

Введение в физику гидросферы

2026 Лекция №7

Носов Михаил Александрович

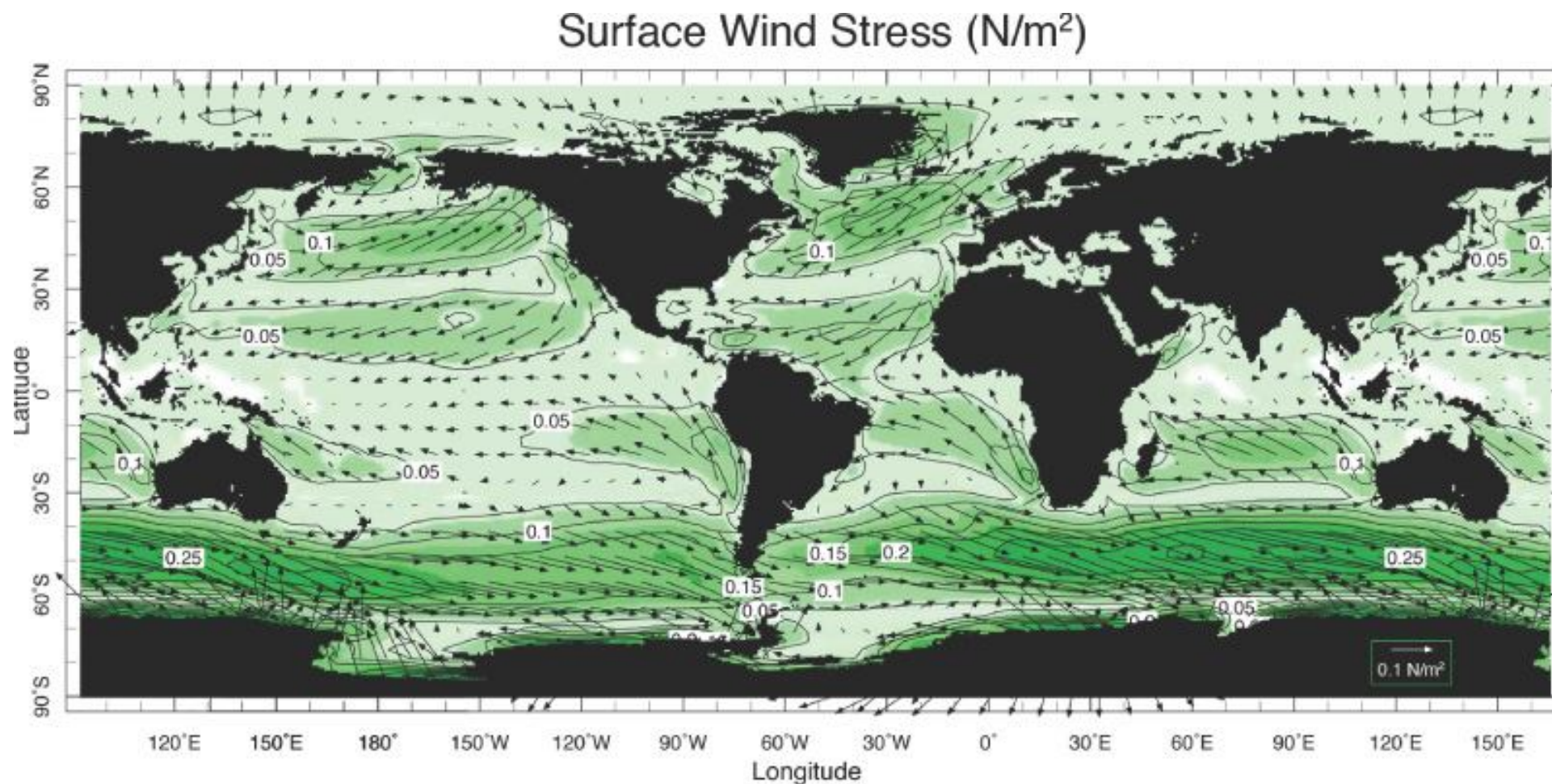
кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

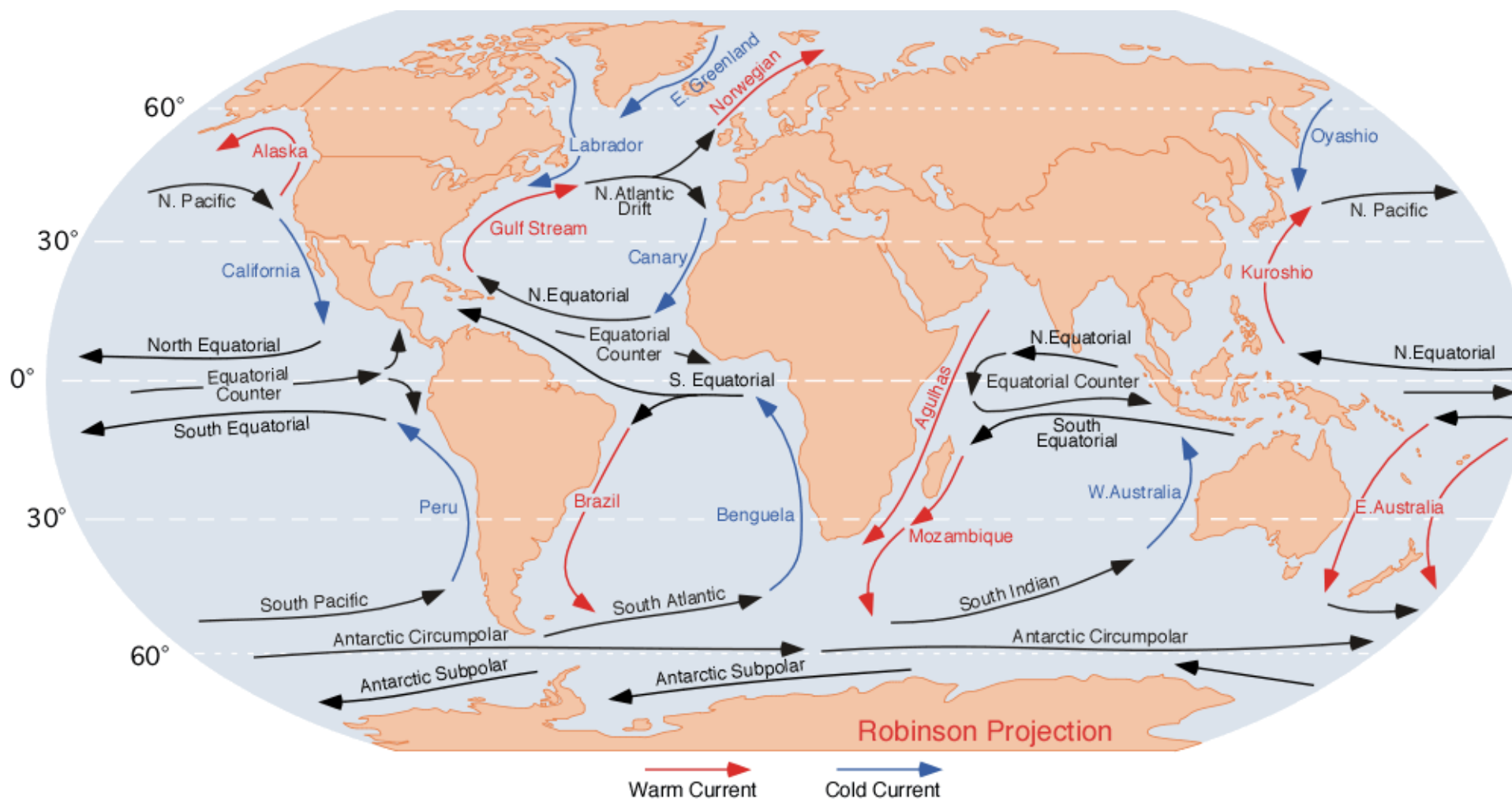
физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

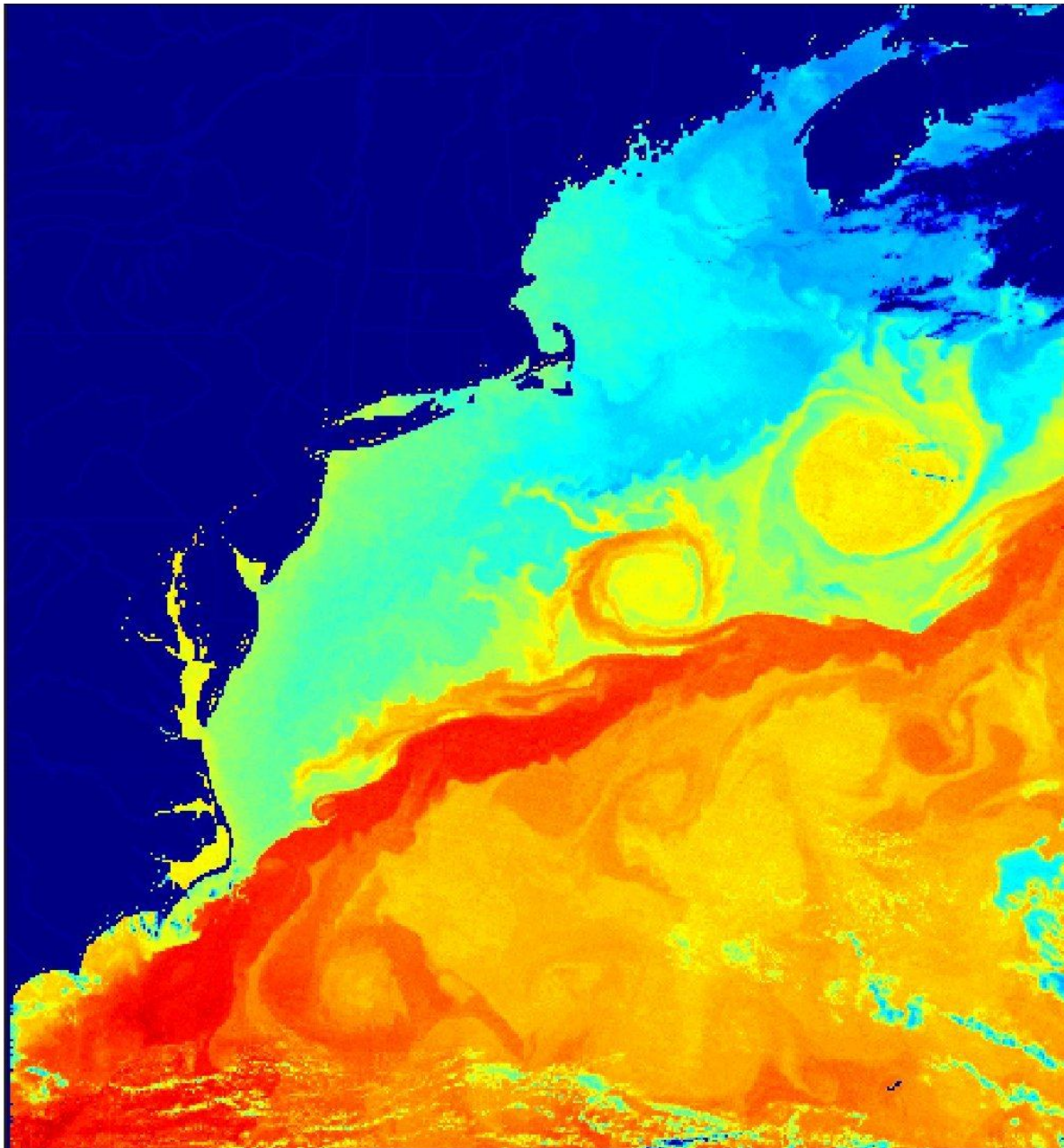


Среднегодовое напряжение трения ветра на поверхности океана



Течения на поверхности Мирового океана





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

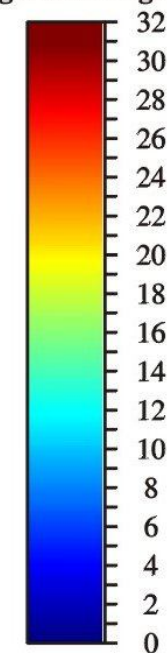
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

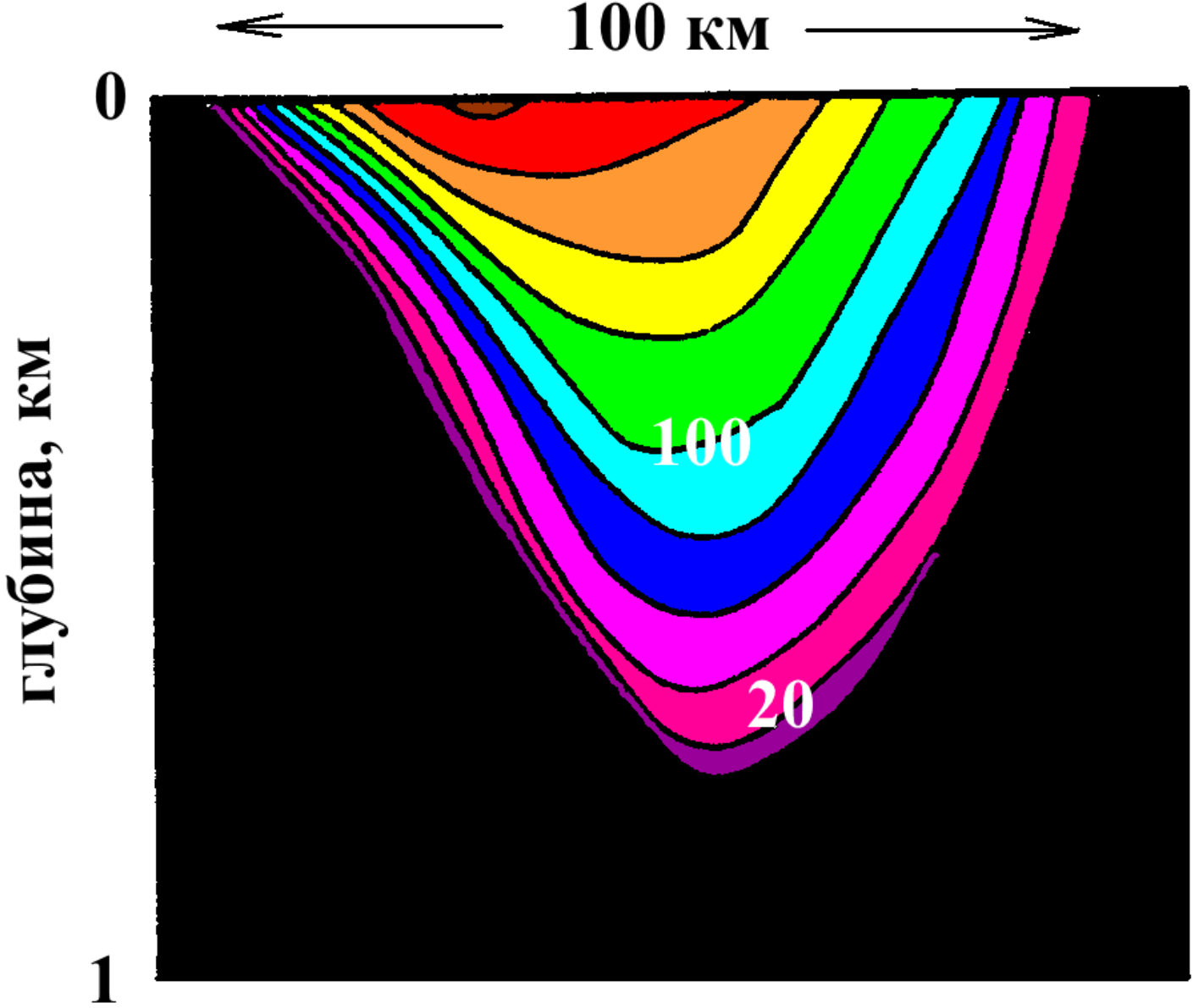
Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

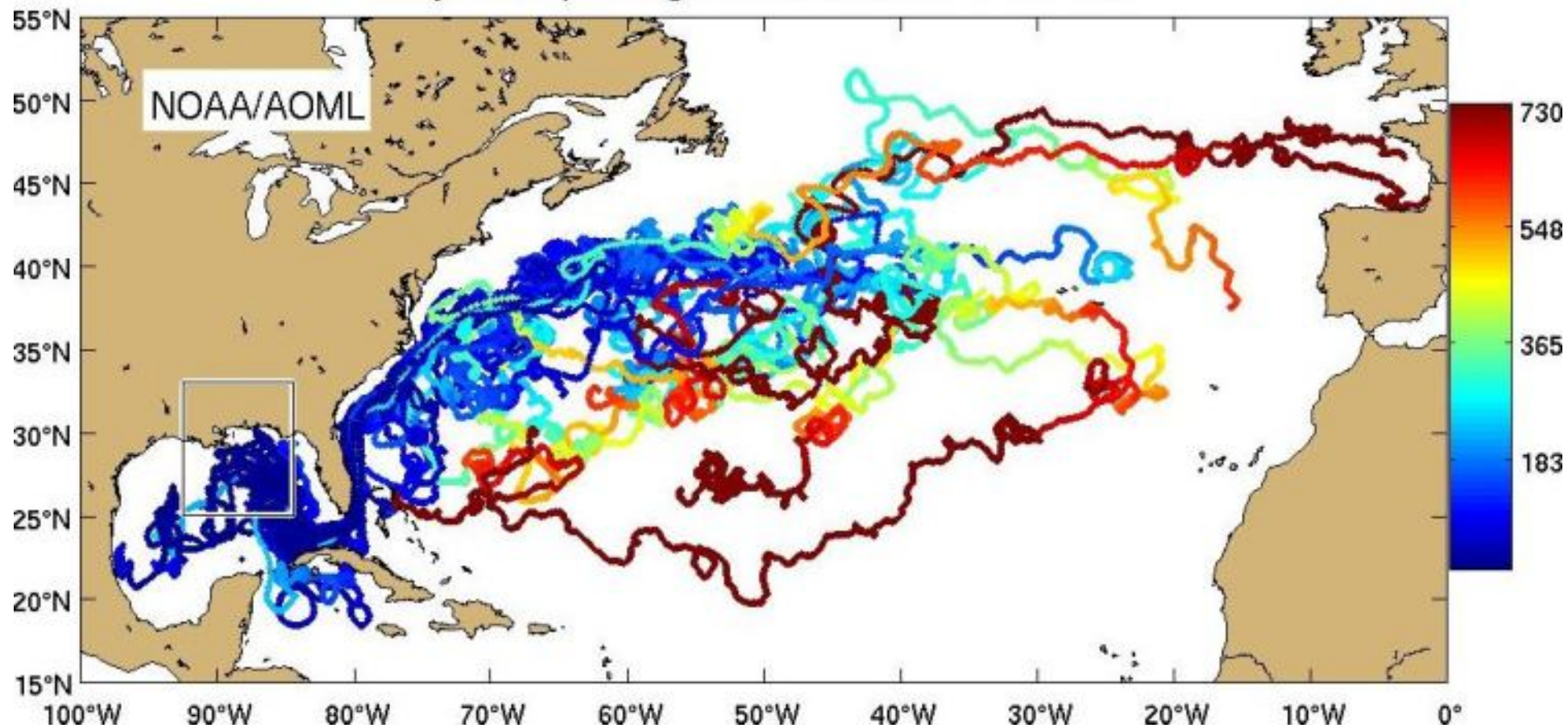
Surface Temperature (Degrees Centigrade)

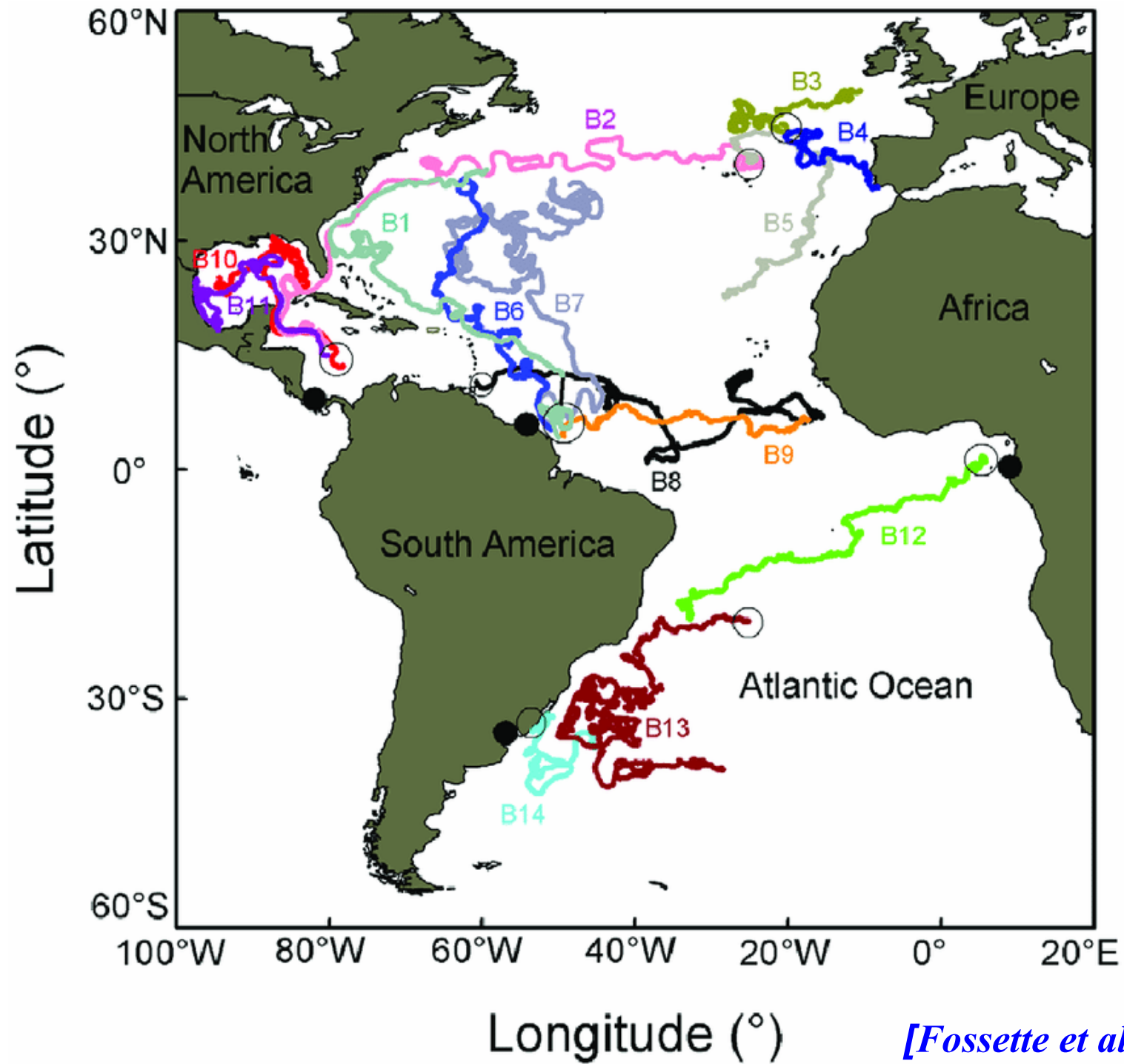


Вертикальная структура течения Гольфстрим

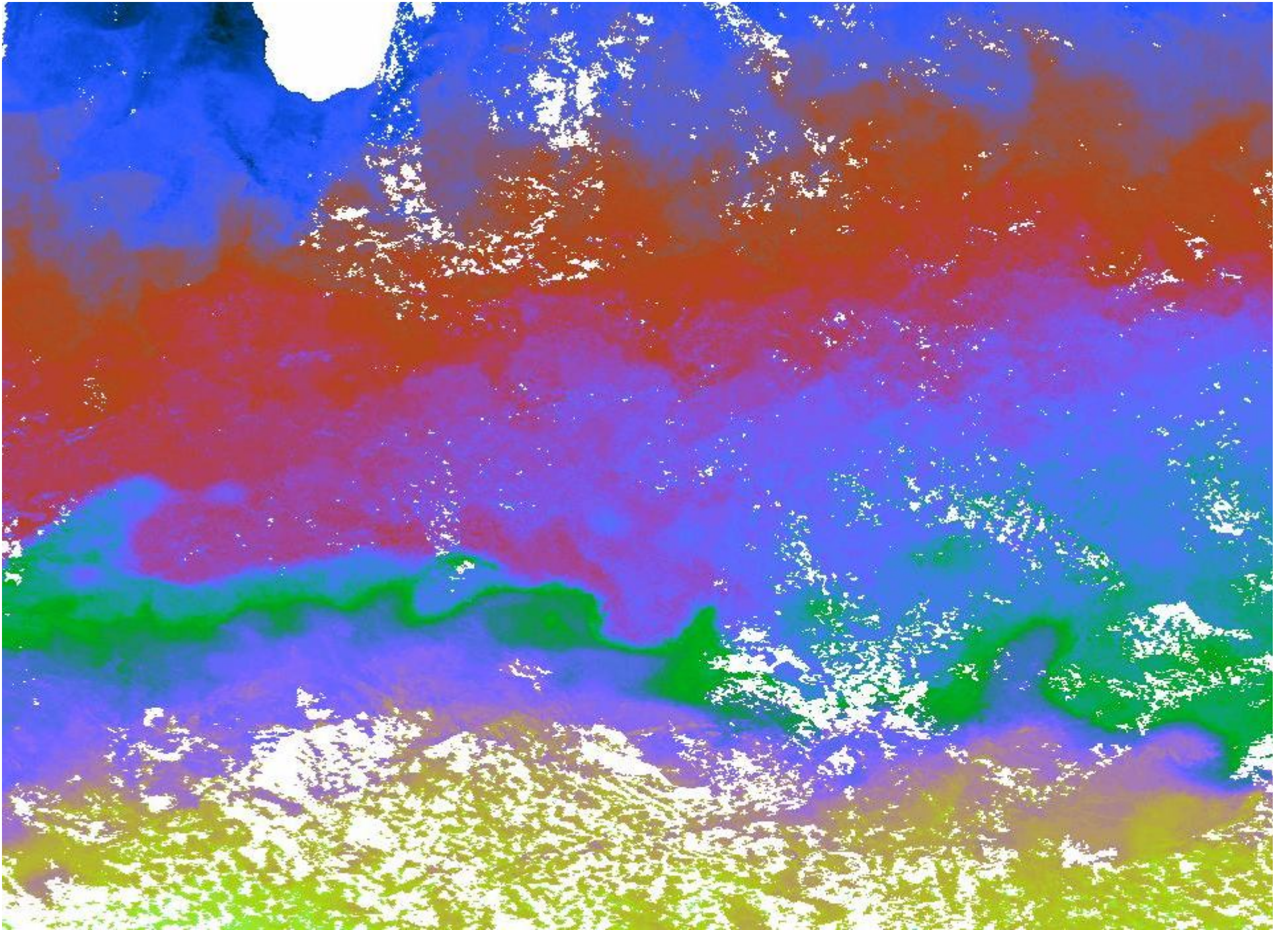


Days after passing closest to center of Gulf box

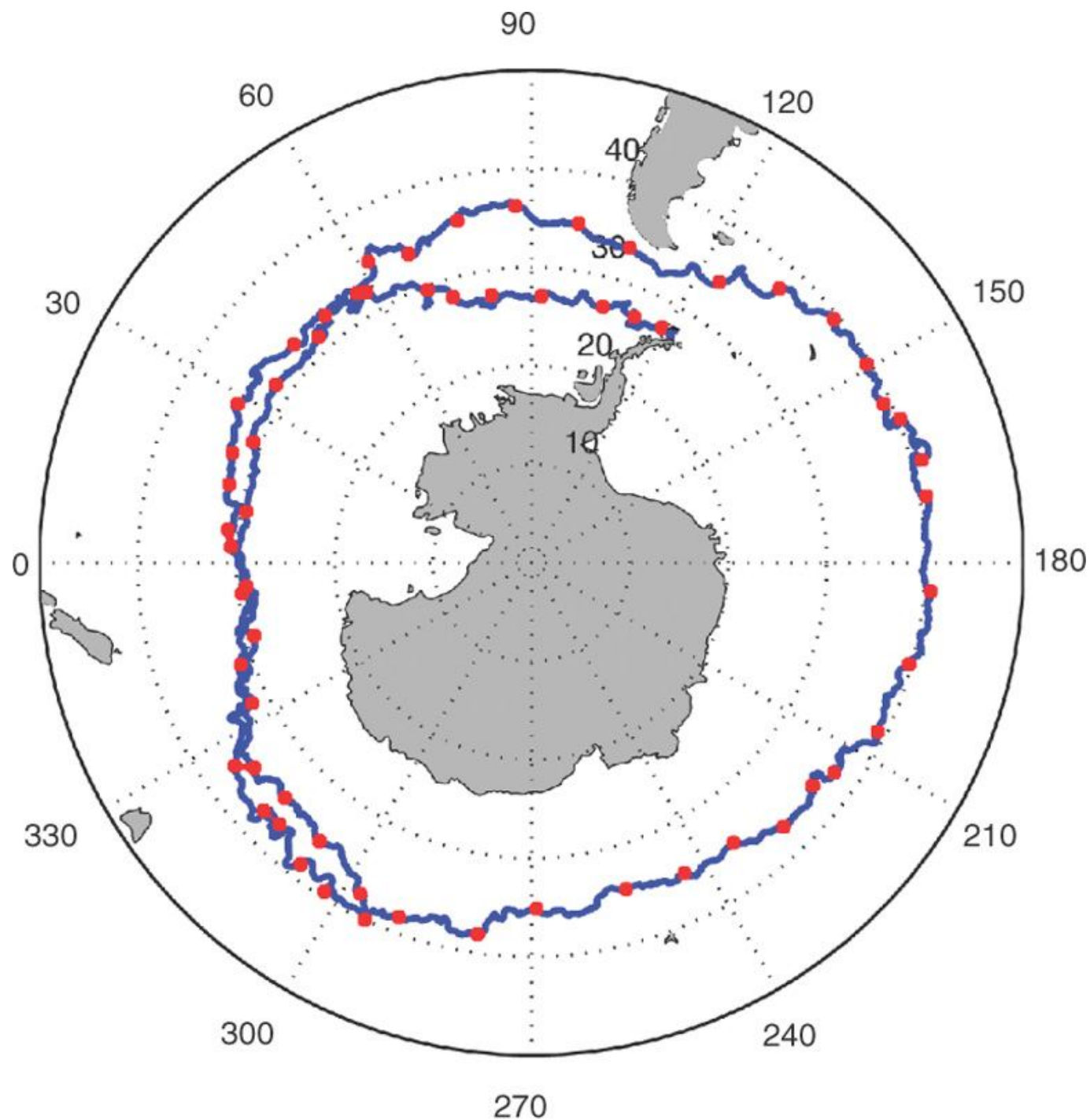




[Fossette et al., 2010]

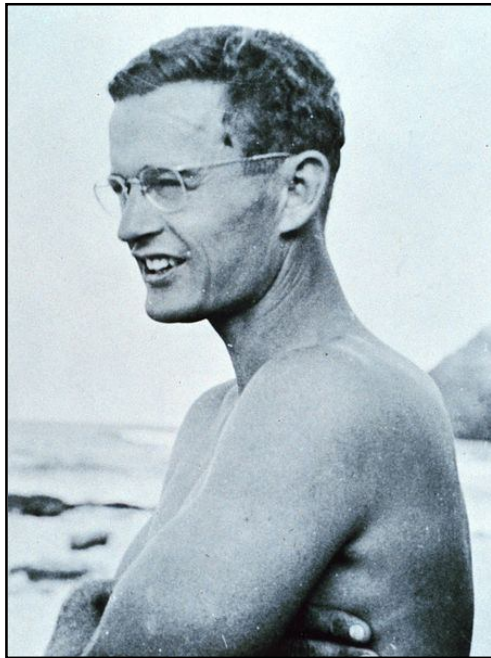


**Траектория
поверхностного
дрифтера за
период с марта
1995 г. по март
2000 г. Красные
точки – 30 сут.
интервал**



(Courtesy of Nikolai Maximenko.)

**Глубинное течение
обнаружено в 1951 г.
рыбаками под Южным
Пассатным течением
(случайно!)**



***Таунсенд Кромвелл*
(1922–1958)
американский
океанограф**

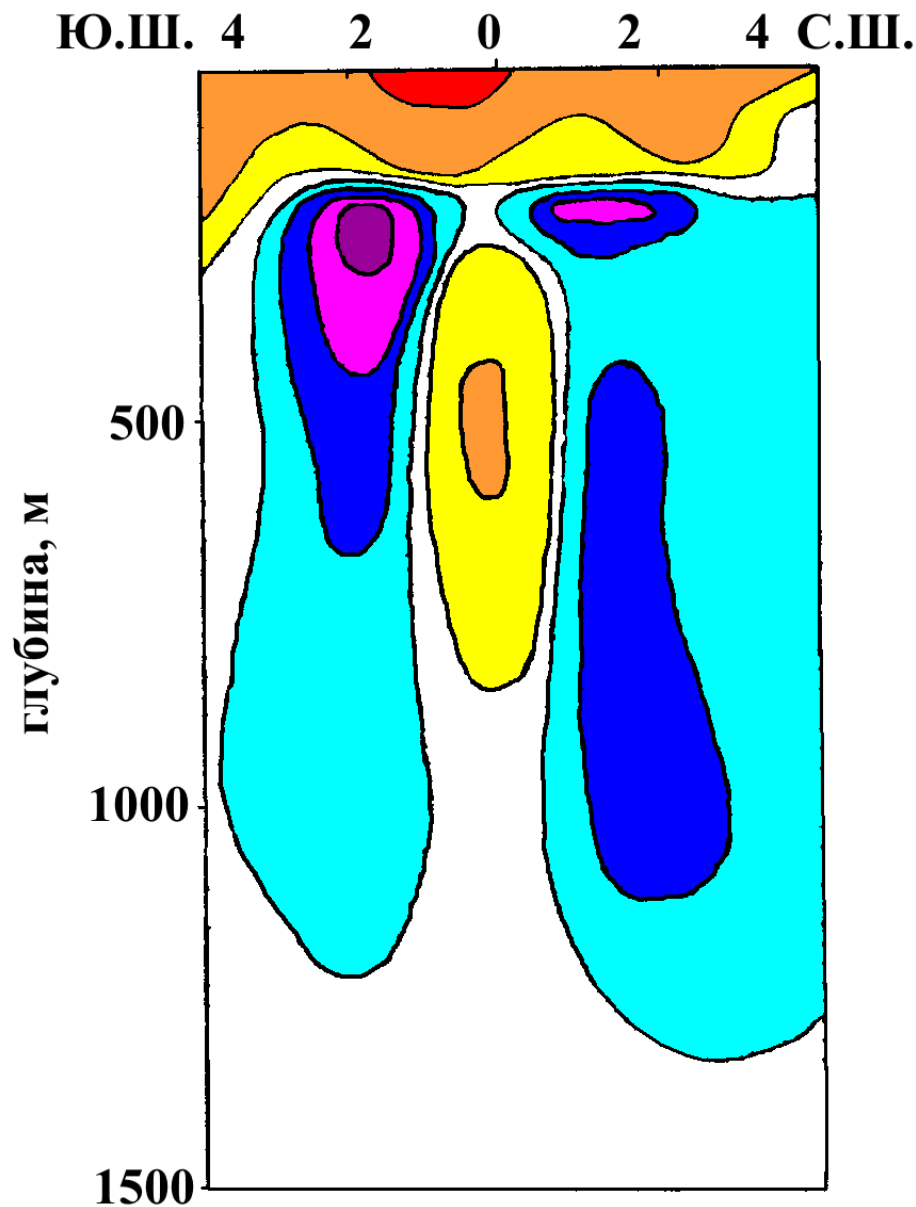
- ❑ *Таунсенд Кромвелл:*
«...подводная река вдоль
Экватора от Соломоновых
до Галапагосских о-вов
(8000 миль), ширина 150-200
миль, скорость до 1.5 м/с»**
- ❑ Вначале названо
Экваториальным
противотечением, после
гибели Т.Кромвелла в 1958г.
в авиакатастрофе
переименовано в течение
Кромвелла**
- ❑ В дальнейшем исследовано
экспедицией на НИС
«Витязь»**

**Вертикальная структура
течения Кромвелла в
плоскости 176° З.Д.
(НИС «Витязь»)**



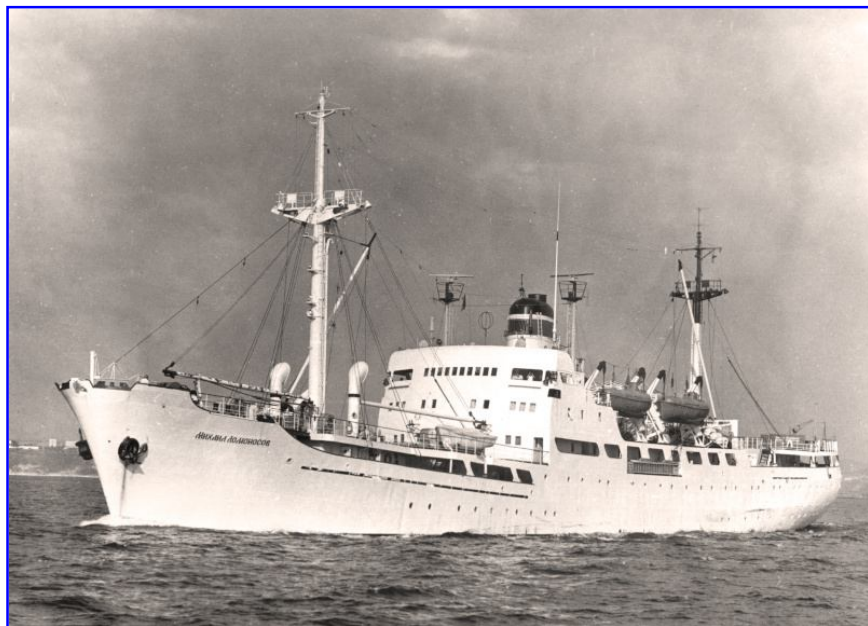
Особенности:

- 1. Устойчивая П-образная структура**
- 2. В центре «П» - обратный поток**



1959 г. с борта НИС «Михаил Ломоносов» обнаружено экваториальное подповерхностное противотечение в Атлантическом океане (течение Ломоносова)

Глубины 75 – 400 м, скорости до 1.2 м/с, ширина 200-250 миль.



**НИС «Михаил Ломоносов»
- первое в СССР
крупнотоннажное судно,
специально построенное
для комплексного изучения
Мирового океана (по
инициативе
В.В.Шулейкина).**

1959-1960 гг. с борта НИС «Витязь» обнаружено экваториальное подповерхностное противотечение в Индийском океане (течение Тареева, названо в 1974 г.)

Глубины 100-400 м, скорость до 1 м/с, ширина 200-300 миль



**Тареев Борис
Александрович
(1931-1972)**

Океанолог, специалист по гидродинамике океана, доктор физико-математических наук (1970). Участвовал в 7 морских и океанских экспедициях в Черном море, Индийском и Тихом океанах.

По предложению ИО АН СССР открытое в 1960 году в Индийском океане подповерхностное экваториальное противотечение было названо в 1974 году именем Б.А.Тареева.

**1969 г. с борта НИС «Академик Курчатов» обнаружено
Гвиано-Антильское подповерхностное противотечение
в Атлантическом океане**

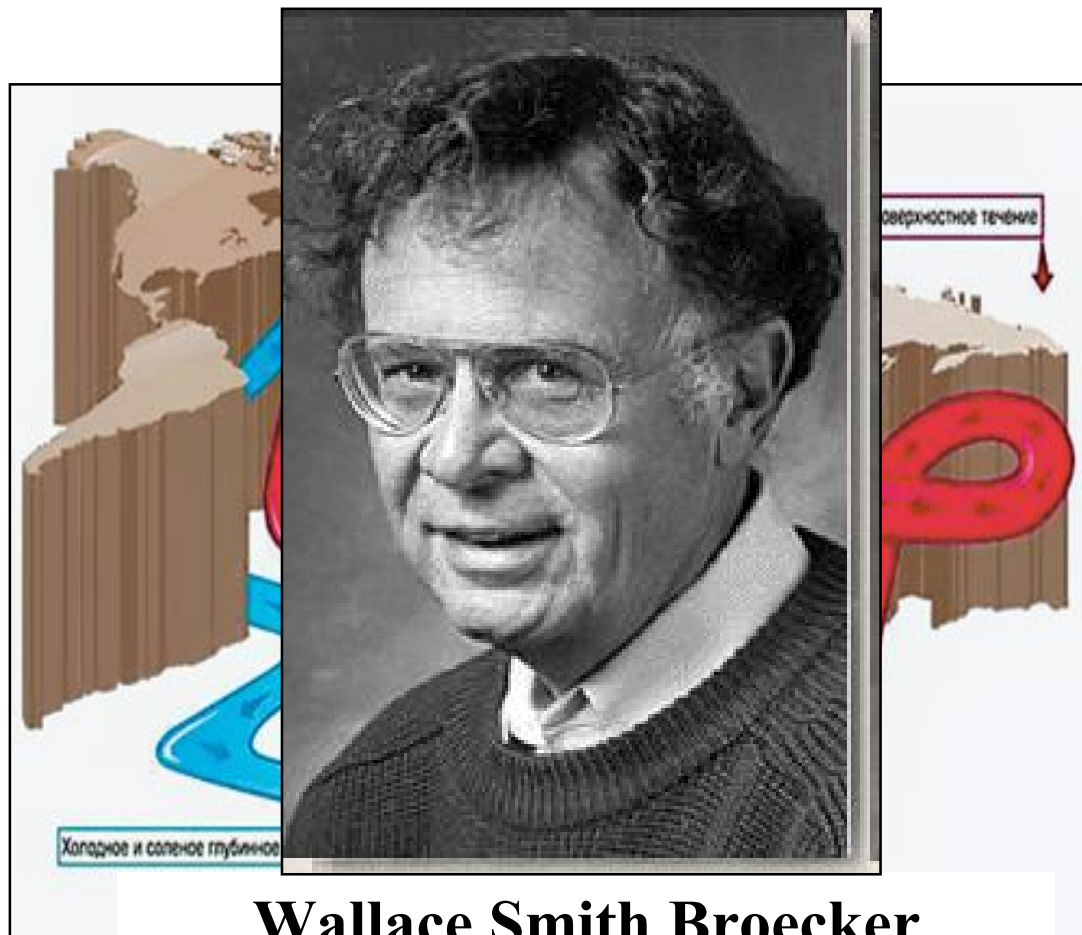
Глубины 600 – 800 м, ширина 80-150 миль.



Глобальная межокеанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)

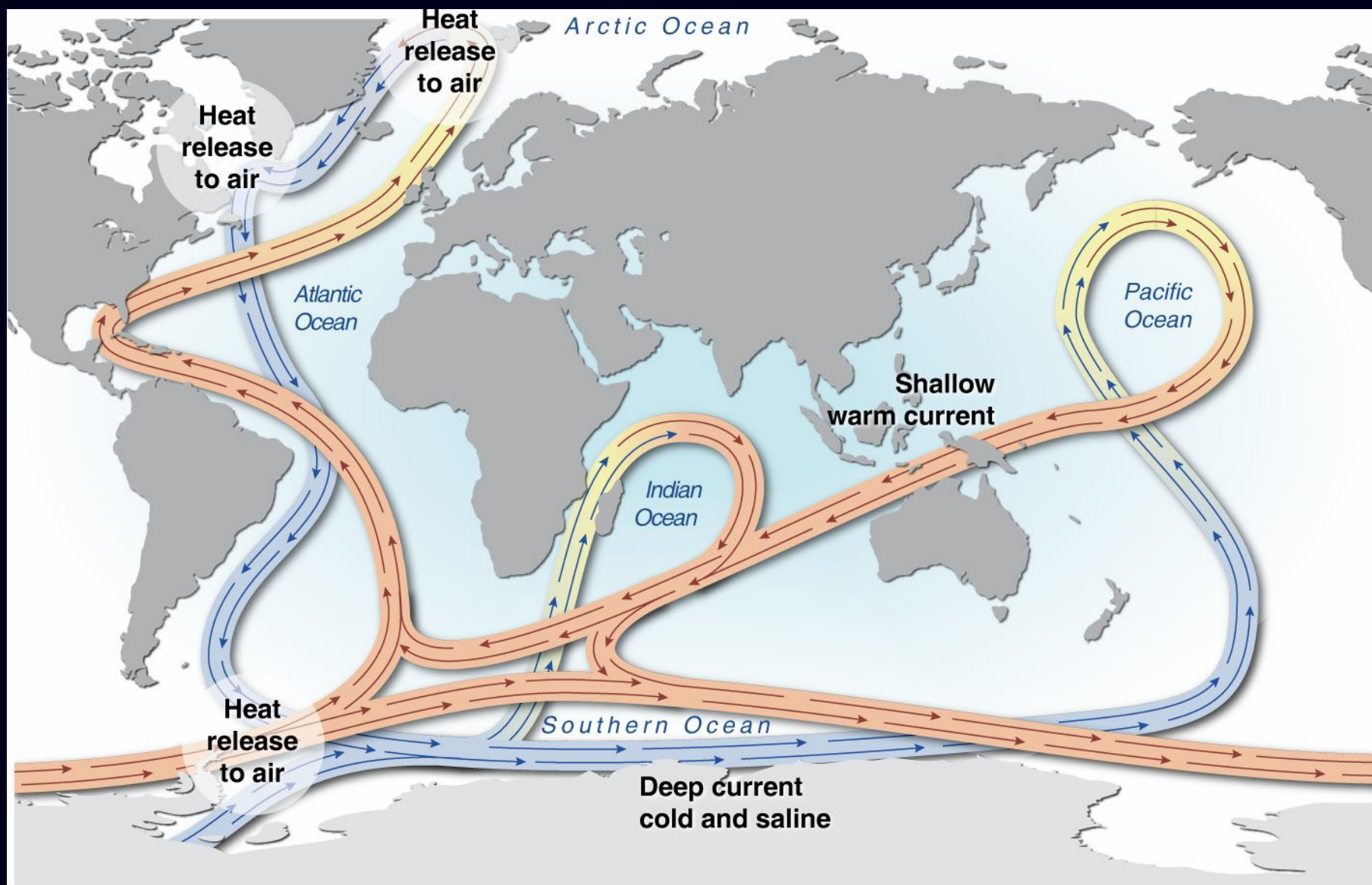


Сергей Сергеевич Лаппо
1938-2006
российский океанолог,
член-корр. РАН,
Директор Института
океанологии РАН
(1995—2006)



Wallace Smith Broecker
developed the idea of a «global
conveyor belt»

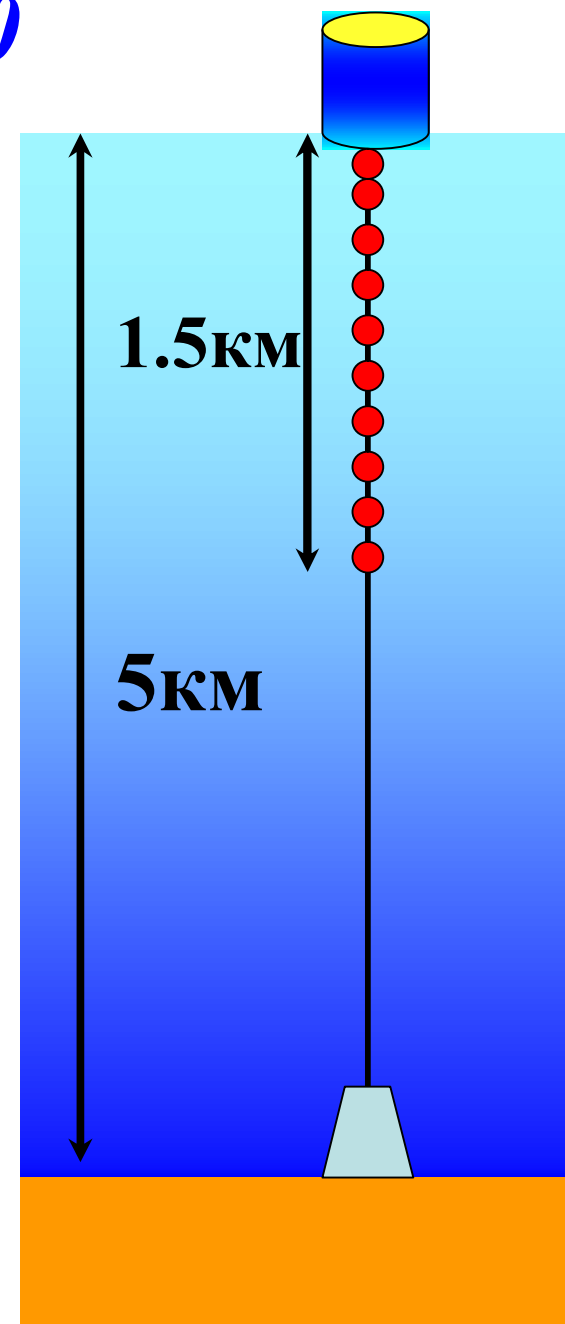
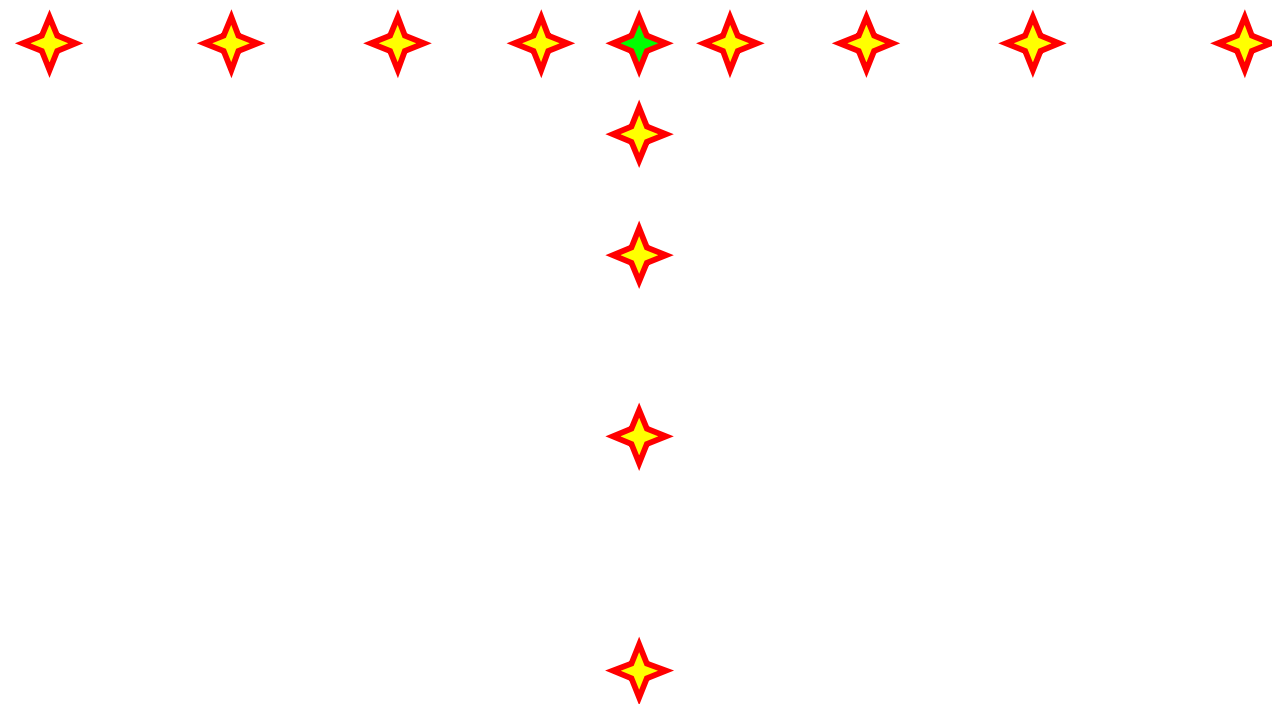
Глобальная меж океанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)



Изменчивость течений

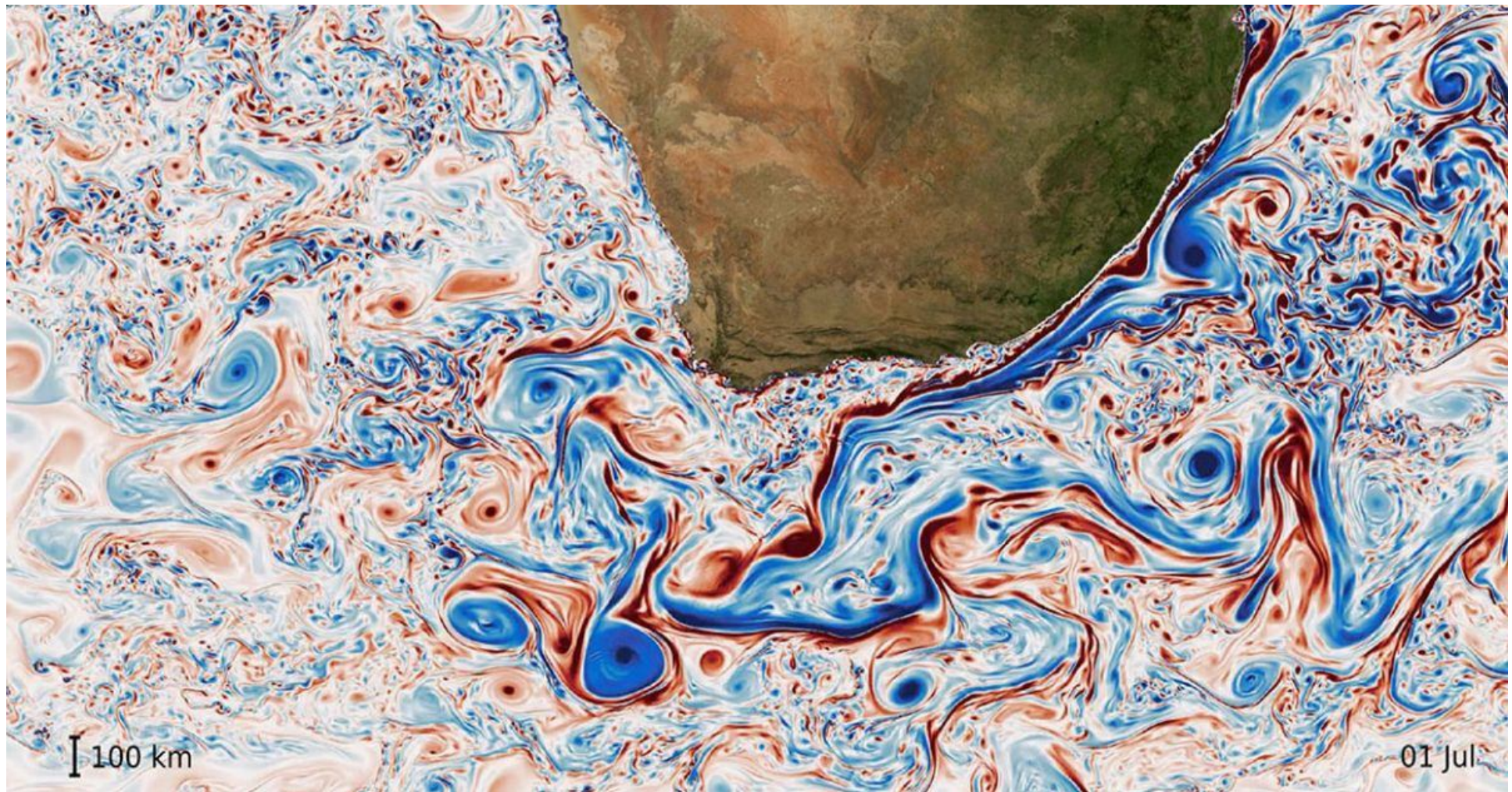
ПОЛИГОН-70

120x120 миль



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»)
- ❑ 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

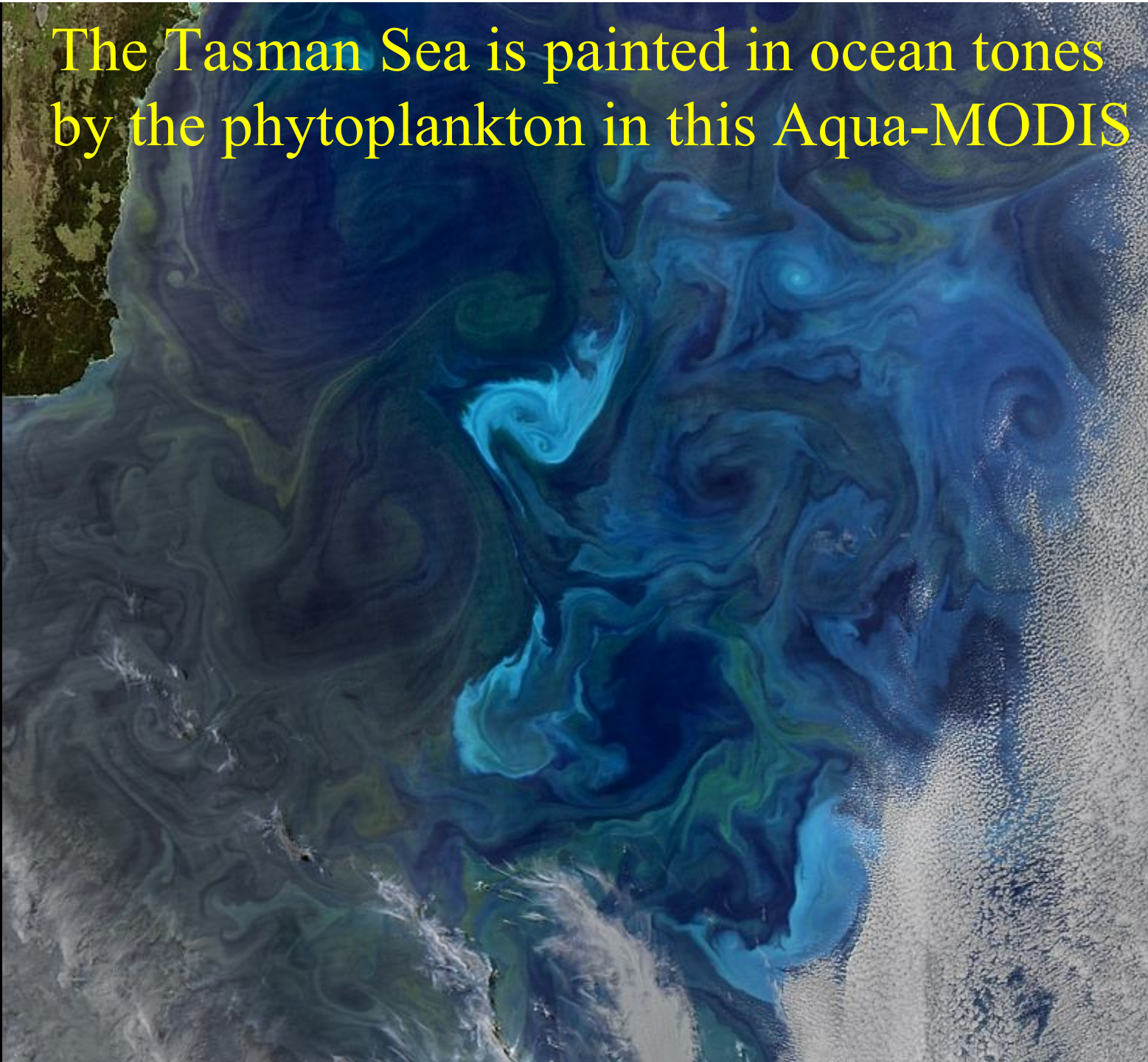


Mesoscale and submesoscale currents in the ocean south of Africa. A zoom into snapshots of surface normalized relative vorticity (a measure of rotation and turbulence) from a $1/60^\circ$ of horizontal resolution numerical simulation. (Image credit: Arne Biastoch, Franziska Schwarzkopf, GEOMAR)

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

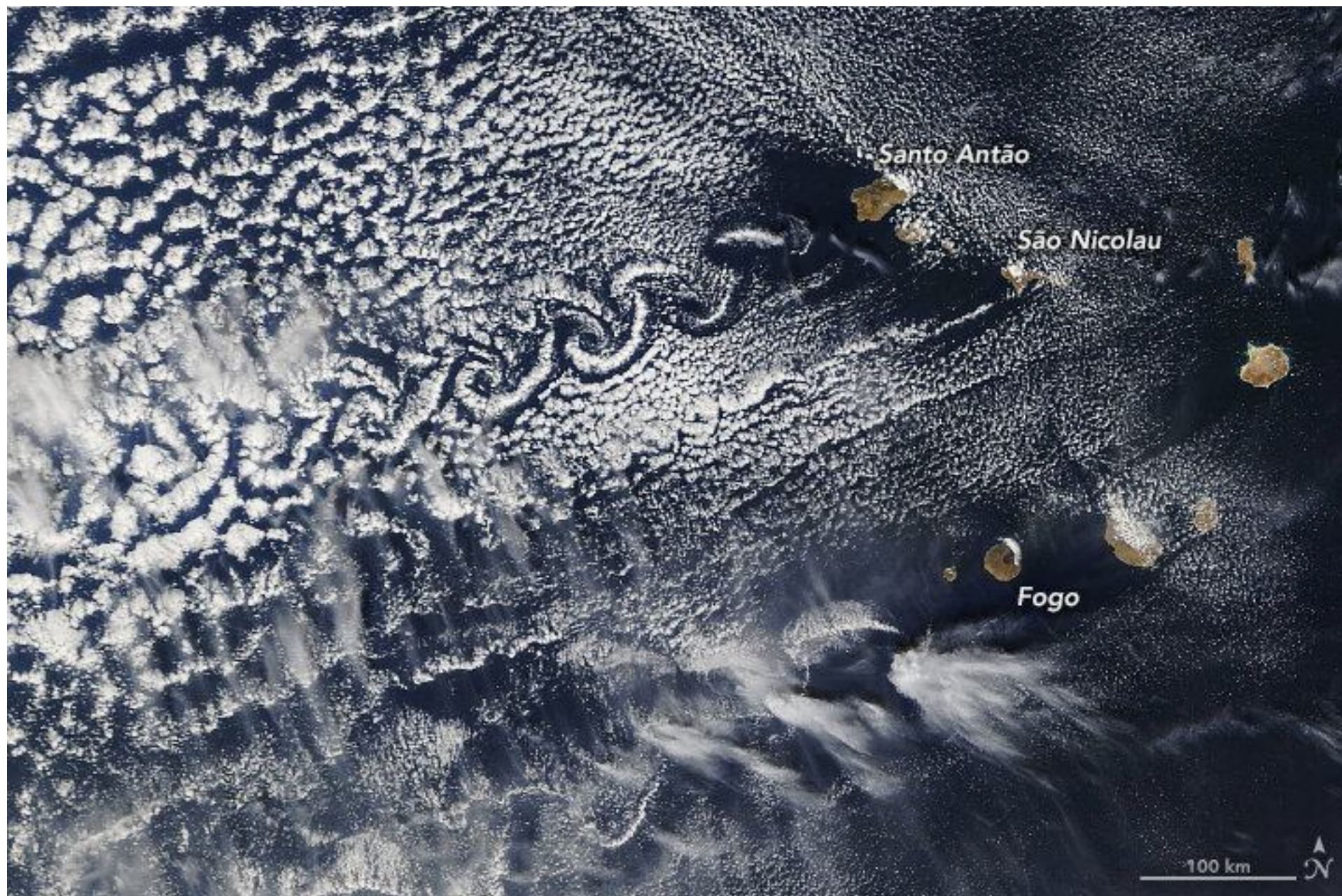




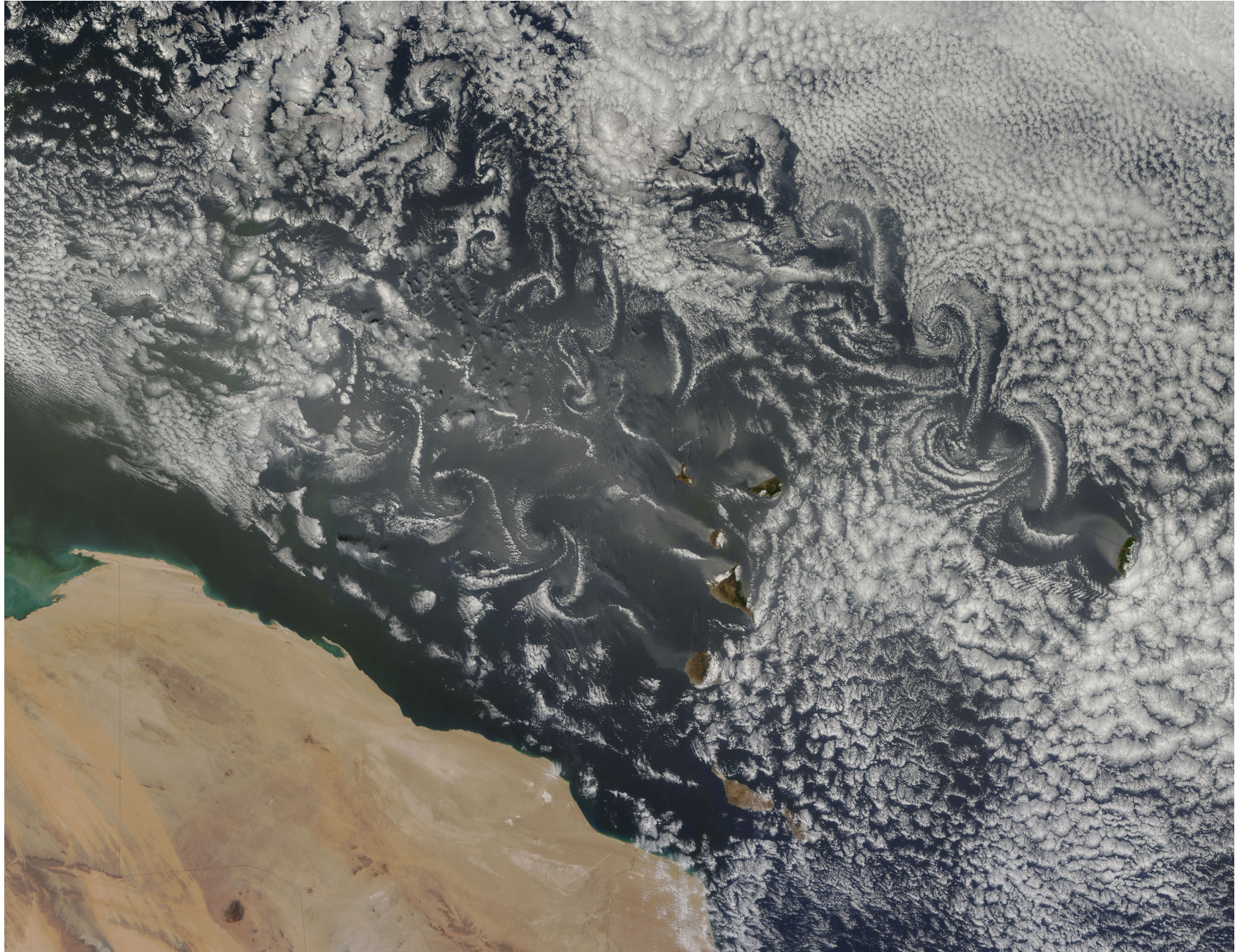
Вихревой характер поверхностных течений в Черном море. Обычно течения визуализируются за счет фитопланктона, но в данном случае визуальный эффект создал богатый карбонатами ил, который был занесен в воду после тропического шторма.



Вихри у побережъя Японии при цунами 2011 г

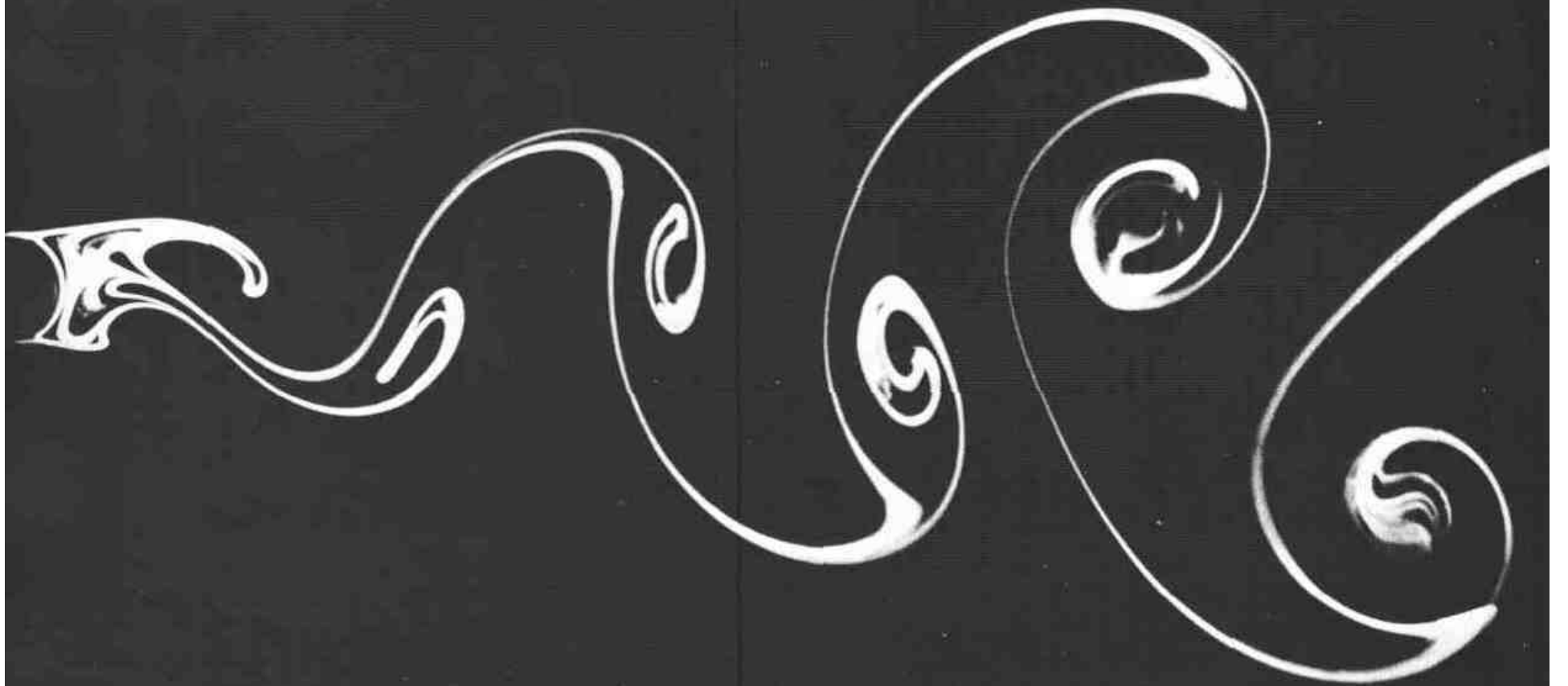


Вихревая дорожка Кармана за группой островов (Cape Verde)



Вихревая дорожка Кармана за Канарскими островами

Re=140





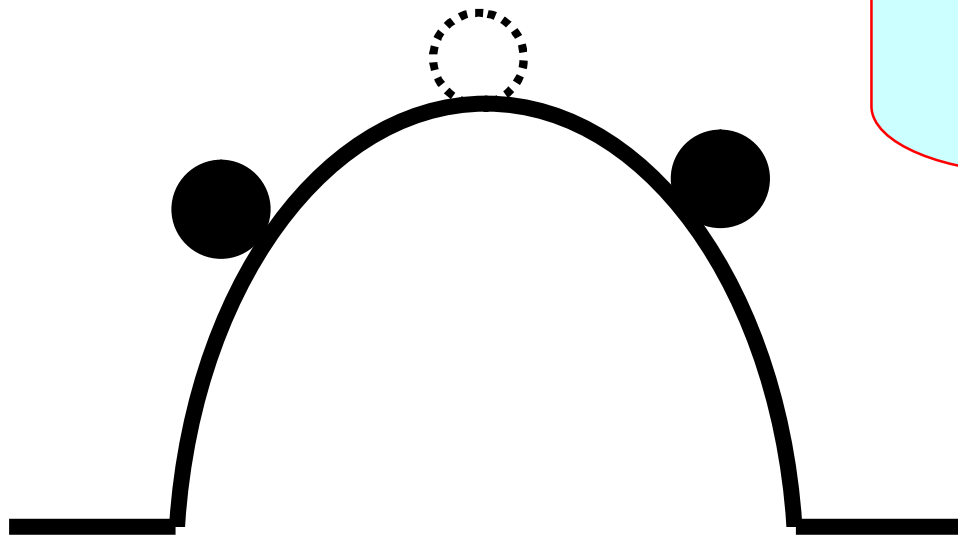
Неустойчивость течений

“Sunset at Rock Mountain Beach”

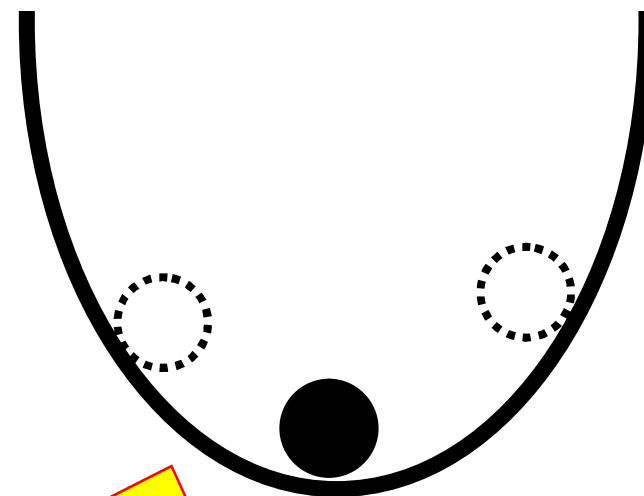
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO

Устойчивость

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

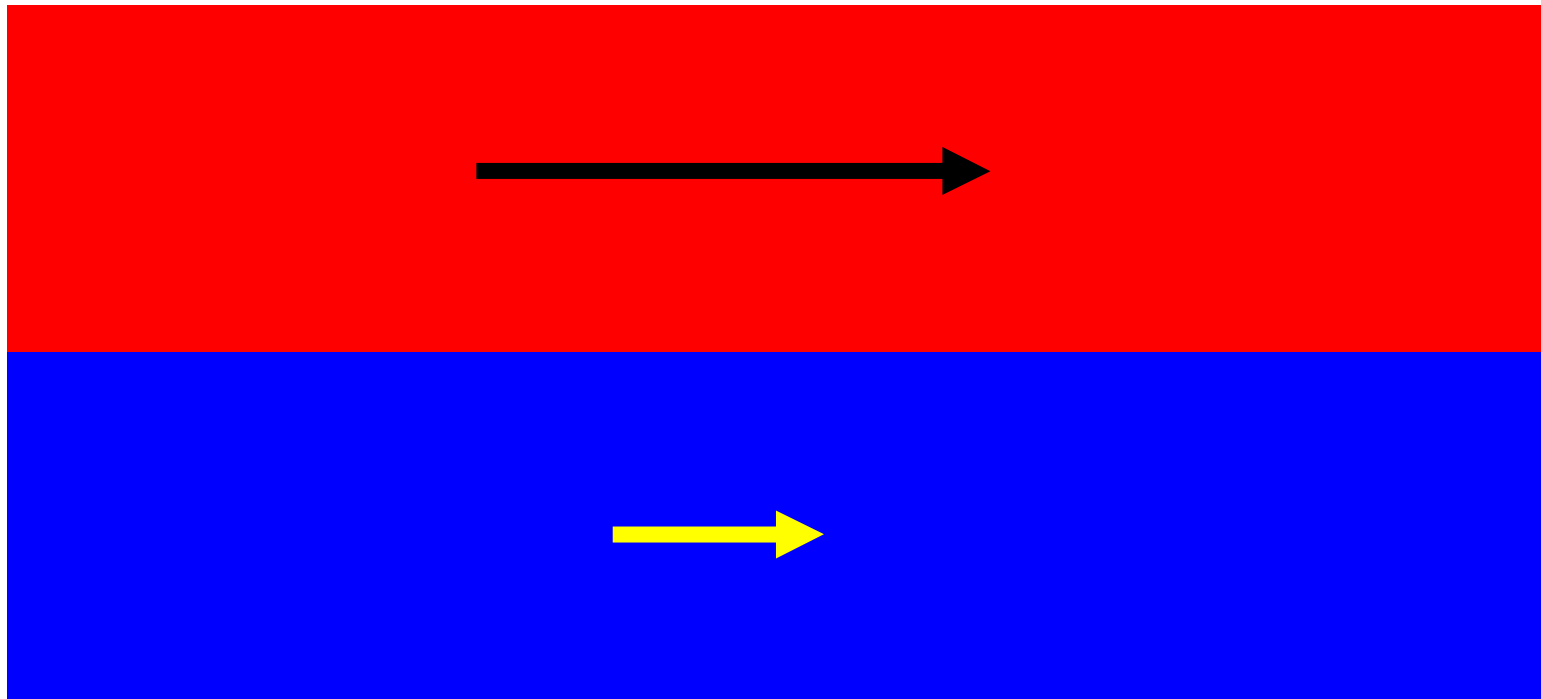


Малые возмущения нарастают со временем



Малые возмущения затухают

Сдвиговая неустойчивость



Волны Кельвина-Гельмгольца

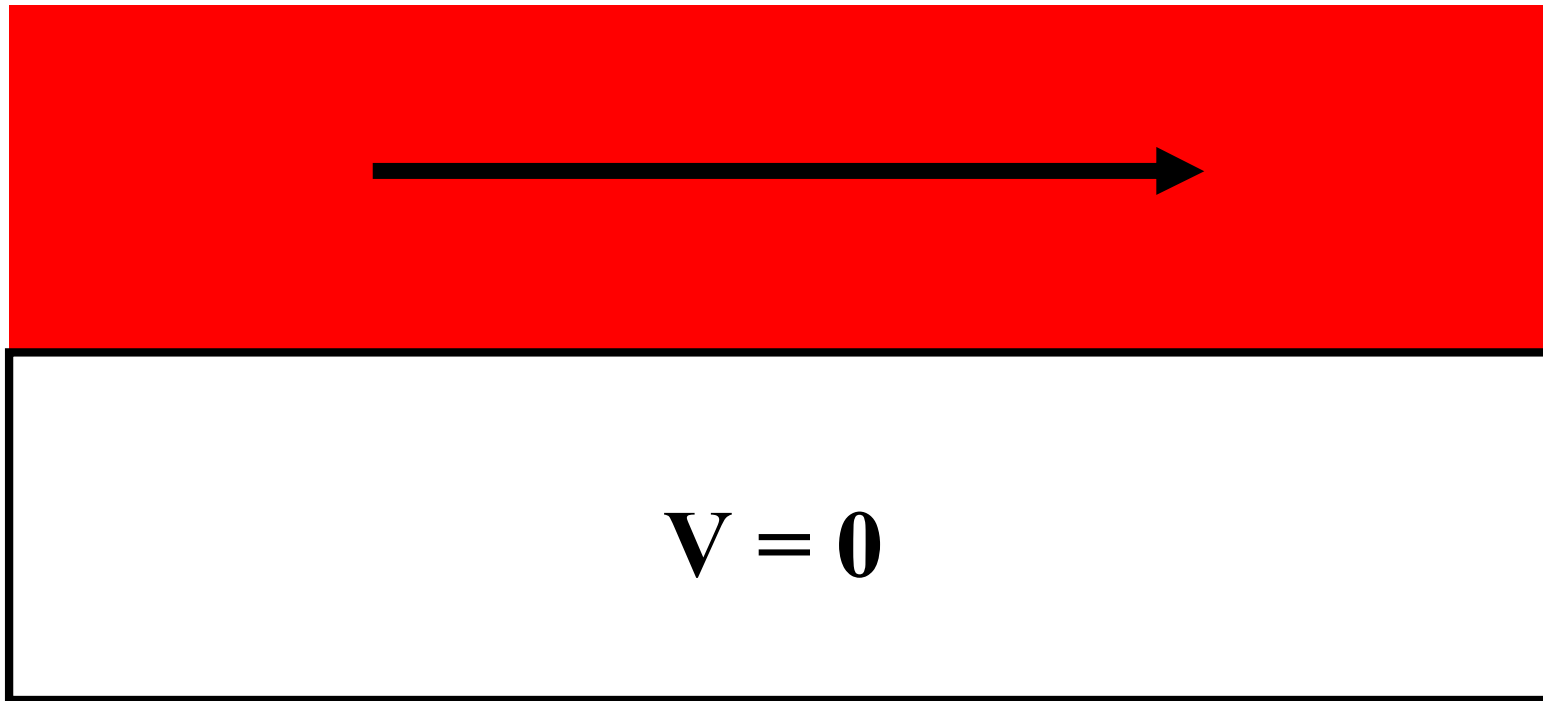


“Sunset at Rock Mountain Beach”

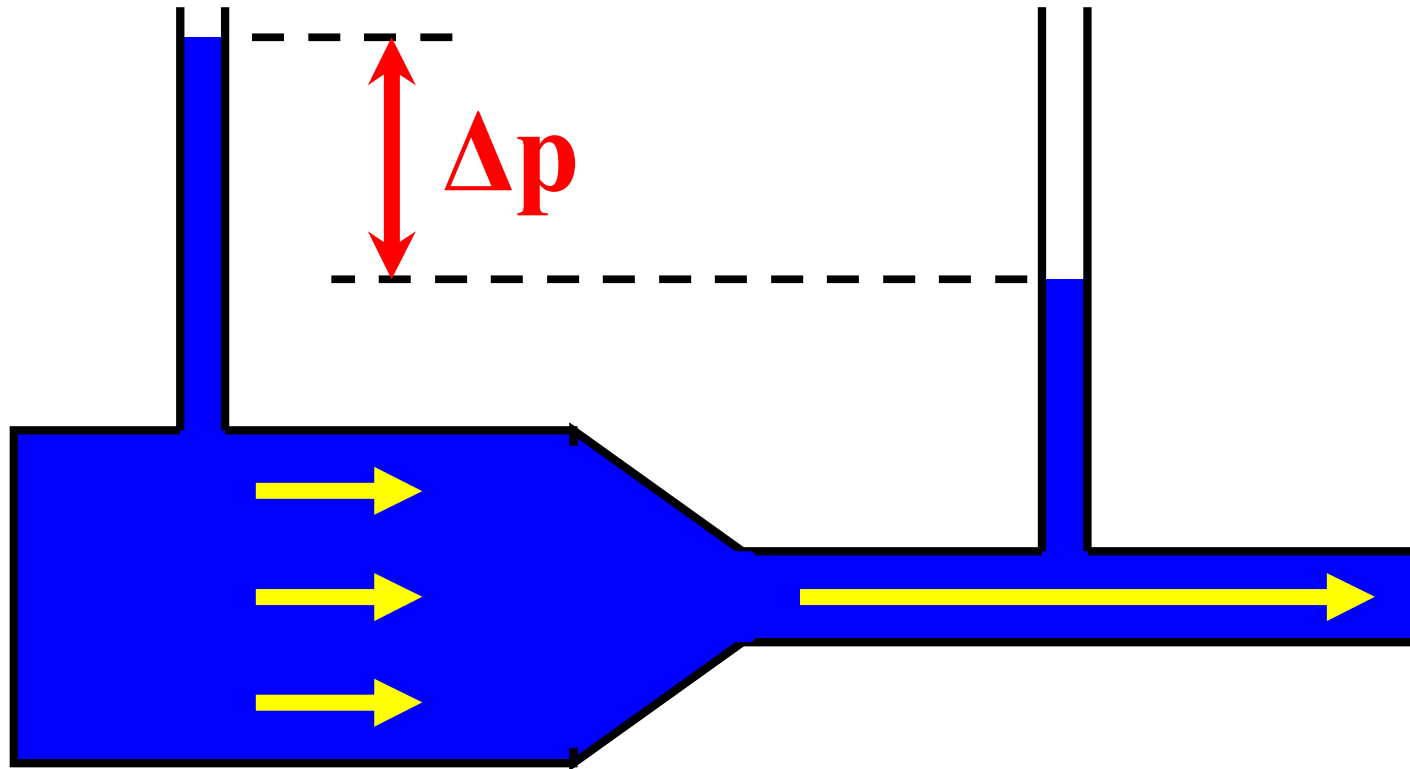
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO



Сдвиговая неустойчивость



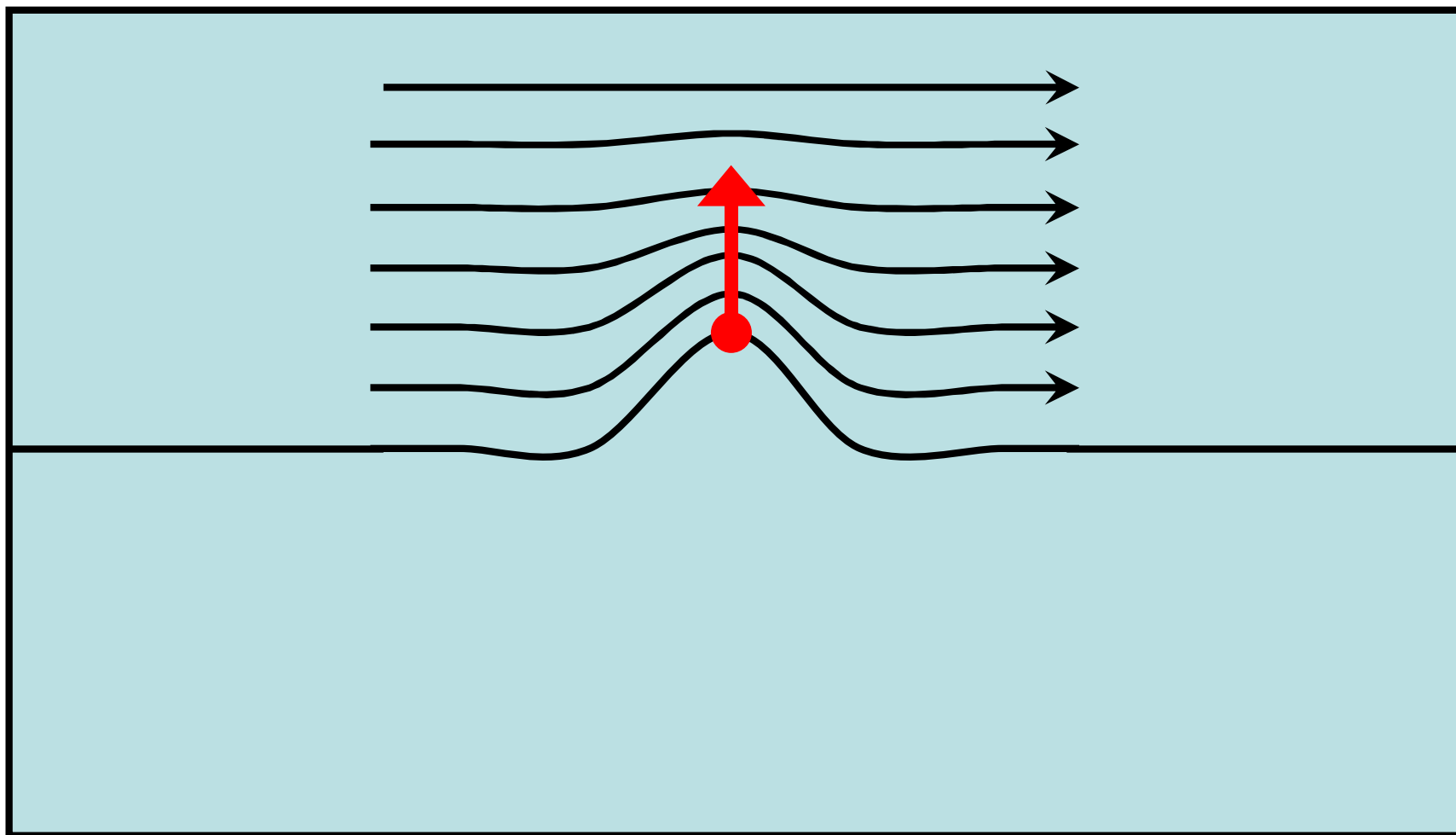
Парадокс гидромеханики



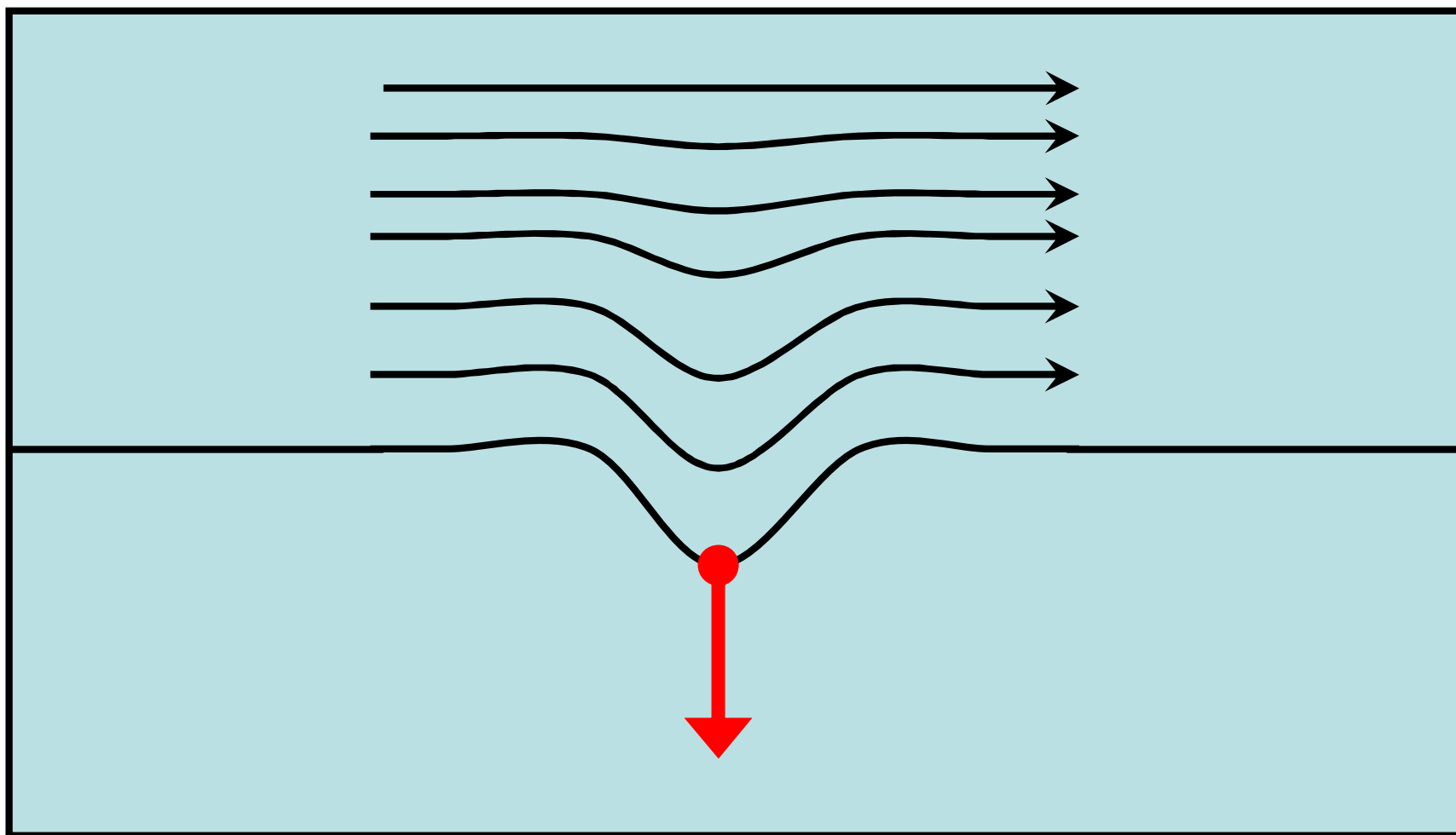
$$\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

уравнение Бернулли

Сдвиговая неустойчивость



Сдвиговая неустойчивость





Турбулентность

последняя нерешенная
проблема классической
физики!

течения

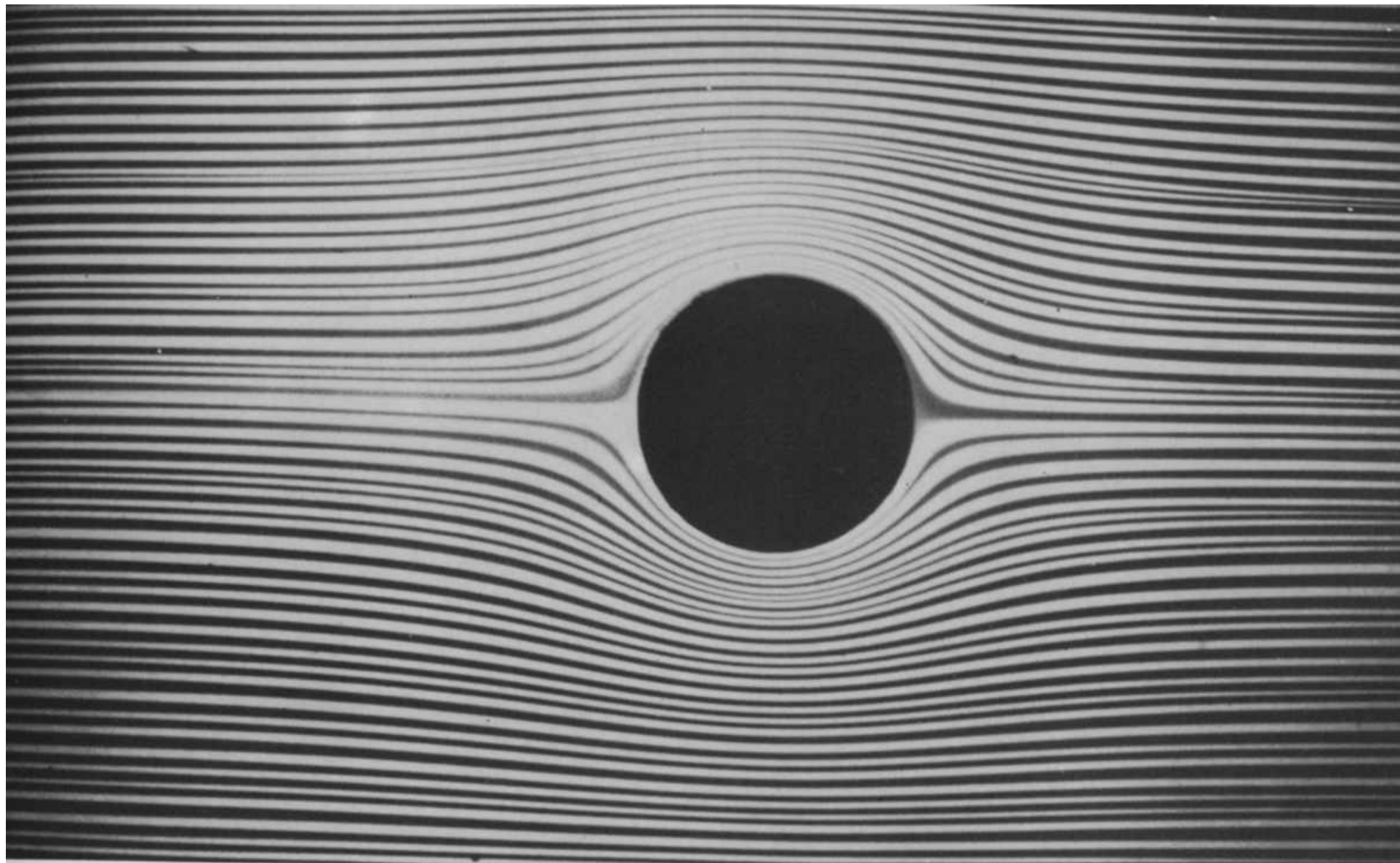
```
graph TD; A[течения] --> B[ламинарные]; A --> C[турбулентные];
```

ламинарные

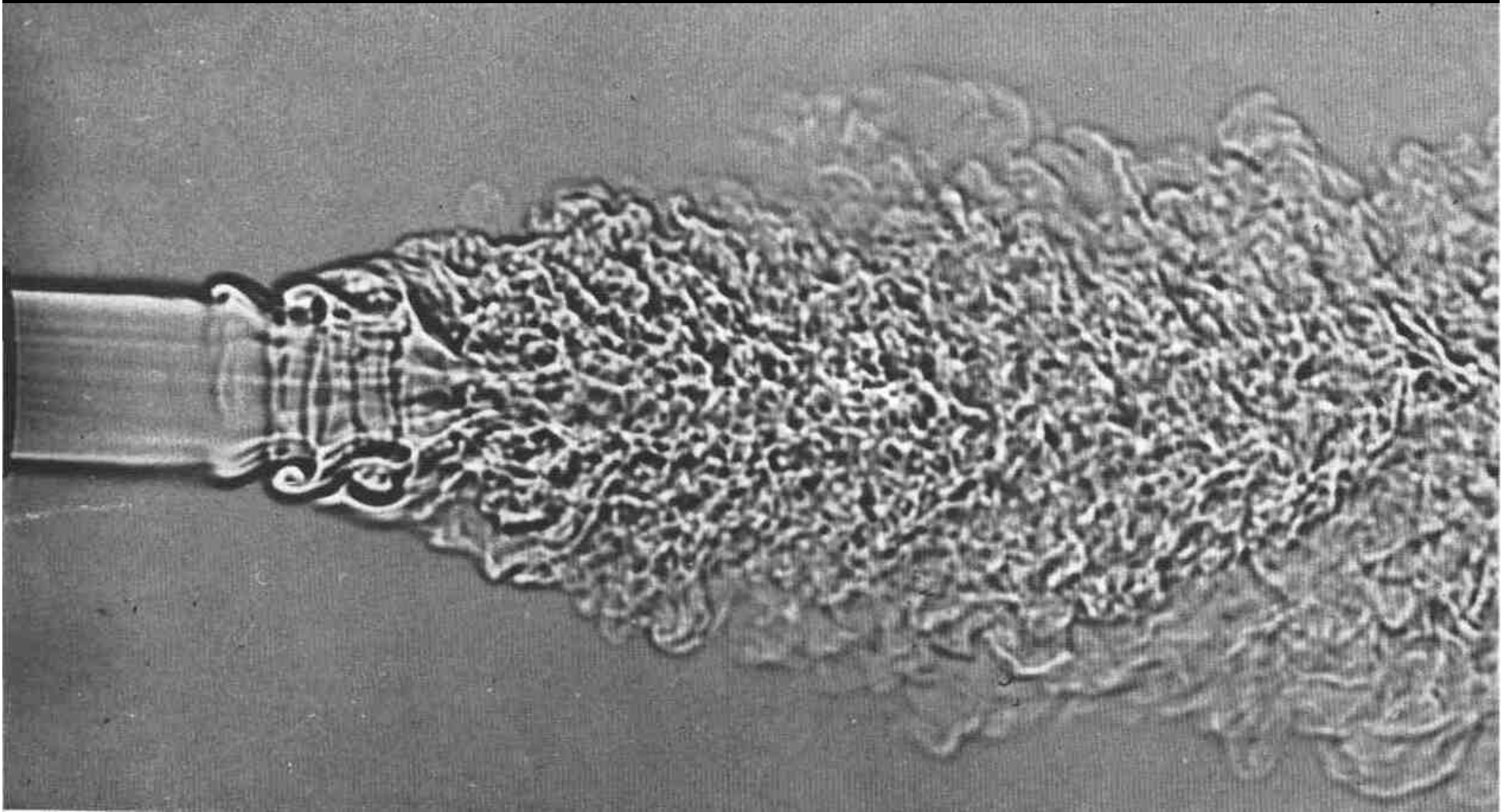
**спокойные и плавные
течения, меняющиеся
лишь в связи с
изменениями
действующих сил или
внешних условий**

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

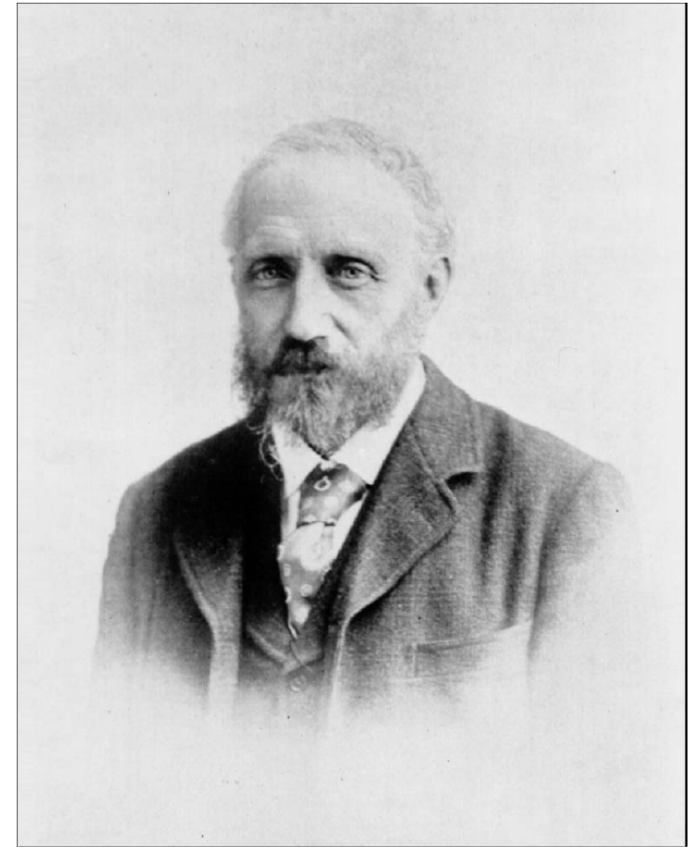
Турбулентность (от лат. *turbulentus* – беспорядочный) неупорядоченное во времени и пространстве поведение диссипативной среды (или поля), детали которого не могут быть воспроизведены на больших интервалах времени при сколь угодно точном задании начальных и граничных условий.

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).

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

Reynolds' experiment, described in his paper published in 1883

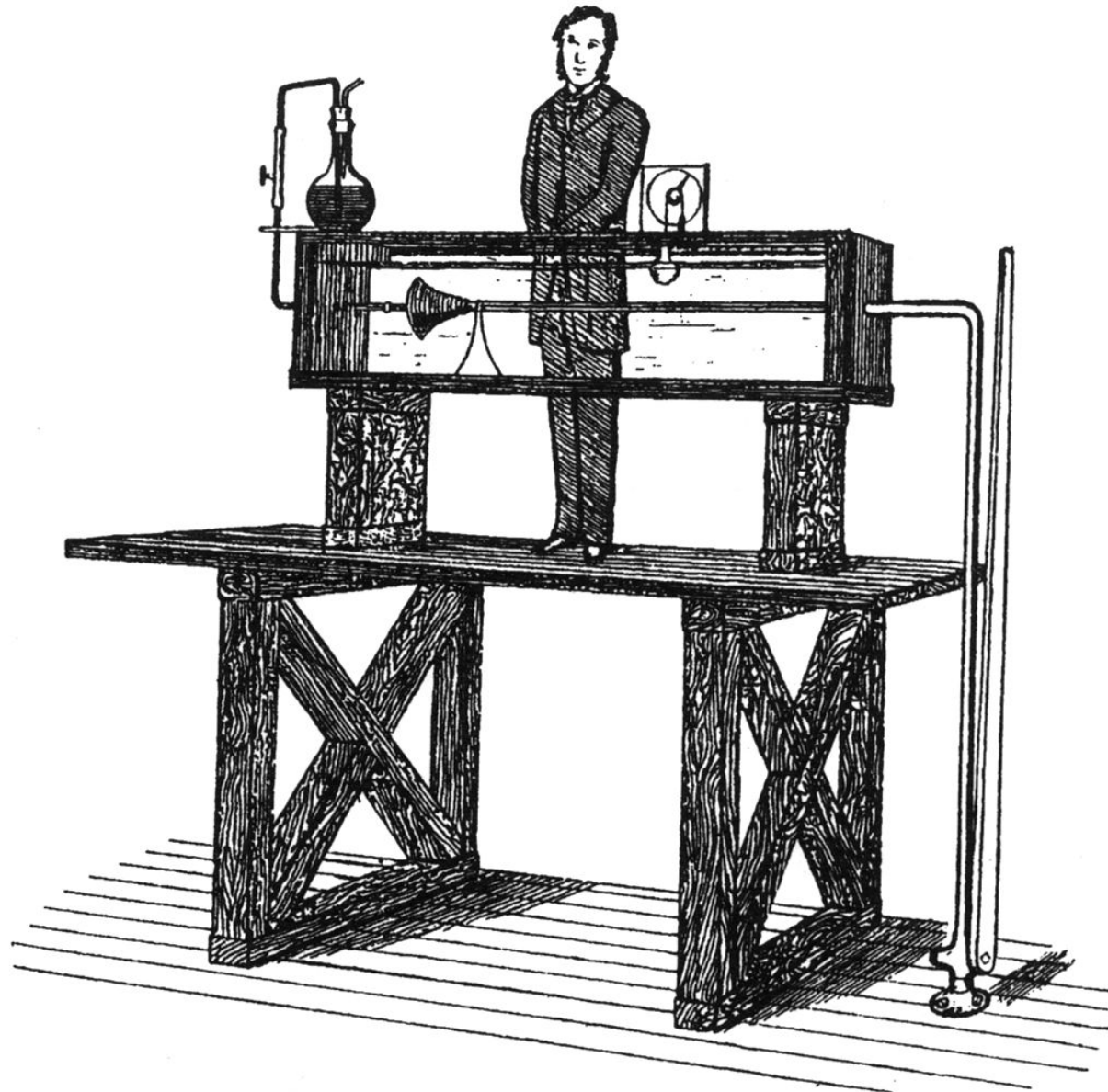
Reynolds O. 1883. *An experimental investigation of the circumstances which determine whether the motion of water in parallel channels shall be direct or sinuous and of the law of resistance in parallel channels.* Philos. Trans. R. Soc. 174:935–82



Professor Osborne Reynolds (Copyright, The University of Manchester)

**Osborne Reynolds
(1842 – 1912)**

**Reynolds' experiment, described in his paper
published in 1883**



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

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

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

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

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