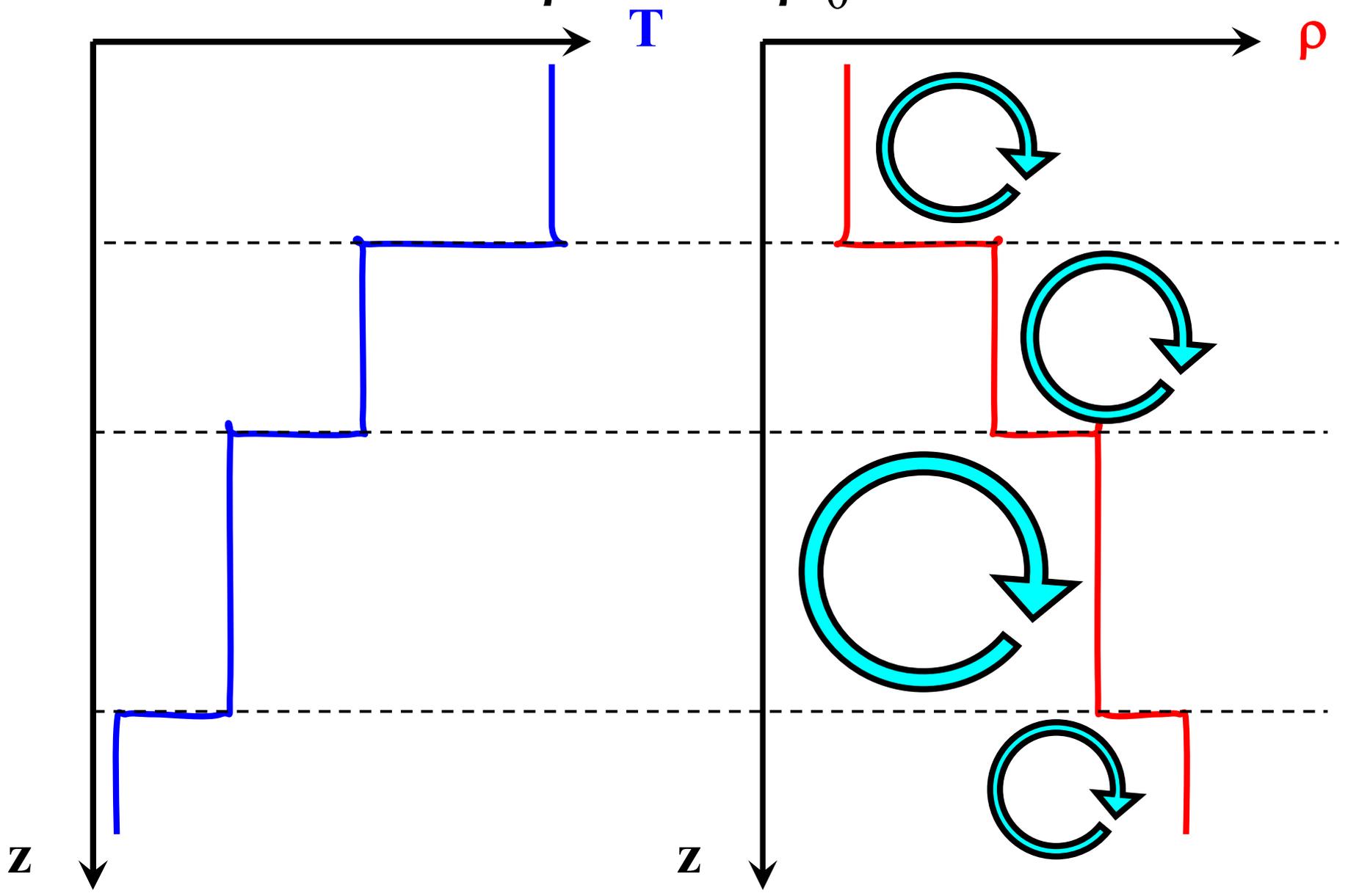


Рис. 2. Совпадение слоев с высокими вертикальными градиентами (данные синхронных измерений термосолезондом «Аист» и зондом скорости течений «Кроссбим» в 1972 г. в Индийском океане, НИС «Дмитрий Менделеев», станция № 484)

1 — модуль вертикального градиента скорости течения G , 2 — вертикальный градиент потенциальной плотности воды $\rho_0/\partial z$

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



Уравнение баланса турбулентной энергии в горизонтально однородной стратифицированной среде

$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\left[v + \frac{K_T}{\sigma_k} \right] \frac{\partial k}{\partial z} \right) + K_T \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} \right)^2 - \varepsilon + \frac{g}{\rho} \frac{K_T}{\sigma_\rho} \frac{\partial \rho}{\partial z}$$

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

Горизонтальные
градиенты
солености и
температуры
скомпенсированы!

[Rudnick, Ferrari, 1999]

