

Введение в физику гидросферы

2025 Лекция №5

Носов Михаил Александрович

кафедра физики моря и вод суши

отделение геофизики

физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова

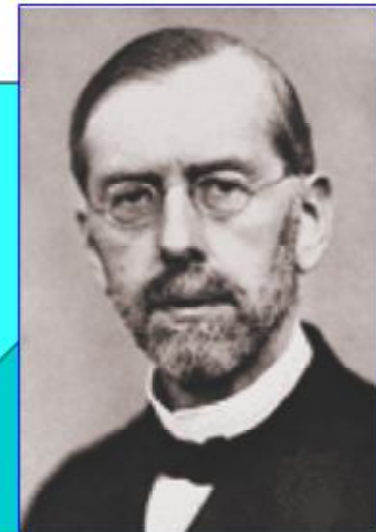
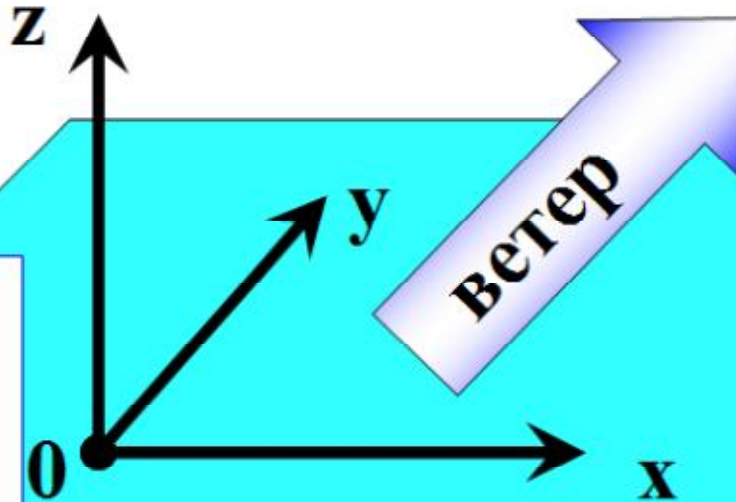


Задача Экмана о дрейфовом течении

течение, вызываемое ветром



Fridtjof Wedel-Jarlsberg Nansen
(1861 –1930)
Norwegian scientist



Vagn Walfrid Ekman
(1874-1954), a
Swedish physical
oceanographer

Задача поставлена *Фритъофом Нансеном*, который наблюдал необычный дрейф льда во время экспедиции на борту «Фрама» в Гренландском море

Предположения:

$$\frac{\partial}{\partial t} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial x} = 0, \quad \frac{\partial}{\partial y} = 0, \quad \rho = \text{const}$$

$$\cancel{\frac{\partial \rho}{\partial t}} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0 \quad \Rightarrow \quad \text{div } \vec{v} = 0$$

$$\cancel{\frac{\partial u}{\partial x}} + \cancel{\frac{\partial v}{\partial y}} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \Rightarrow w = \text{const}$$

$$w(z = -H) = 0 \quad \Rightarrow \quad w = 0$$

$$\cancel{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + \cancel{(\vec{v} \cdot \nabla) \vec{v}} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$x: \quad u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z}$$

$$y: \quad u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z}$$

$$z: \quad u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\cancel{\frac{\partial \vec{v}}{\partial t}} + (\cancel{\vec{v} \cdot \nabla}) \vec{v} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}] + \nu \Delta \vec{v} + \vec{g}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \cancel{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x}} + 2\nu\omega \sin \varphi + \nu \left(\cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0, \\ \cancel{-\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y}} - 2u\omega \sin \varphi + \nu \left(\cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}} + \cancel{\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0, \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0 \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} 2\mathbf{v}\omega \sin \varphi + \mathbf{v} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{u}}{\partial \mathbf{z}^2} \right) = 0 \\ -2\mathbf{u}\omega \sin \varphi + \mathbf{v} \left(\frac{\partial^2 \mathbf{v}}{\partial \mathbf{z}^2} \right) = 0 \\ -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{z}} - \mathbf{g} = 0 \end{array} \right. \Rightarrow \mathbf{p}(\mathbf{z}) = \mathbf{p}_{\text{atm}} - \rho \mathbf{g} \mathbf{z}$$

Граничные условия

Поверхность воды:

$$\rho \nu \frac{du}{dz} \Big|_{z=0} = 0$$

$$\rho \nu \frac{dv}{dz} \Big|_{z=0} = \tau$$

Поведение решения
на глубине:

$$u_{z \rightarrow -\infty} = 0$$

$$v_{z \rightarrow -\infty} = 0$$

Напряжение
трения ветра

Задача Экмана для океана бесконечной глубины

$$\begin{cases} u'' + v \cdot f / \nu = 0 \\ v'' - u \cdot f / \nu = 0 \end{cases}$$

Граничные условия:

поверхность ($z = 0$)

$$u' = 0$$

$$v' = \tau / \rho \nu$$

на глубине ($z = -\infty$)

$$u(-\infty) = 0$$

$$v(-\infty) = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} u'' + \frac{f}{v} v = 0 \\ v'' - \frac{f}{v} u = 0 \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} Z = u + i v \\ u = \operatorname{Re}(Z) \\ v = \operatorname{Im}(Z) \end{array}$$

$$u'' + i v'' + \frac{f}{v} (v - i u) = 0$$

$$(u + i v)'' - i \frac{f}{v} (u + i v) = 0$$

$$Z'' - \alpha^2 Z = 0, \quad \text{где} \quad \alpha = \sqrt{i \cdot f / v}$$

$$Z = A e^{\alpha z} + \cancel{B e^{-\alpha z}}$$

$$\sqrt{i} = e^{i\pi/4} = \frac{1+i}{\sqrt{2}}$$

$$i = e^{i\pi/2}$$

$$\alpha = (1+i) \sqrt{\frac{f}{2v}}$$

$$\operatorname{Re}(\alpha) > 0$$

$$\lim_{Z \rightarrow -\infty} Z = 0 \quad \Rightarrow \quad B = 0$$

$$Z = A e^{\alpha z}$$

$$\alpha = (1 + i) \sqrt{\frac{f}{2\nu}} = e^{i\pi/4} \sqrt{\frac{f}{\nu}}$$

удовлетворяем г.у. на поверхности (при $z = 0$)

$$Z' = A\alpha = u' + iv' = i \frac{\tau}{\rho\nu}$$

$$A = i \frac{\tau}{\rho\nu\alpha} = \frac{e^{i\pi/2} \tau}{\rho\nu e^{i\pi/4} \sqrt{\frac{f}{\nu}}} = \frac{e^{i\pi/4} \tau}{\rho\nu \sqrt{\frac{f}{\nu}}}$$

Решение задачи Экмана:

глубина Экмана

$$Z = \frac{e^{i\pi/4} \tau}{\rho \nu \sqrt{f / \nu}} e^{(1+i) \sqrt{\frac{f}{2\nu}} z}$$

$$d = \sqrt{2\nu / f}$$

$$V_0 = \frac{\tau d}{\sqrt{2} \rho \nu}$$

$$Z = V_0 e^{(1+i)\frac{z}{d} + i\frac{\pi}{4}} = V_0 e^{\frac{z}{d}} e^{i\left(\frac{z}{d} + \frac{\pi}{4}\right)}$$

$$u = \operatorname{Re}(Z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

$$v = \operatorname{Im}(Z) = V_0 e^{z/d} \sin(z/d + \pi/4)$$

Спираль Экмана

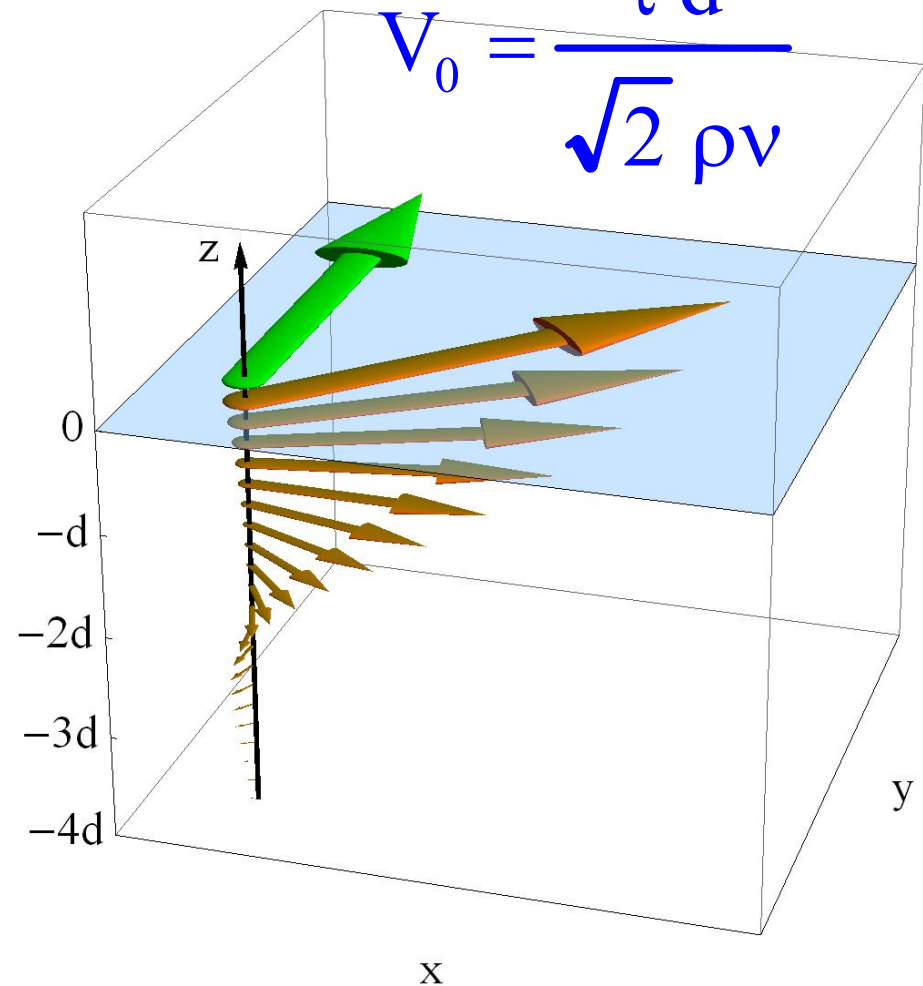
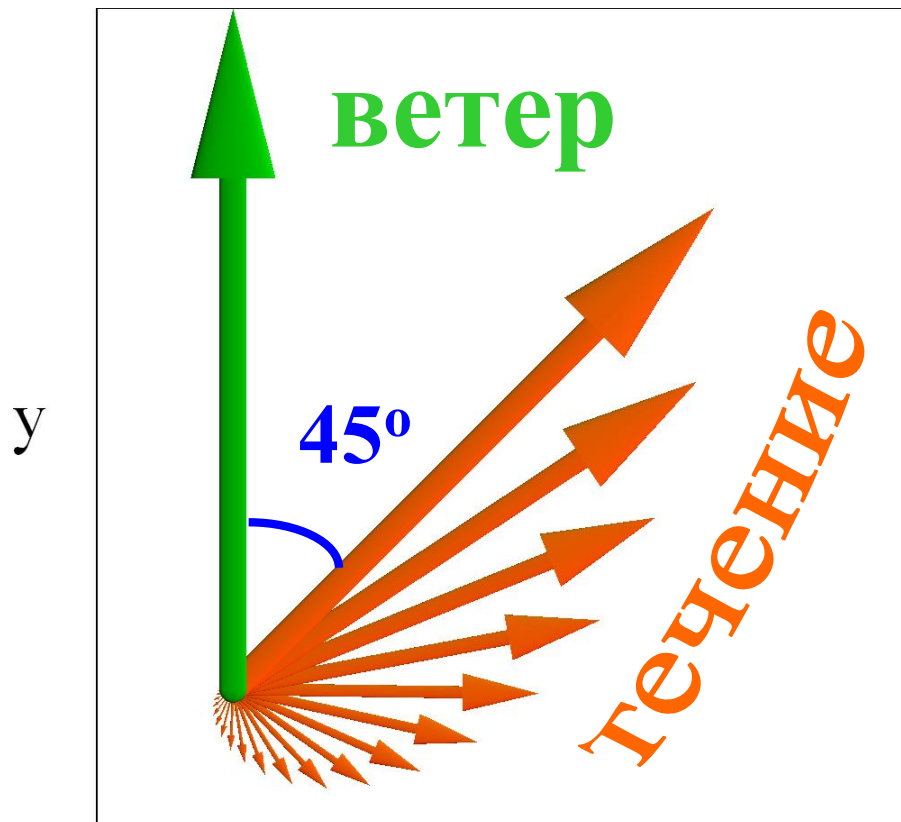
$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

$$v(z) = V_0 e^{z/d} \sin(z/d + \pi/4)$$

глубина Экмана

$$d = \sqrt{2\nu/f}$$

$$V_0 = \frac{\tau d}{\sqrt{2} \rho \nu}$$



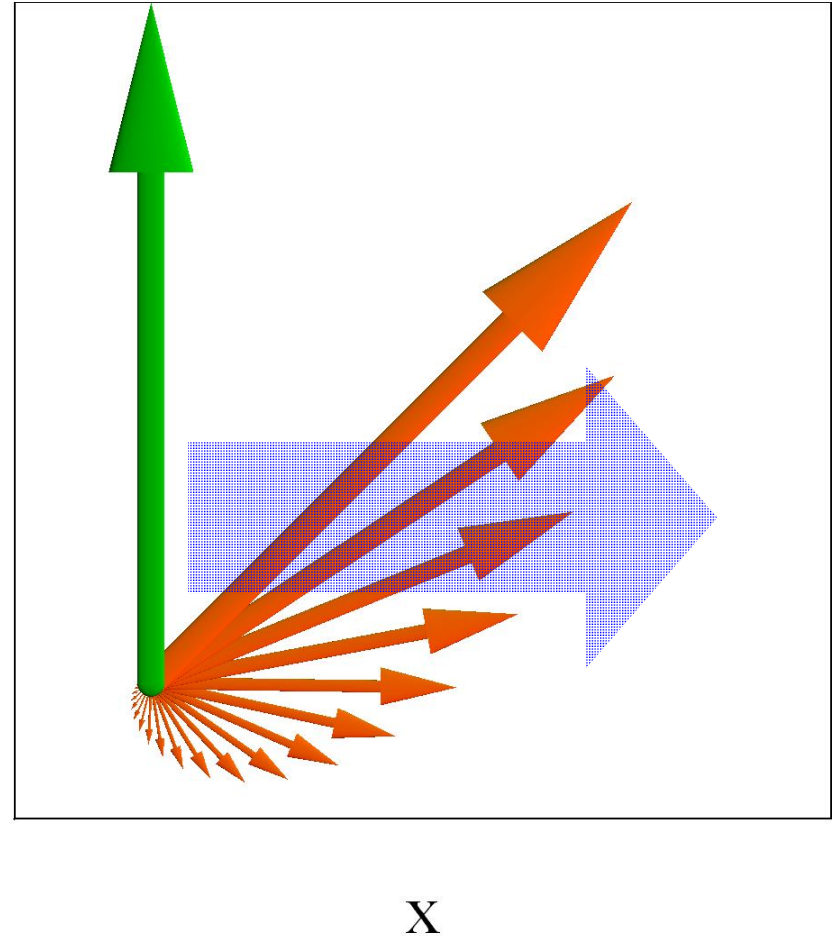
Направление интегрального переноса вод

$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

$$v(z) = V_0 e^{z/d} \sin(z/d + \pi/4)$$

$$\int_{-\infty}^0 u(z) dz = \frac{V_0 d}{\sqrt{2}} > 0 \quad y$$

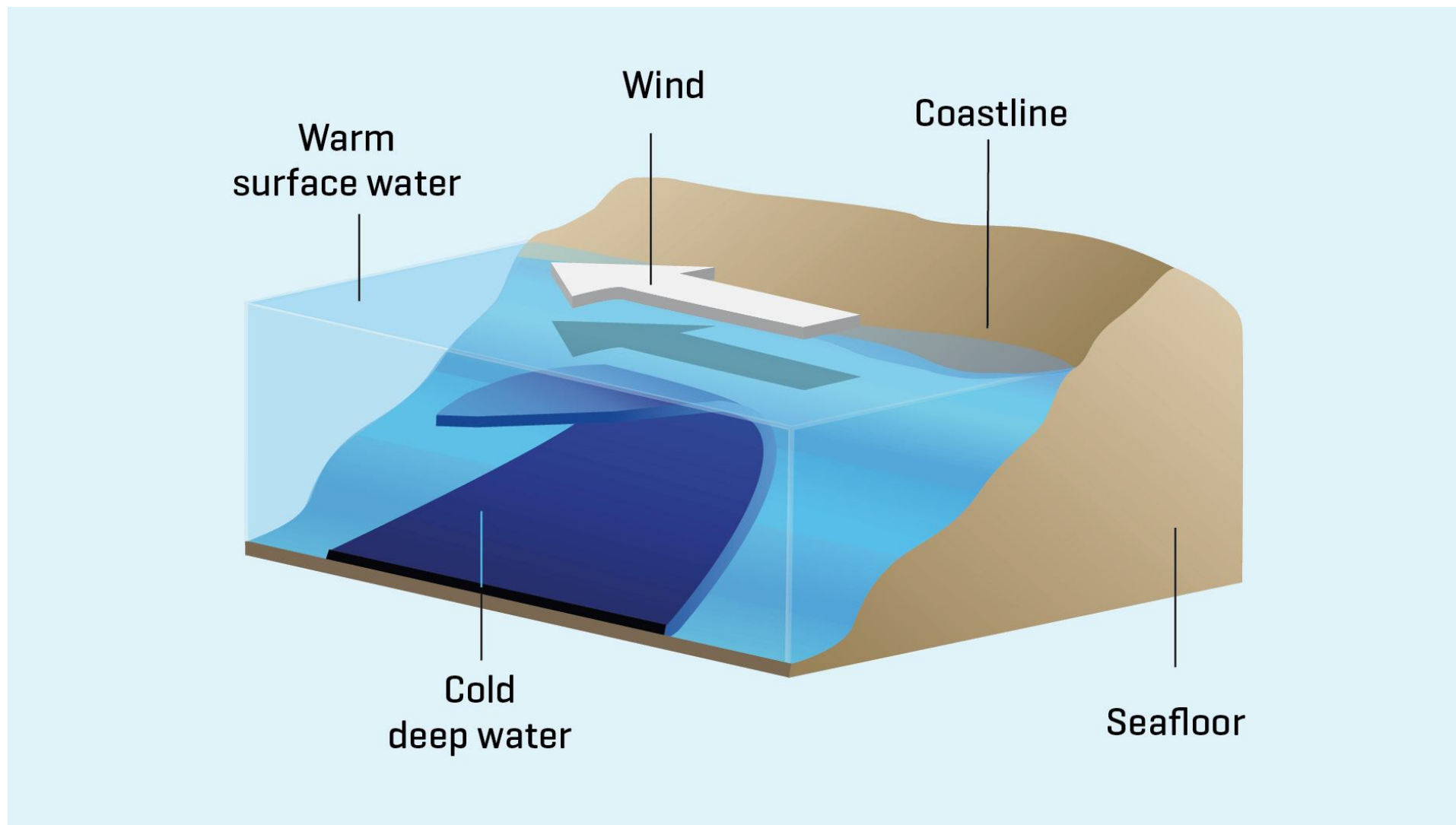
$$\int_{-\infty}^0 v(z) dz = 0$$



**Интегральный перенос вод
перпендикулярен направлению ветра!!!**

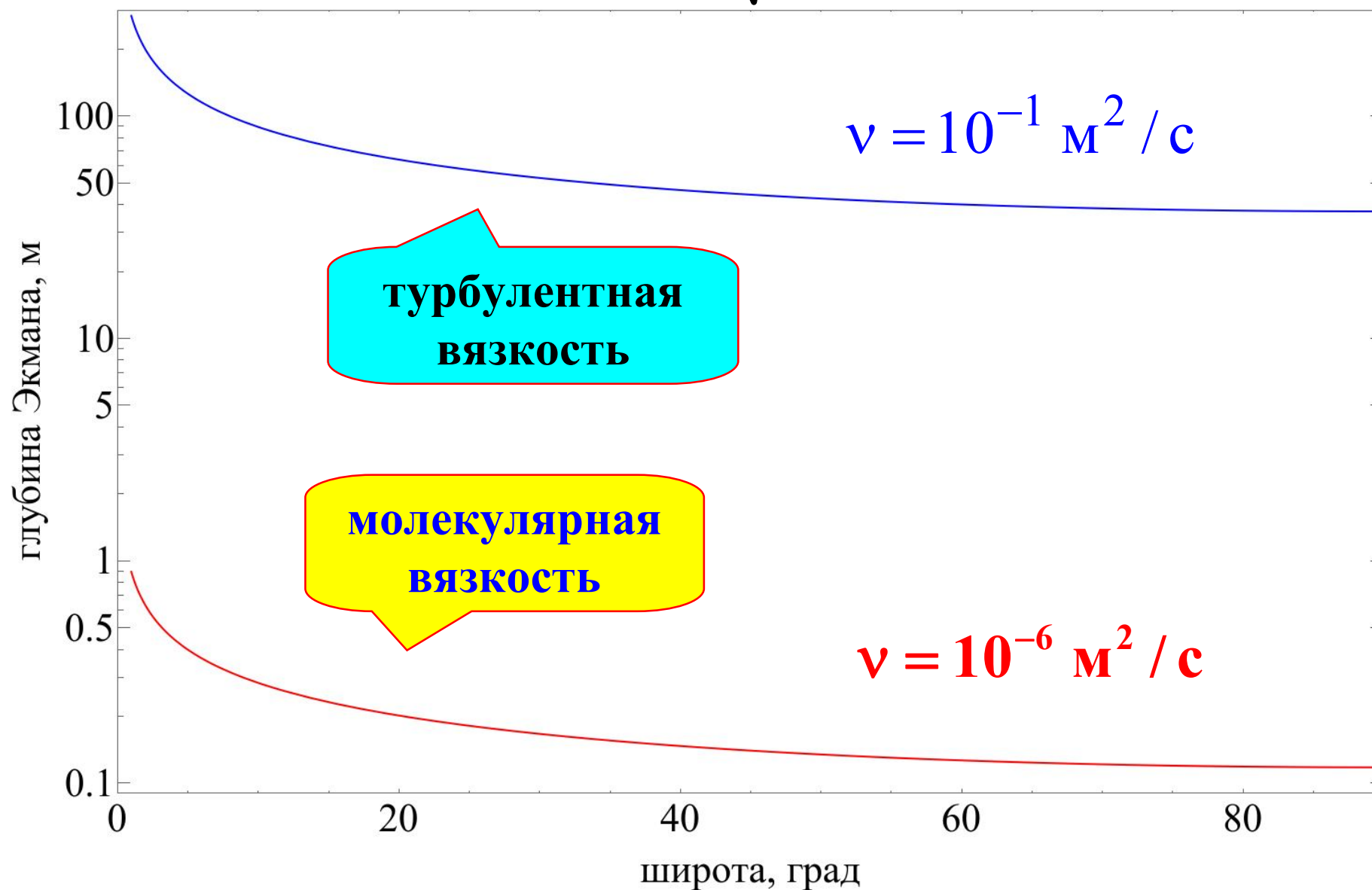
Береговой апвеллинг (coastal upwelling)

южное полушарие



Глубина Экмана

$$d = \sqrt{2\nu / f} = \sqrt{\nu / \omega \sin(\varphi)}$$



Оценка скорости дрейфового течения

$$V_0 = \frac{\tau d}{\sqrt{2} \rho v} \approx 0.1 \text{ м / с} \quad d = \sqrt{\frac{2\nu}{f}}$$

Напряжения трения ветра, действующее на поверхность океана

$$\vec{\tau} = C \rho_{\text{атм}} |\vec{U}| \vec{U}, \quad C \approx 0.0025$$

$$\rho_{\text{атм}} \approx 1.29 \text{ кг / м}^3$$

$$\rho \approx 1000 \text{ кг / м}^3$$

$$|\vec{U}| = 10 \text{ м / с}$$

$$\nu = 0.1 \text{ м}^2 / \text{с}$$

$$f = 10^{-4} \text{ с}^{-1}$$

Задача Экмана для океана конечной глубины

$$\begin{cases} u'' + v \cdot f / \nu = 0 \\ v'' - u \cdot f / \nu = 0 \end{cases}$$

Граничные условия:

поверхность ($z = 0$)

$$u' = 0$$

$$v' = \tau / \rho \nu$$

дно ($z = -H$)

$$u(-H) = 0$$

$$v(-H) = 0$$

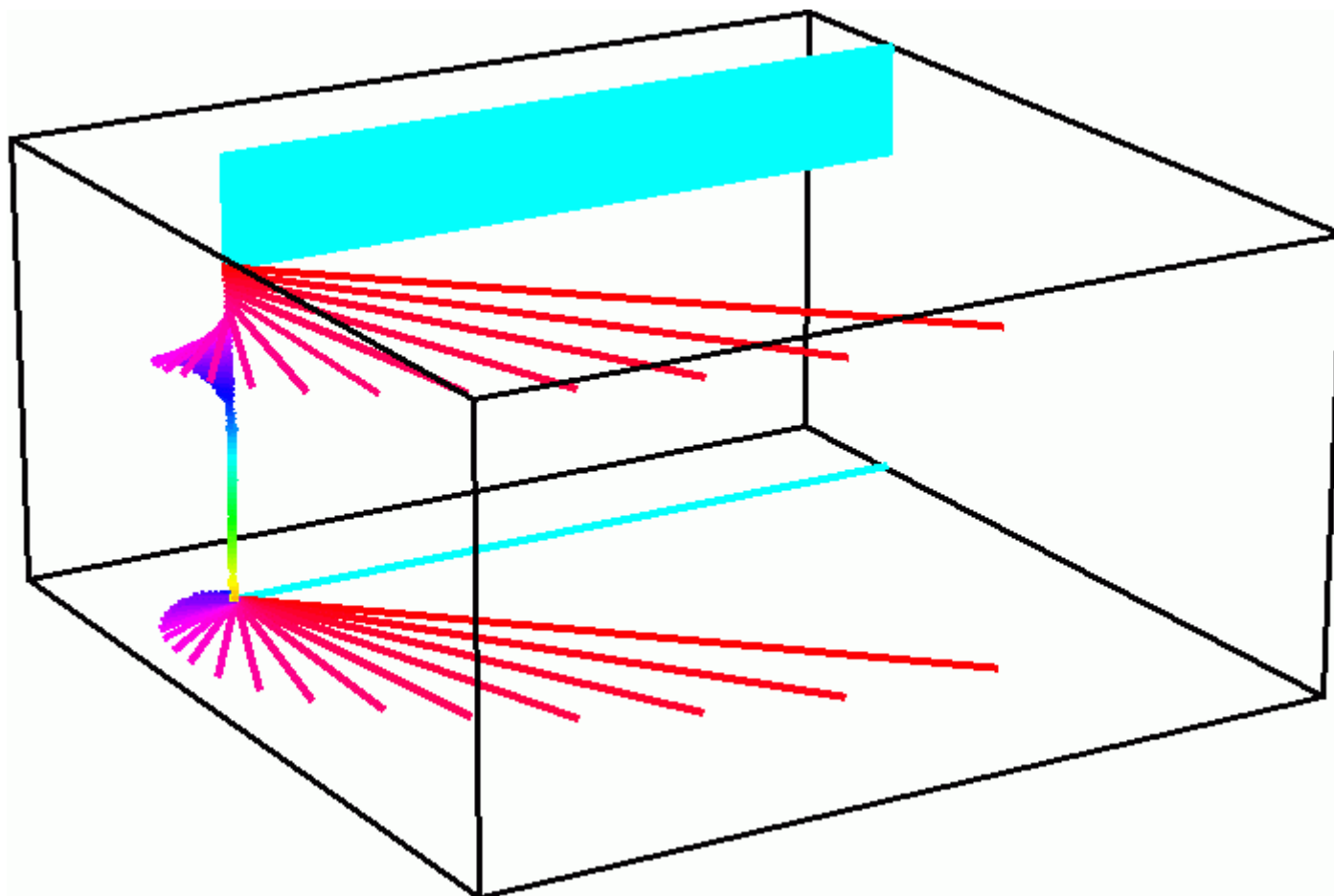
условие
прилипания

$$Z'' - \alpha^2 Z = 0, \quad \text{где} \quad \alpha = \sqrt{i \cdot f / v}$$

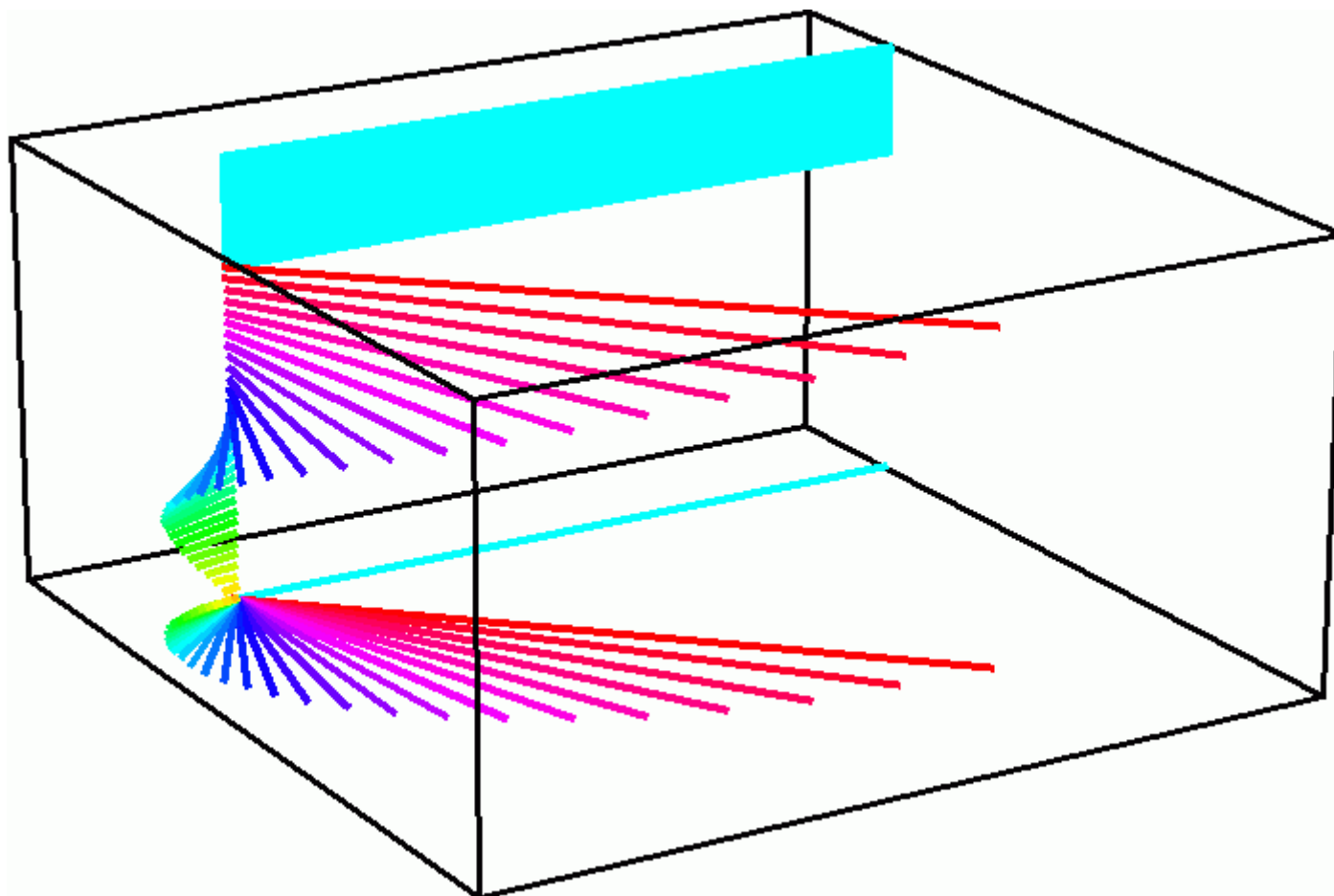
$$Z = A e^{\alpha z} + B e^{-\alpha z}$$

$$A \neq 0 \quad B \neq 0$$

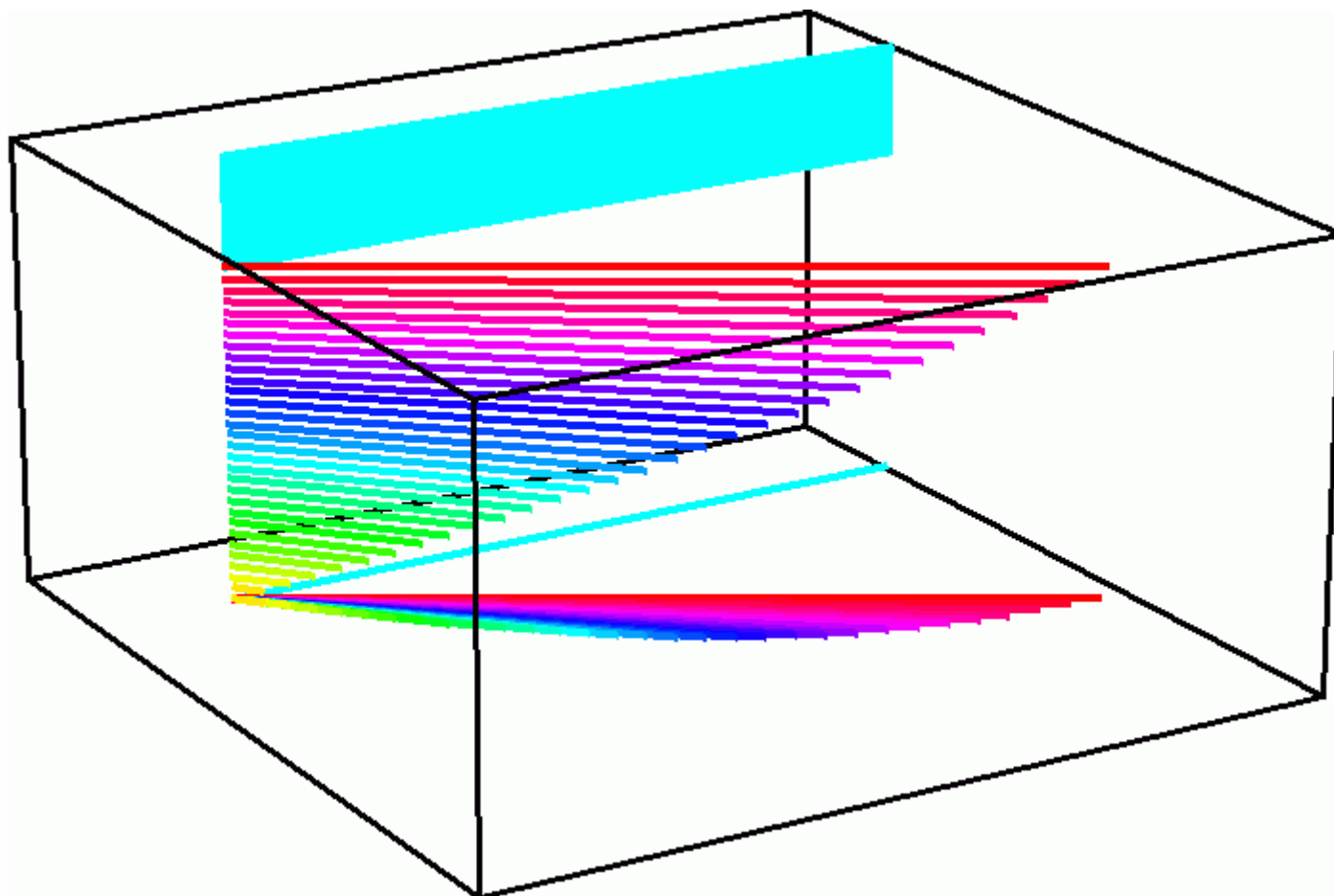
$$H=10d$$



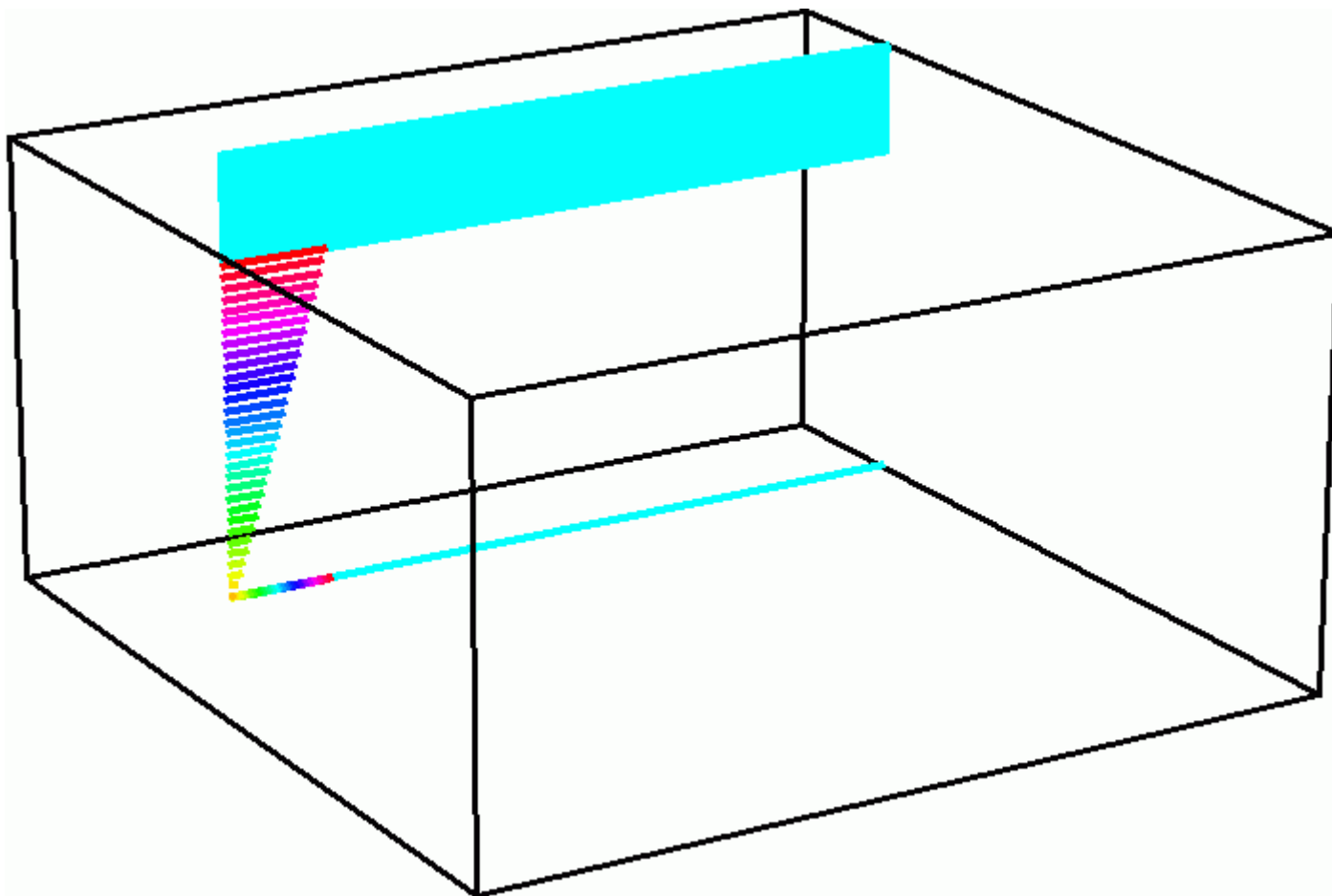
$$H=3d$$



$$H=d$$

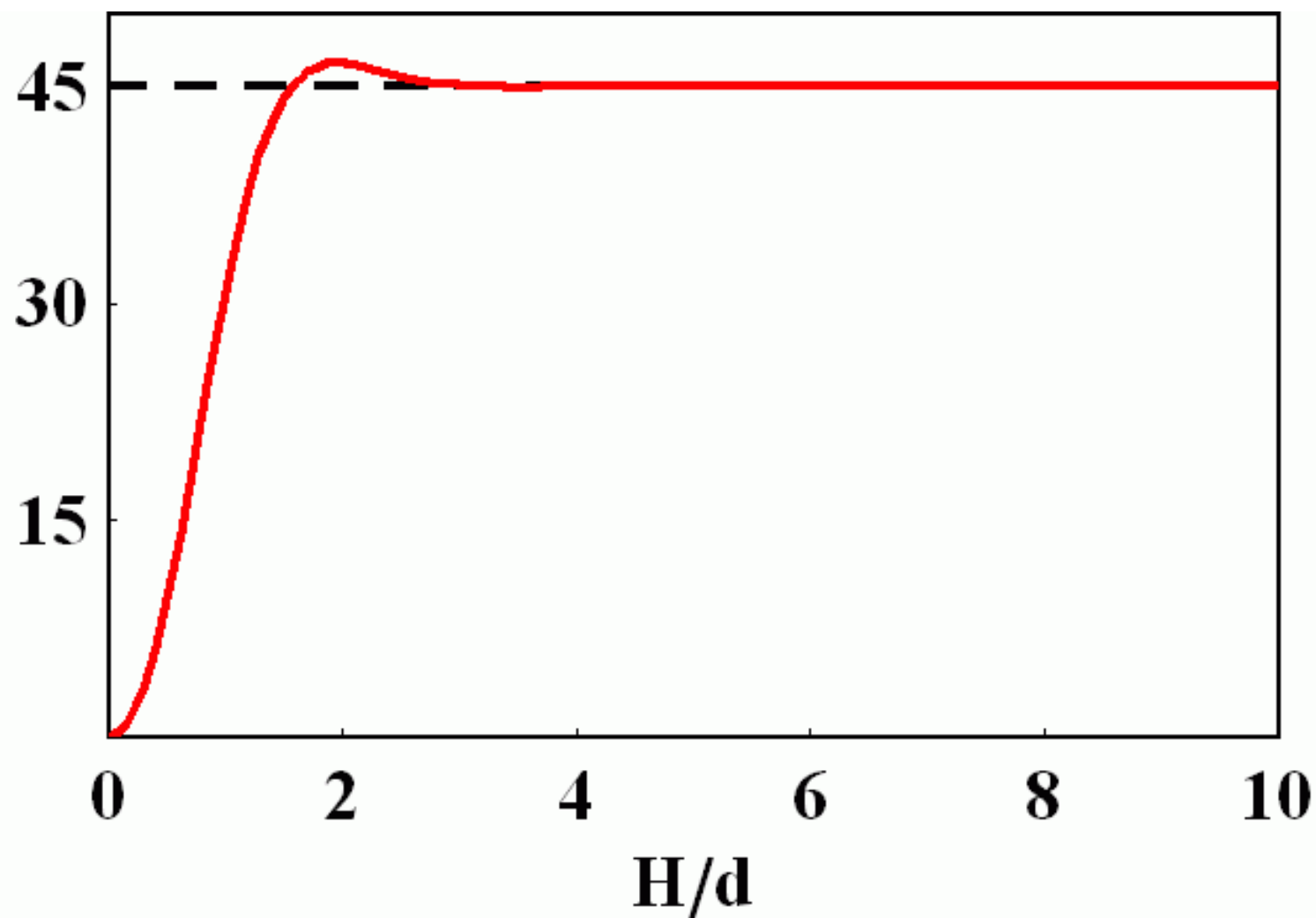


$$H=d/10$$

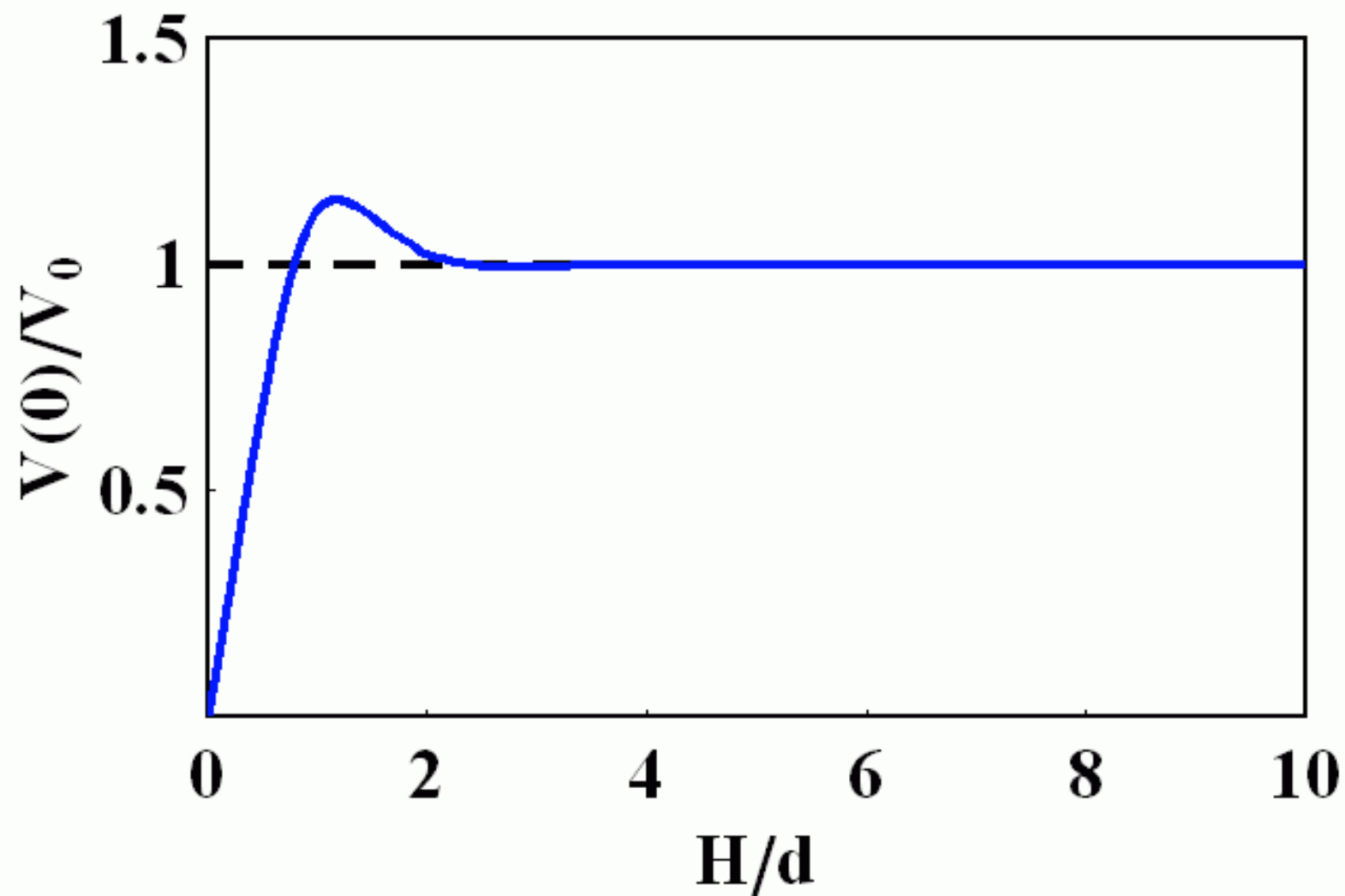


Течение на поверхности

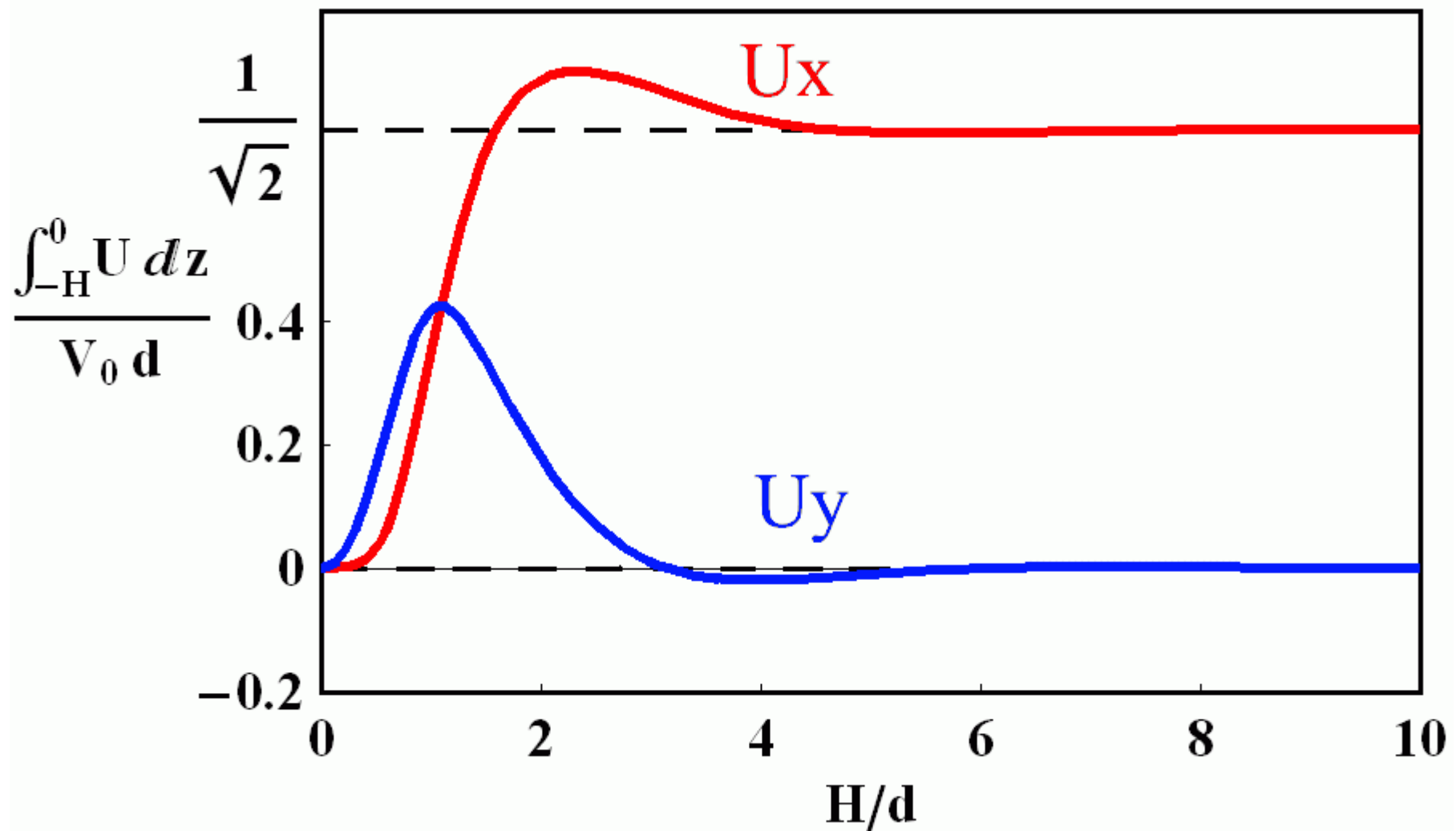
угол «течение-ветер»



Течение на поверхности



Влияние глубины океана на интегральный перенос



Придонный слой Экмана

Рассмотрим стационарное течение, вызываемое градиентом давления (наклоном свободной поверхности) во **вращающемся вязком** океане.

$$fv + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial x} = 0$$

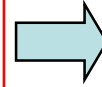
$$-fu + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial y} = 0$$

Предположим:

$$\frac{\partial \xi}{\partial x} = \text{const} \neq 0$$

$$\frac{\partial \xi}{\partial y} = 0$$

$$\begin{aligned}
 f v + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial x} &= 0 \\
 -f u + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) - g \frac{\partial \xi}{\partial y} &= 0
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 u'' + \frac{f}{v} v - \frac{g}{v} \frac{\partial \xi}{\partial x} &= 0 \\
 v'' - \frac{f}{v} u &= 0
 \end{aligned}$$

Граничные условия:

свободная поверхность

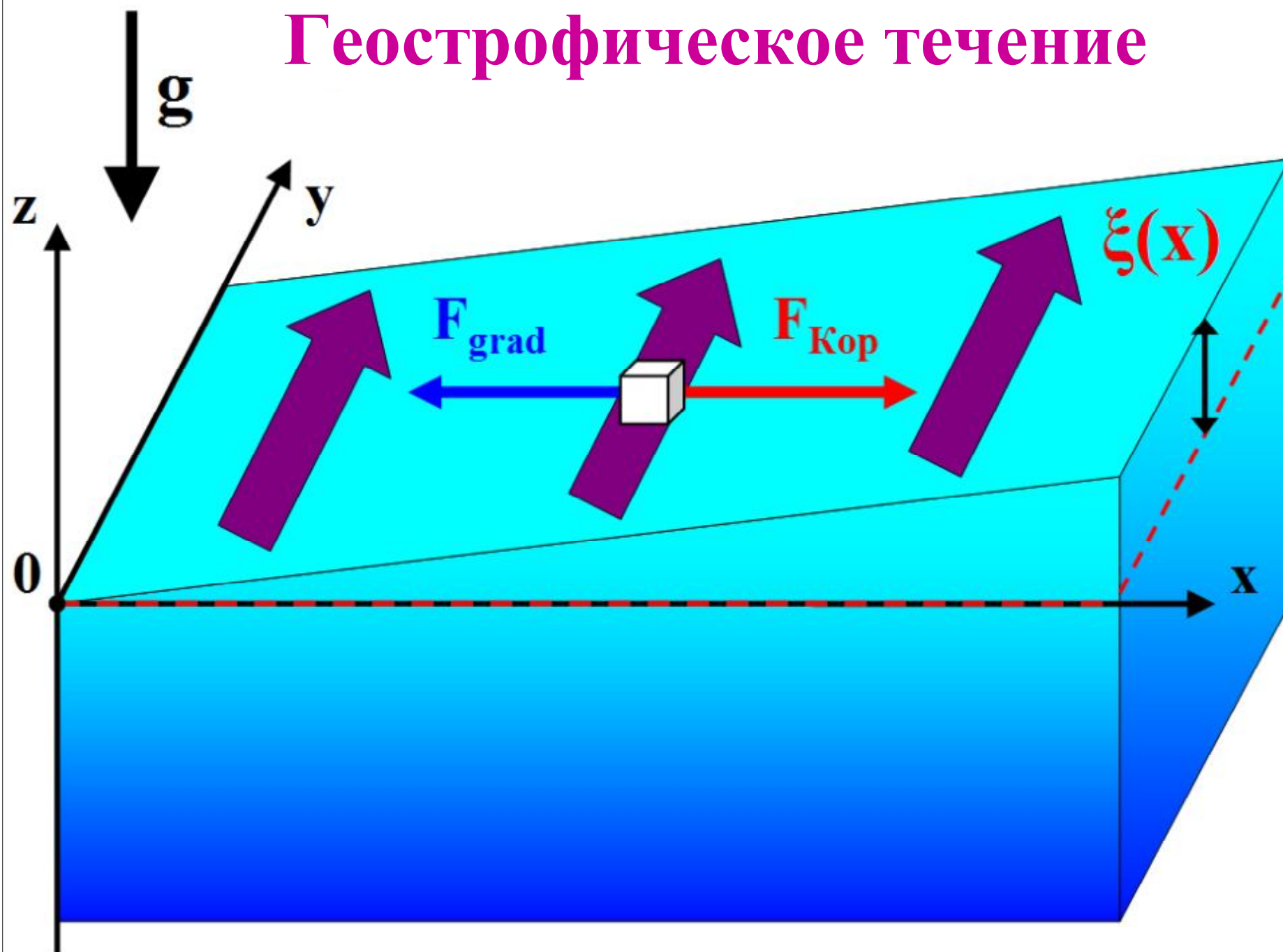
$$z = 0 : \quad \begin{cases} u' = 0 \\ v' = 0 \end{cases}$$

дно

$$z = -H : \quad \begin{cases} u = 0 \\ v = 0 \end{cases}$$

Задача имеет аналитическое решение: $u(z)$, $v(z)$

Геоострофическое течение



Геострофическое течение

**без учета
вязкого трения**

$$x : -g \frac{\partial \xi}{\partial x} + f v = 0$$

$$y : -g \frac{\partial \xi}{\partial y} - f u = 0$$

$$\xi = \xi(x)$$

$$x : u = 0$$

$$y : v = \frac{g}{f} \frac{\partial \xi}{\partial x}$$

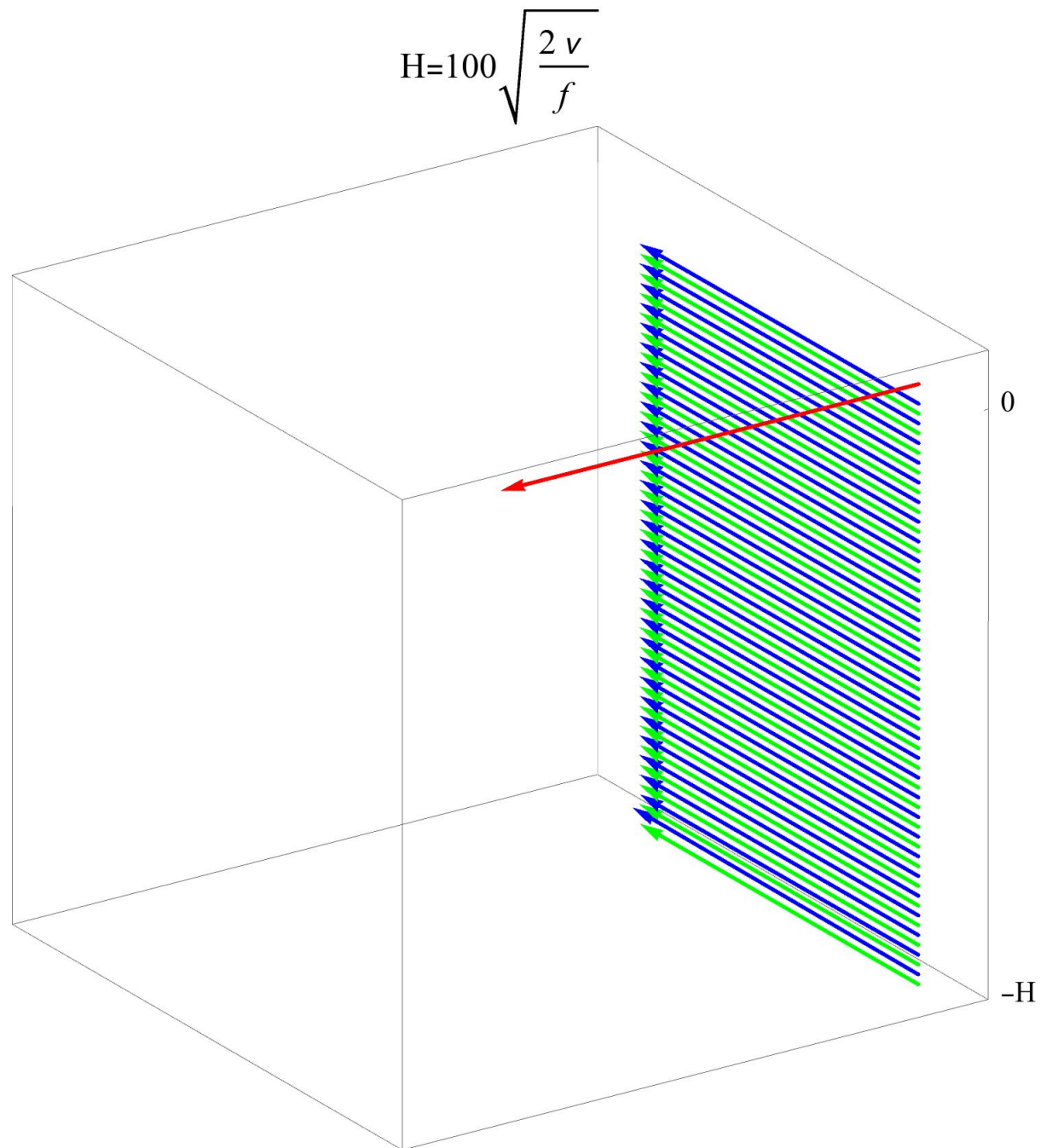
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



вблизи дна!

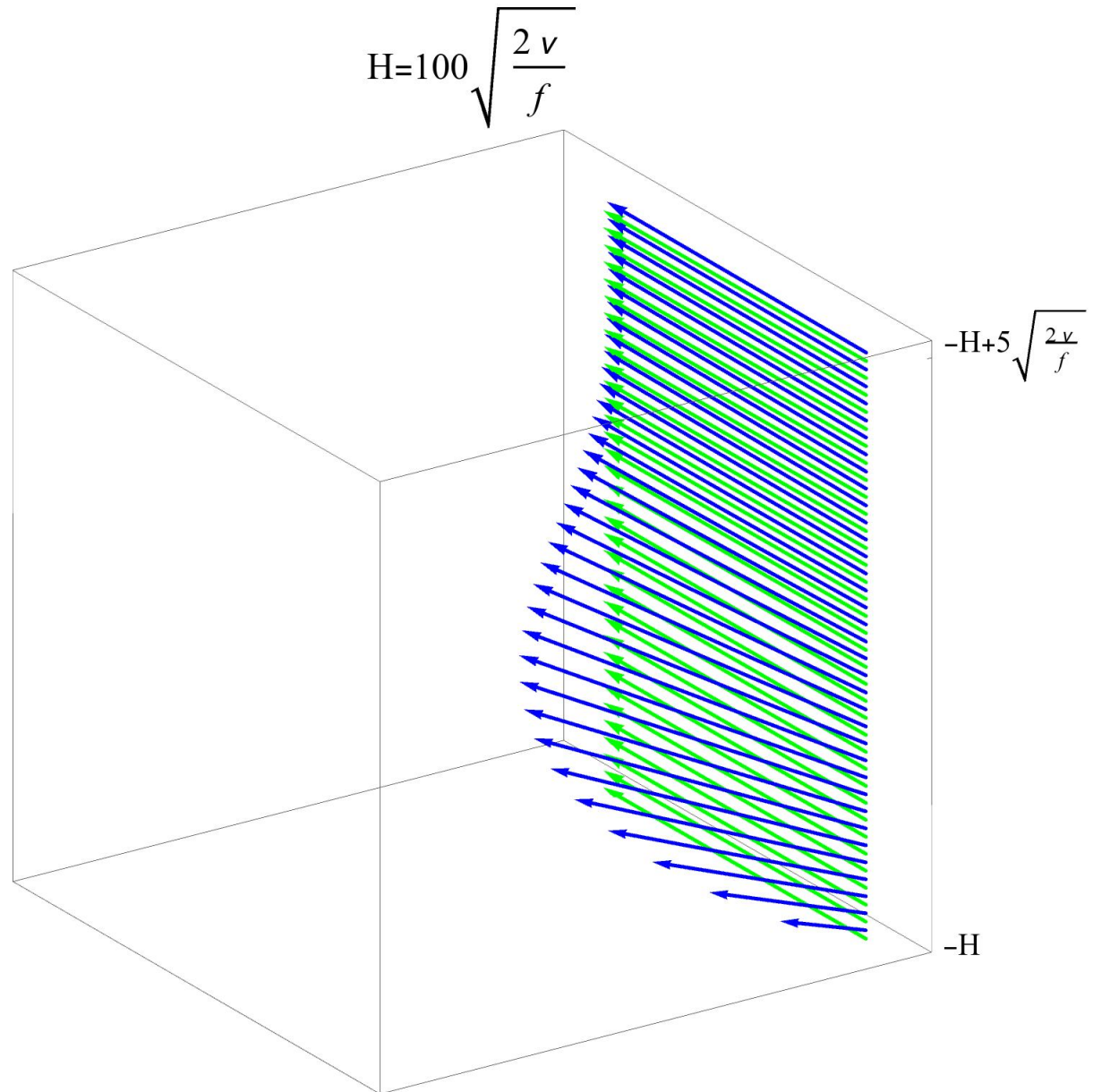
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



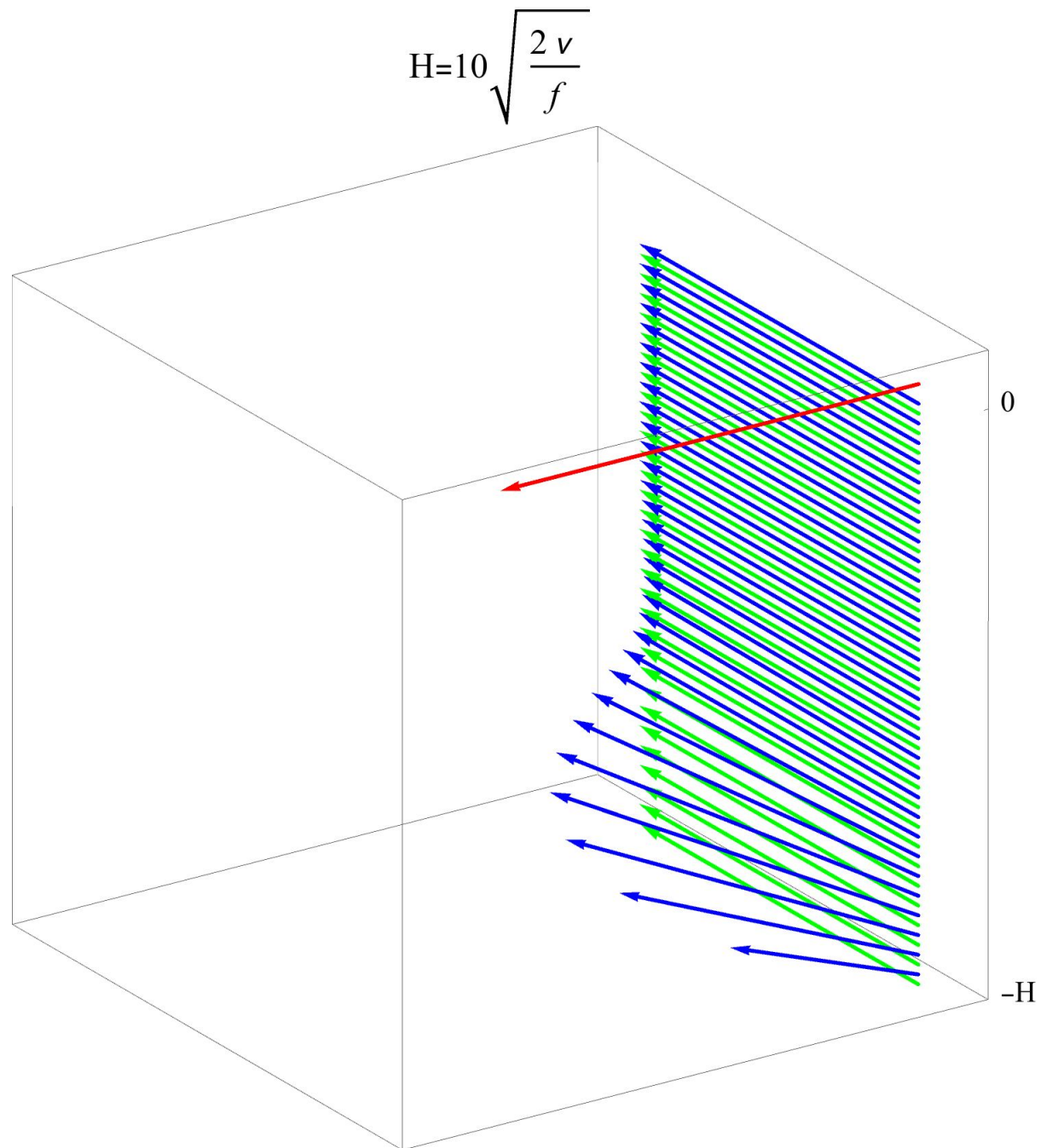
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



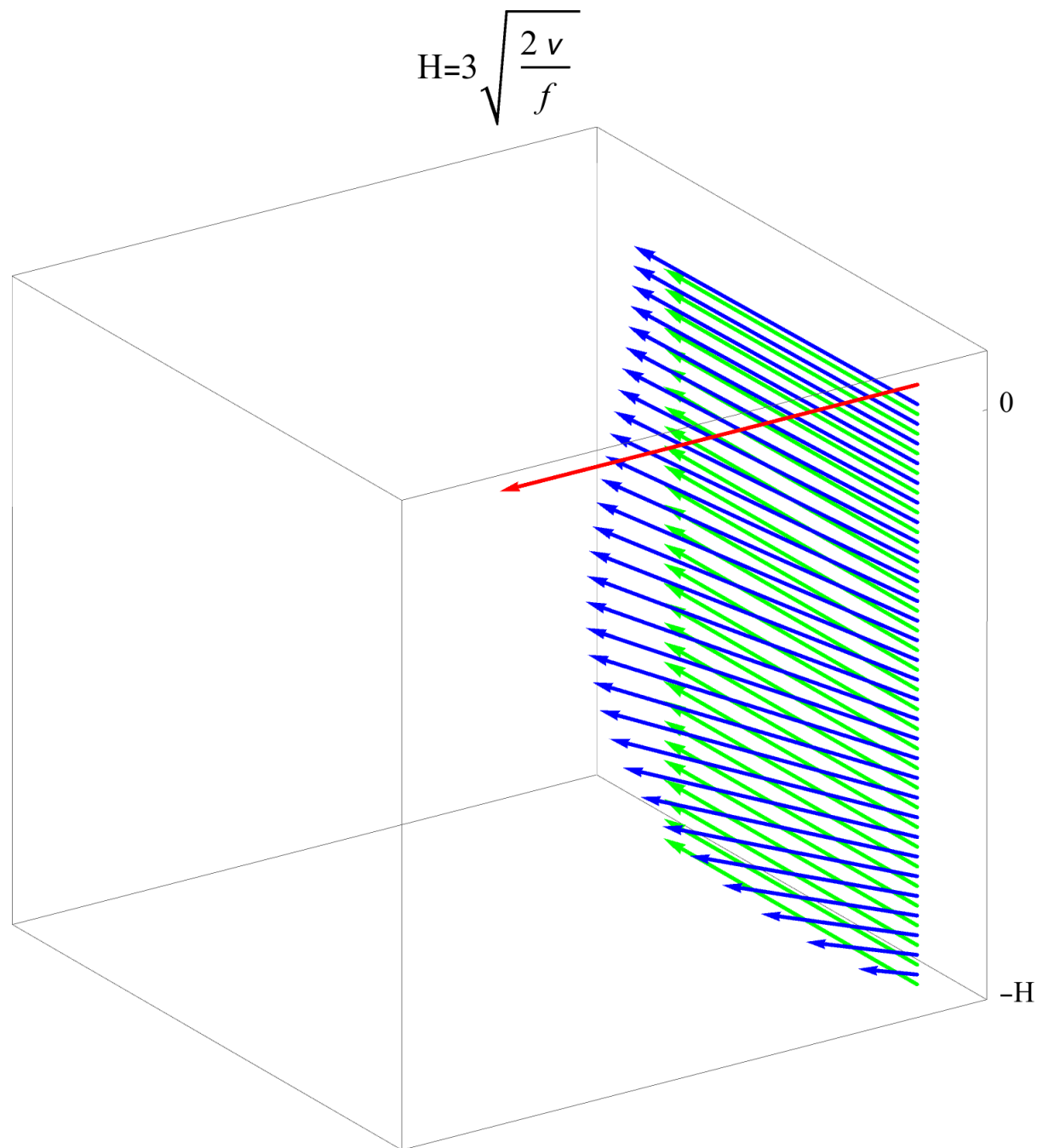
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



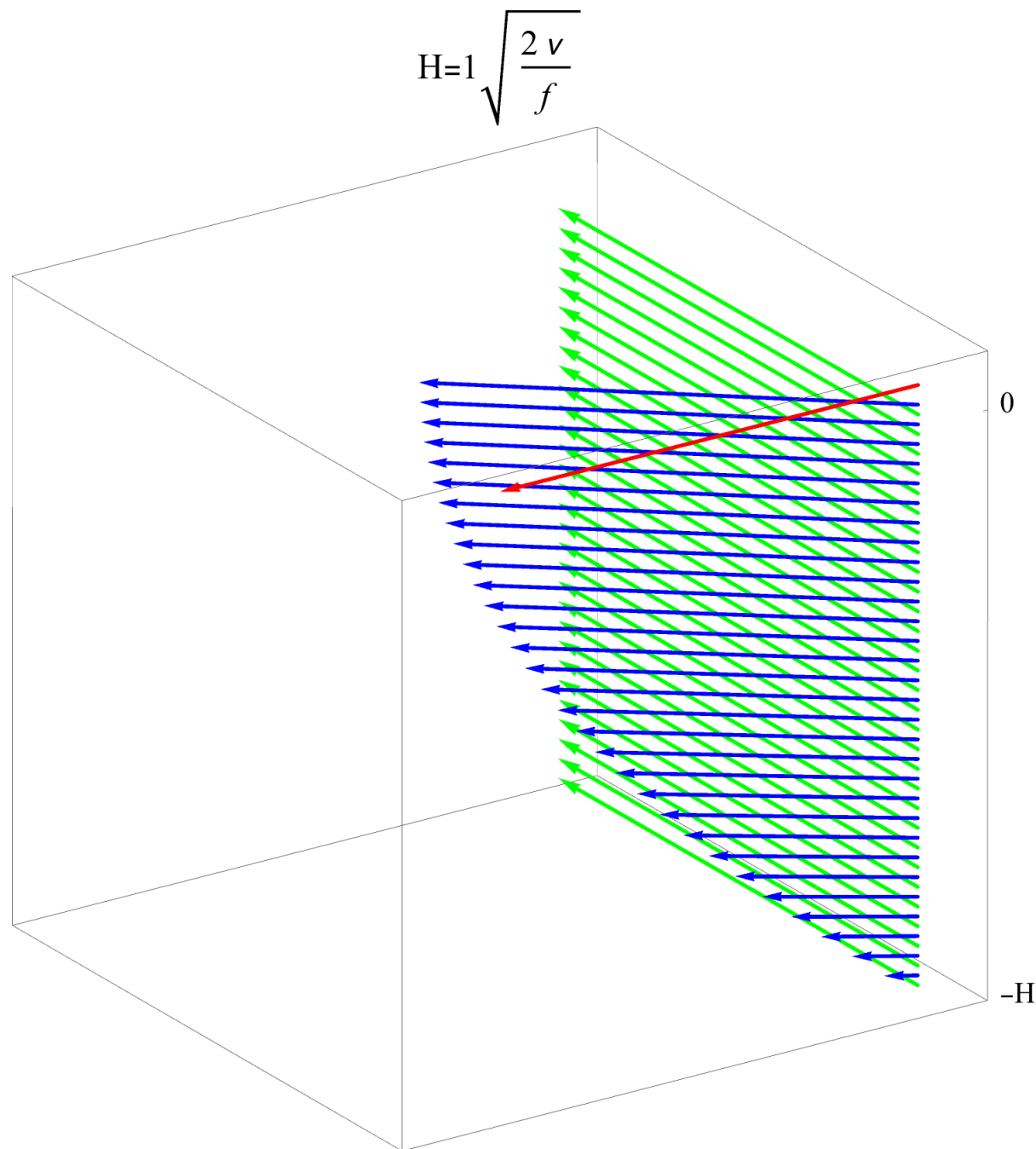
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



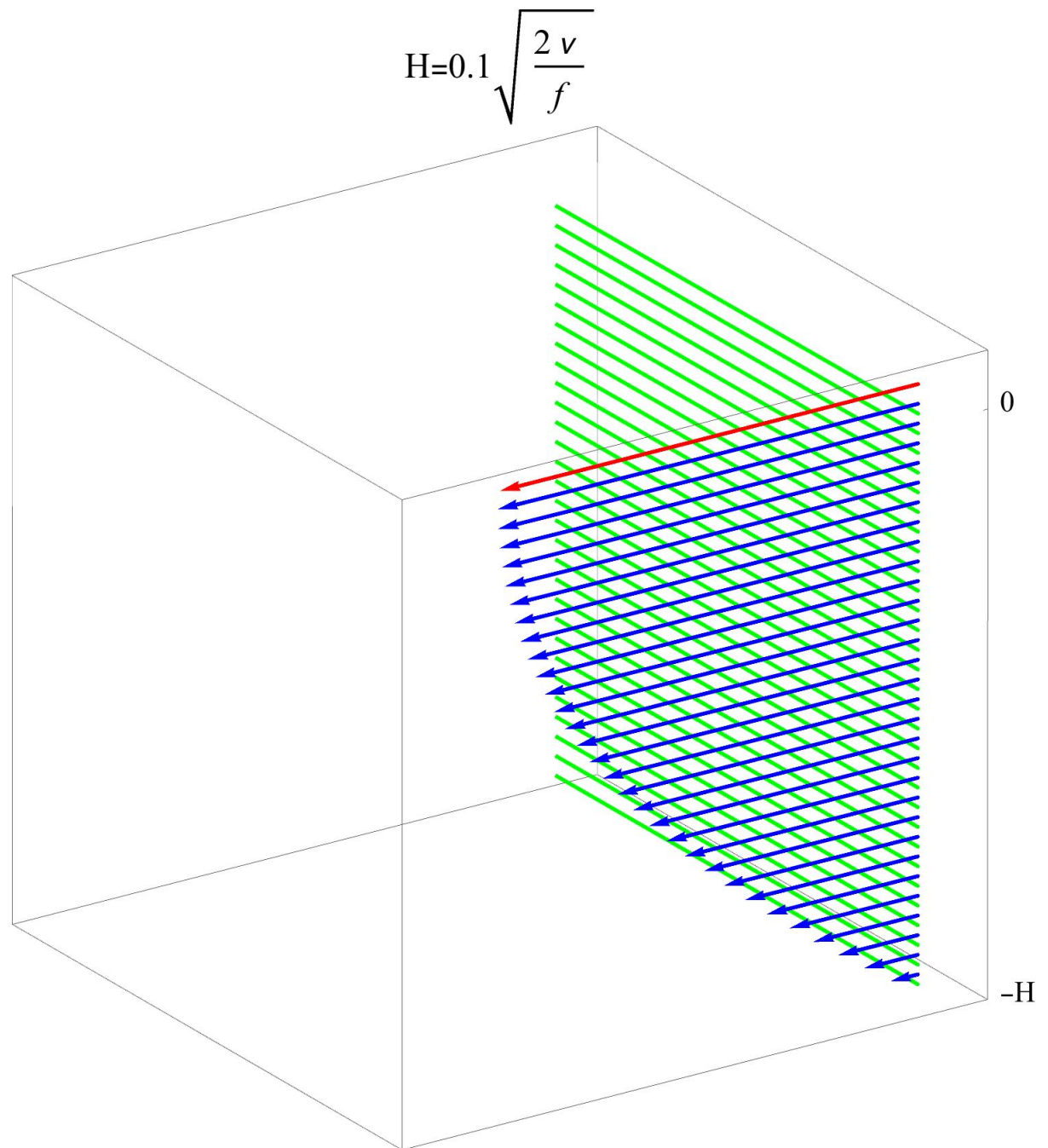
направление
силы градиента
давления



течение без учета
вязкого трения
(геострофическое)



течение с учетом
вязкого трения



A satellite image of a tropical cyclone, showing a large, swirling cloud mass with a distinct eye in the center. The image is taken from space, with the Earth's horizon visible at the top. The word "Ураган" is written in blue text over the right side of the storm.

Ураган

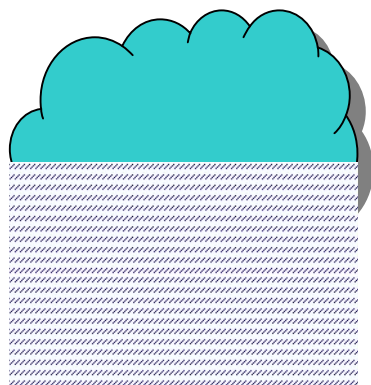
Тропические
ЦИКЛОНЫ

Тайфун

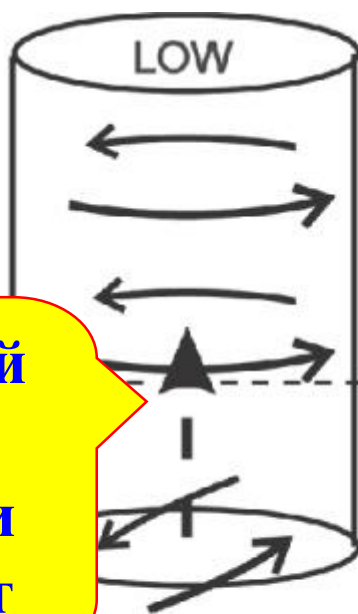
Синоптические вихри

ЦИКЛОН

вращение
против
часовой
стрелки
(Сев.
полушарие)



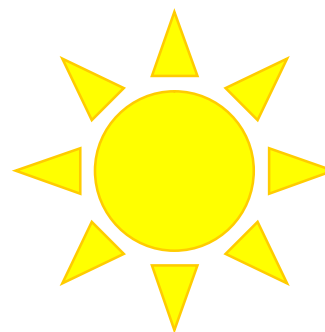
Восходящий
поток со
скоростями
сотни м/сут



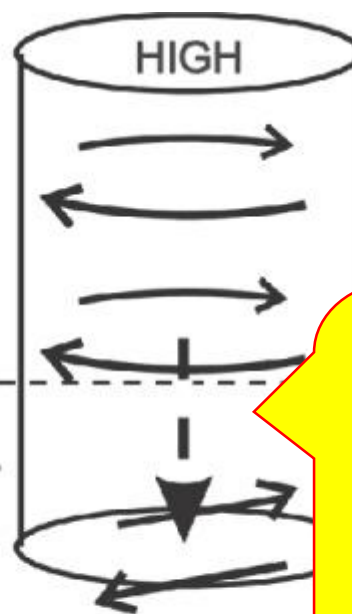
Ekman
Layer

АНТИЦИКЛОН

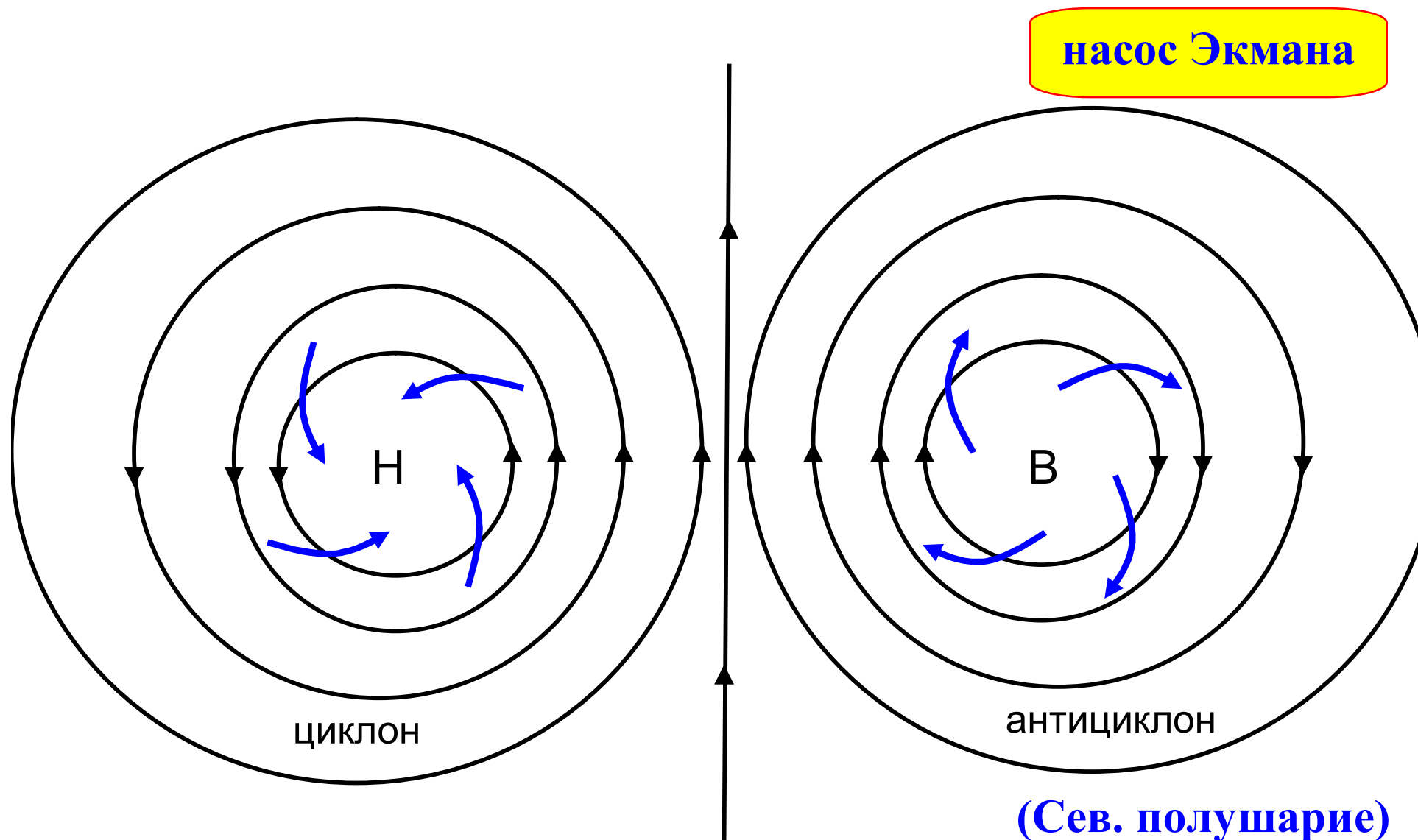
вращение по
часовой
стрелке
(Сев.
полушарие)



Нисходящий
поток со
скоростями от
десятков до
сотен м/сут



**У поверхности земли, где сила трения велика,
происходит заток воздуха в область низкого давления
и отток воздуха из области высокого давления**



Роль и значимость центробежной силы

$$\left| \vec{F}_{\text{цб}} \right| = \frac{v^2}{r}$$

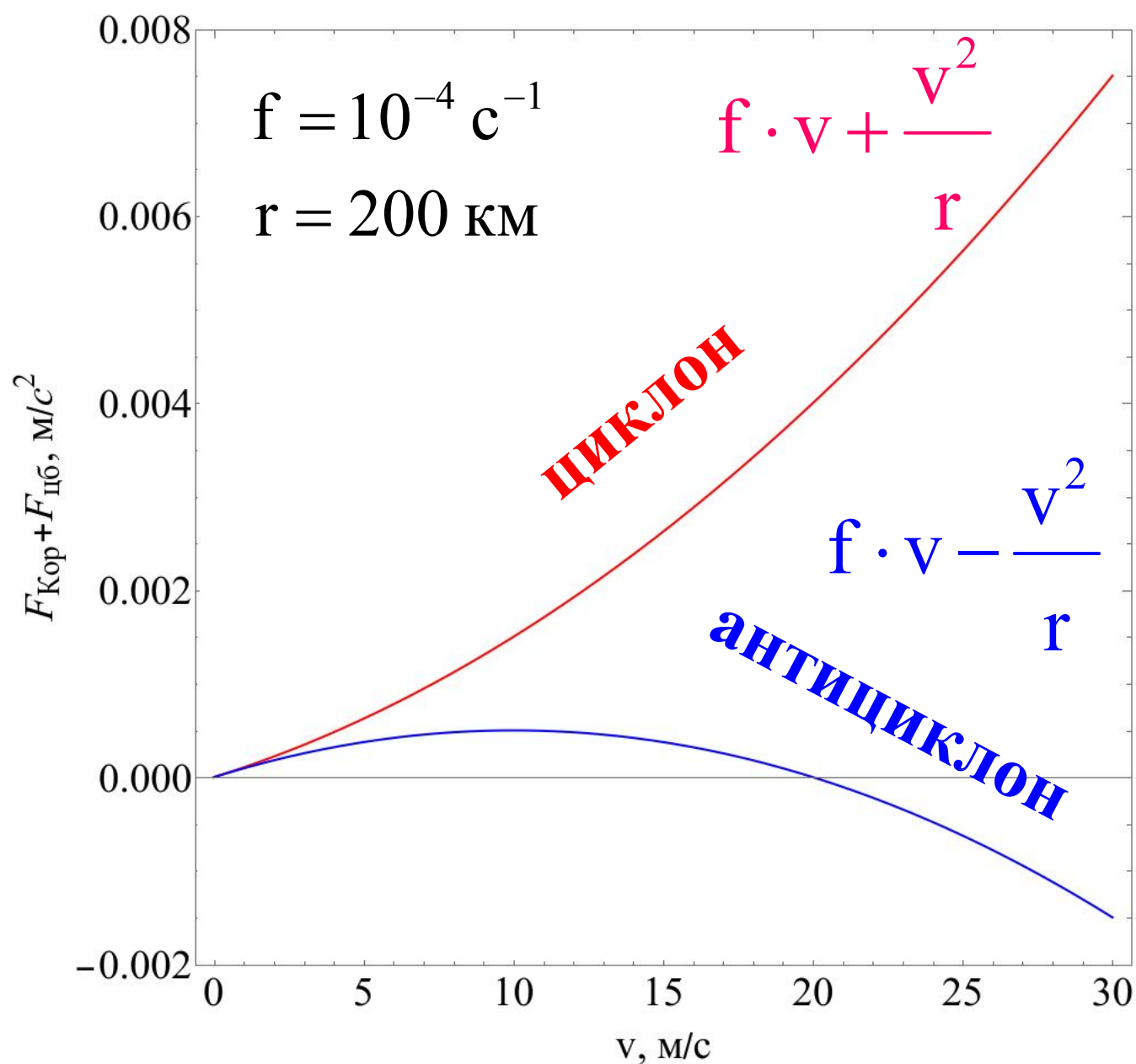
$$\left| \vec{F}_{\text{Кор}} \right| = |f \cdot v|$$

$$\frac{\left| \vec{F}_{\text{цб}} \right|}{\left| \vec{F}_{\text{Кор}} \right|} = \frac{v}{r \cdot |f|}$$

Diagram illustrating the ratio of centrifugal force to Coriolis force with numerical values and their units:

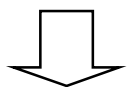
- v (velocity) is 10 м / с (green box).
- r (radius) is $5 \cdot 10^4 \text{ м}$ (yellow box).
- $|f|$ (angular velocity) is 10^{-4} с^{-1} (blue box).
- The ratio $\frac{v}{r \cdot |f|}$ is approximately ≈ 0.1 (green box) and ≈ 10 (yellow box).

Роль и значимость центробежной силы



Баланс сил Кориолиса и центробежной (инерционные колебания)

$$f \cdot v = \frac{v^2}{r}$$



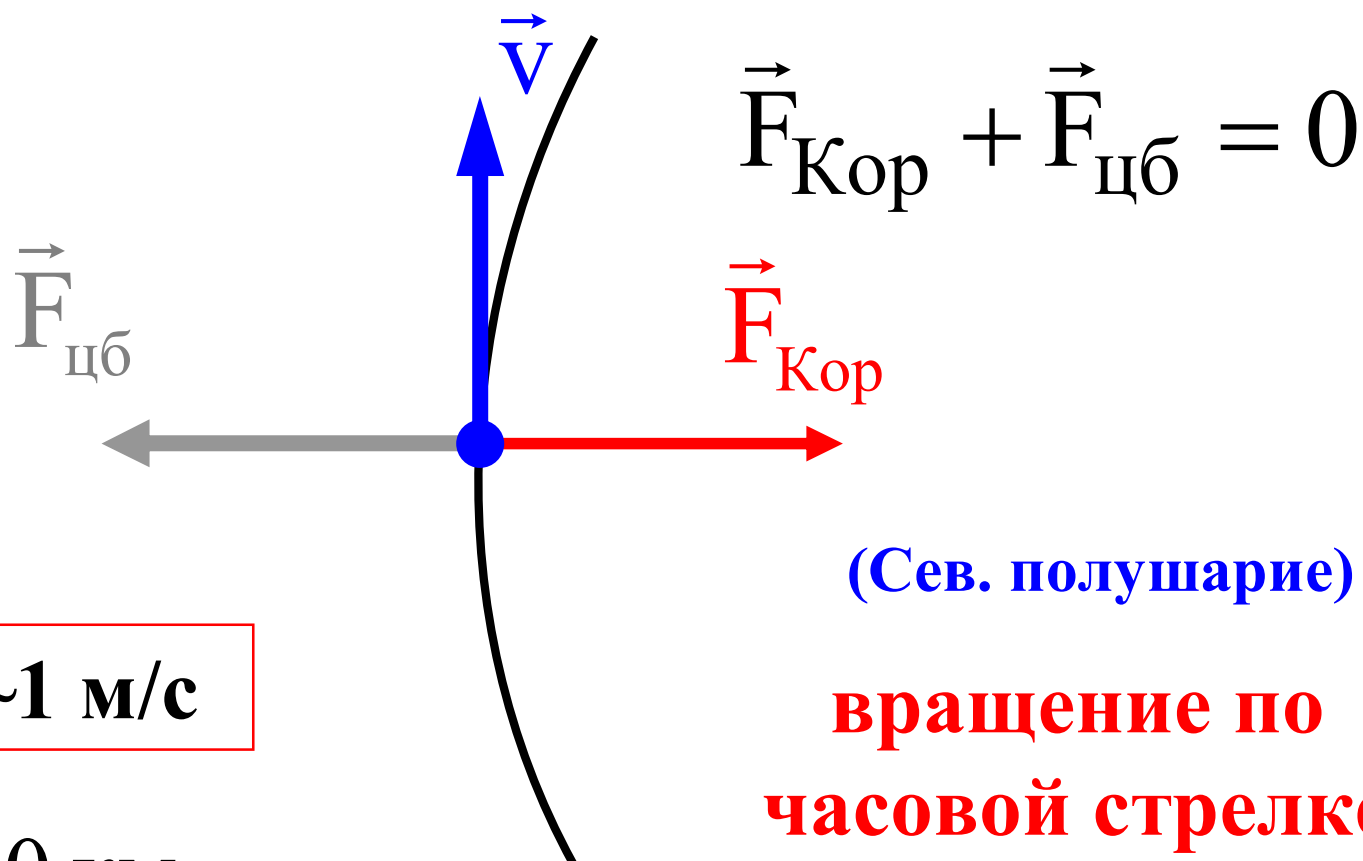
$$v = f \cdot r$$

ИЛИ

$$r = \frac{v}{f} \sim 10 \text{ км}$$

$\sim 1 \text{ м/с}$

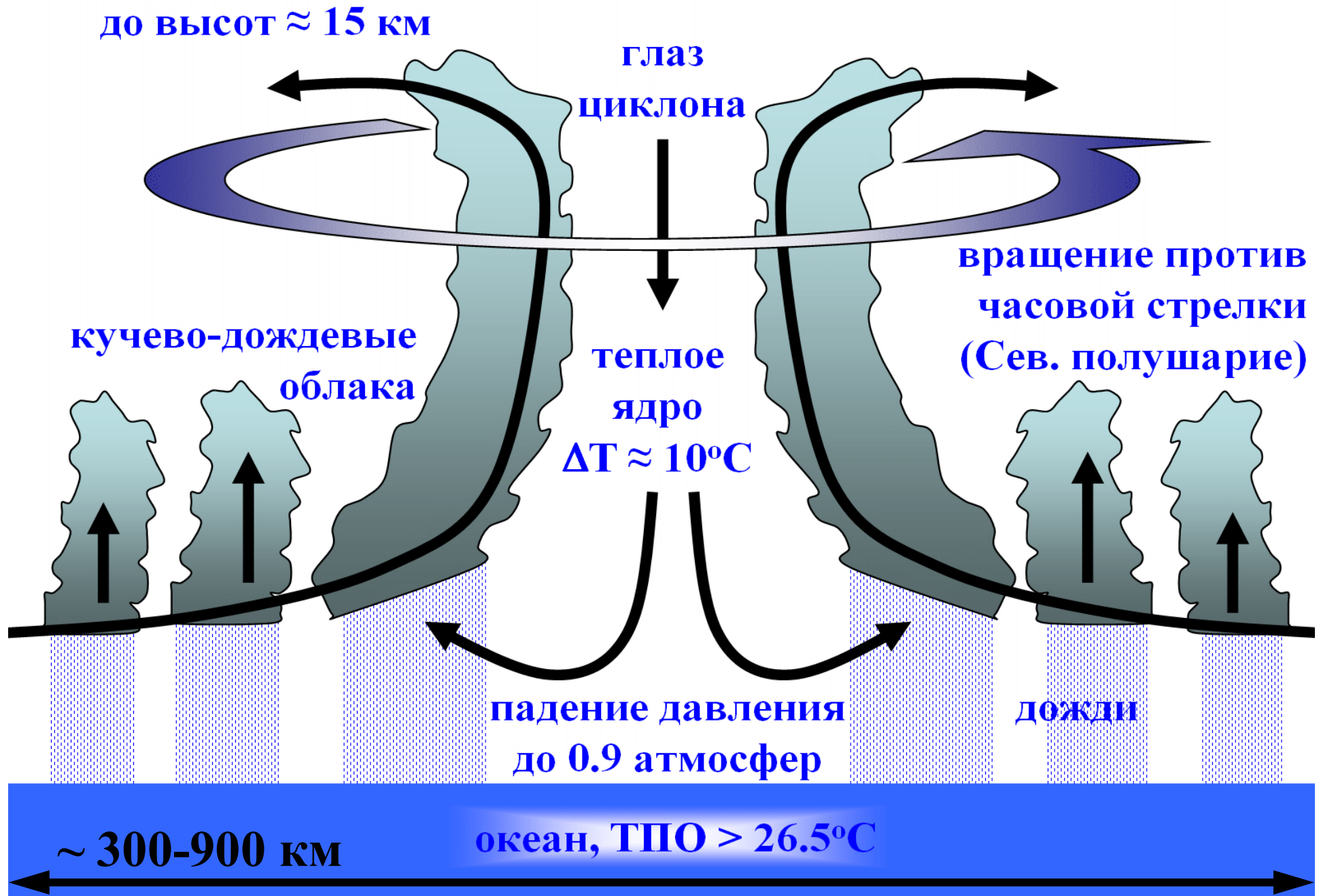
$\sim 10^{-4} \text{ с}^{-1}$



(Сев. полушарие)

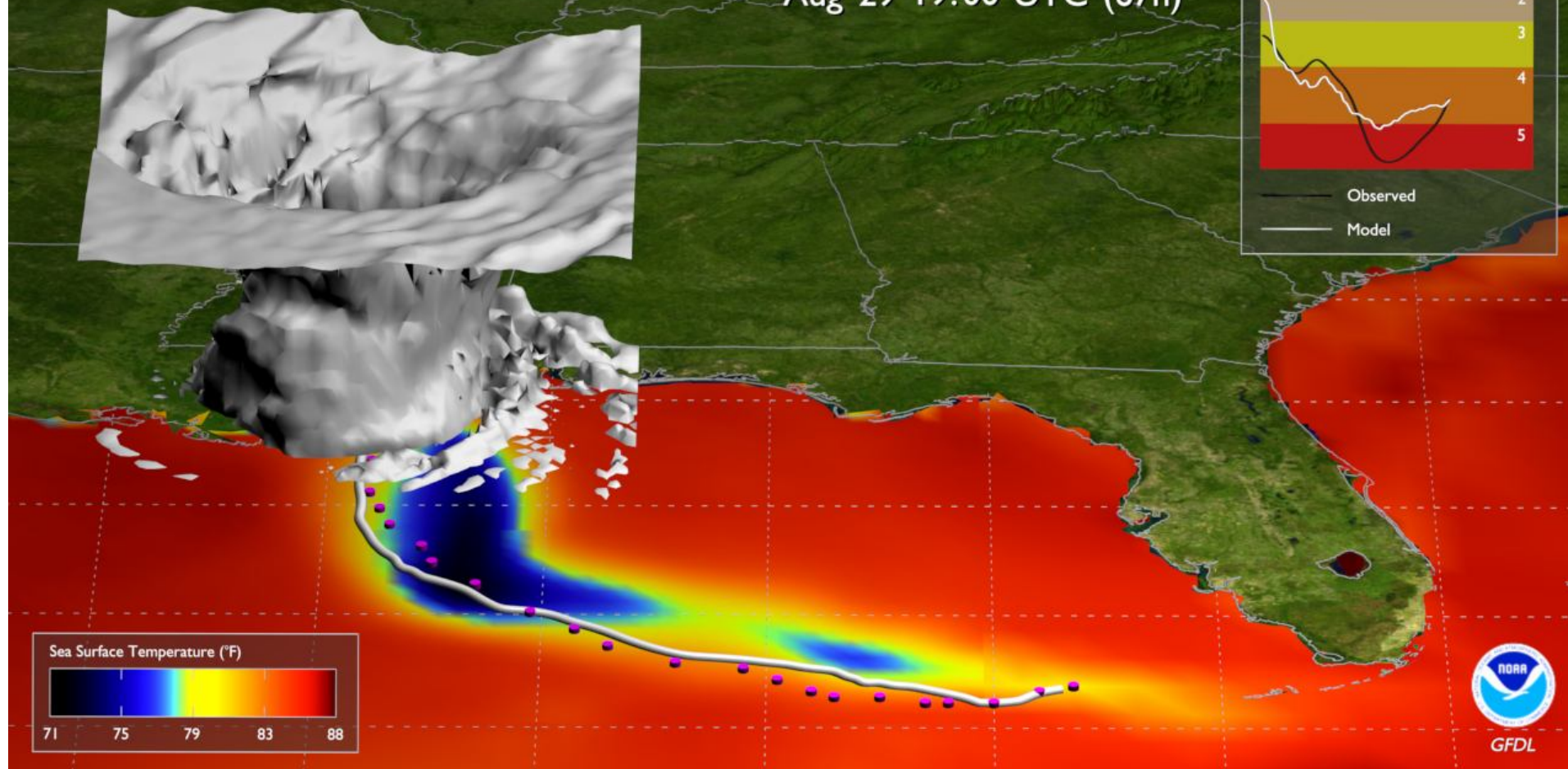
**вращение по
часовой стрелке**

Схема тропического циклона



Hurricane Katrina Coupled Model Forecast

Aug 29 19:00 UTC (67h)



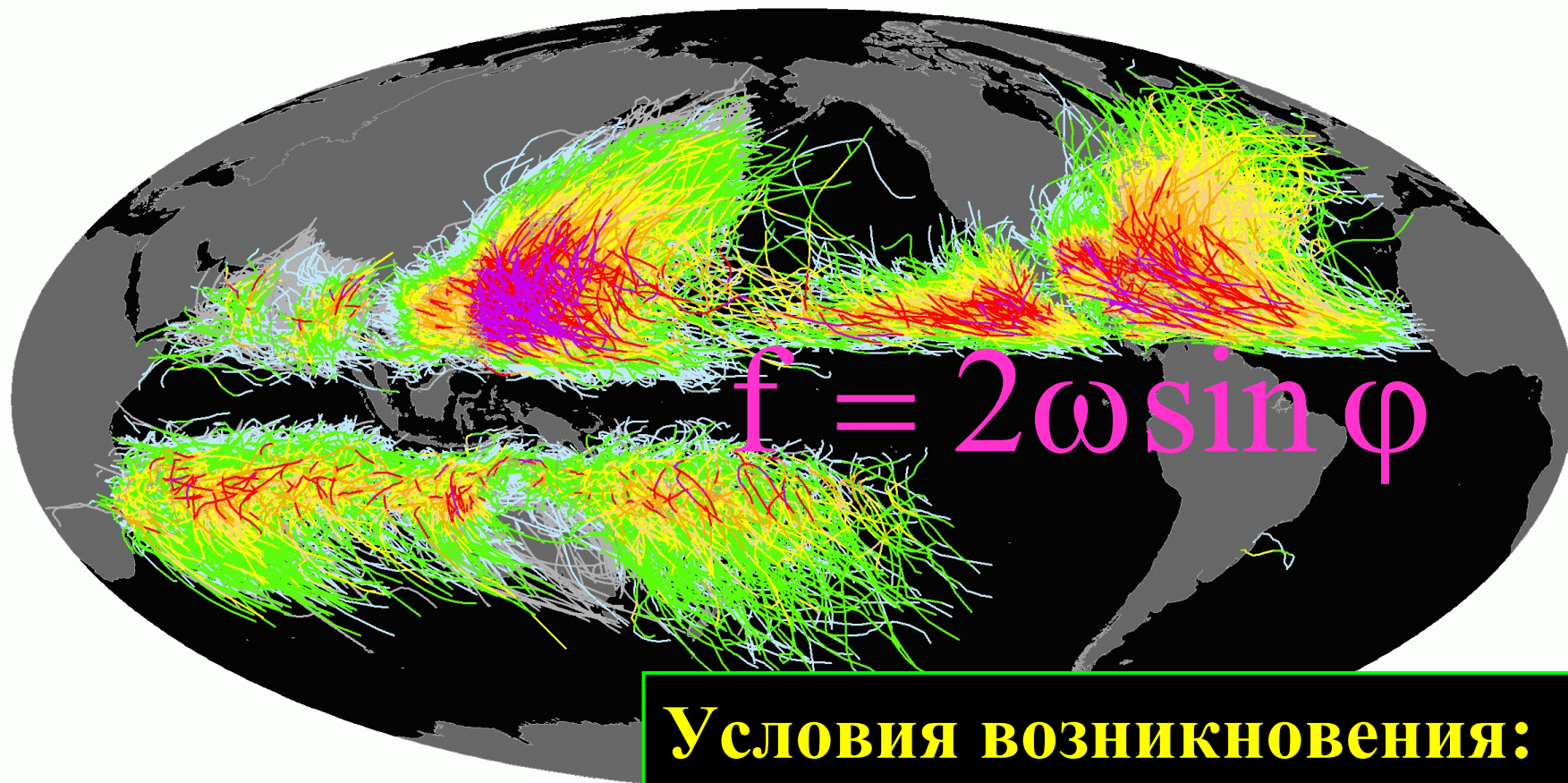
положительная обратная связь:

«скорость ветра —

поток явного и скрытого тепла с пов-ти океана»

Треки всех известных к 2010 г. тропических циклонов

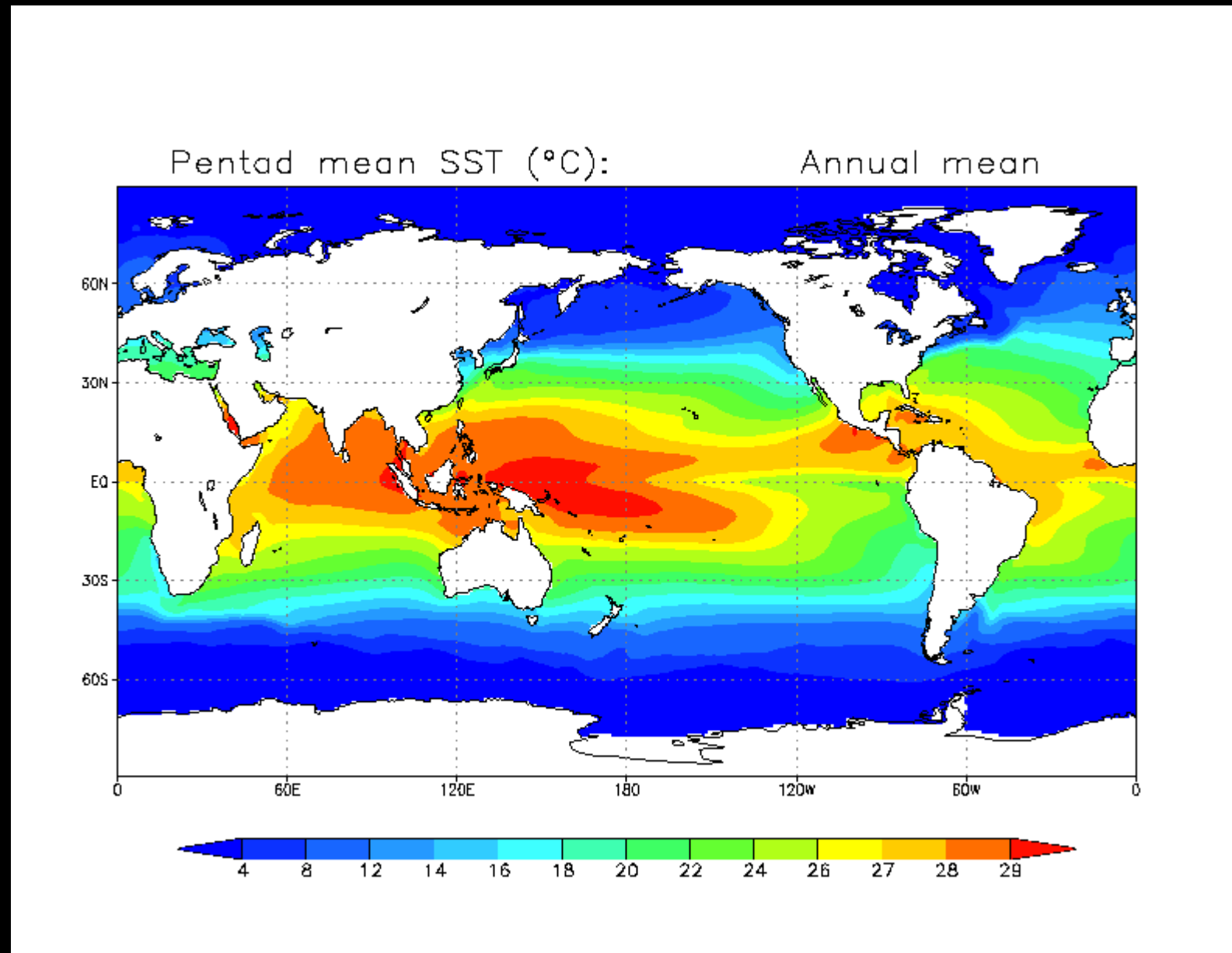
<http://www.climatewatch.noaa.gov/>



Условия возникновения:

- ☐ широты выше 5-10°
- ☐ ТПО > 26.5 °C

Температура поверхности океана (ТПО)



Шкала ураганов Саффира — Симпсона

Категория	Скорость ветра, км/ч (м/с)	Штормовой нагон (м)
1	119- 153 (33-43)	1.2 - 1.5
2	154-177 (43-49)	1.8 – 2.4
3	178-208 (49-58)	2.7 – 3.7
4	209-251 (58-70)	4.0 – 5.5
5	≥ 251 (70)	> 5.5

«Оружие» тропического циклона:

- ☐ Ветер («...сделан из металла...»)
- ☐ Дожди (0.5 м за сутки и более)
- ☐ Волны (до 30 м)
- ☐ Штормовые нагоны





Общая циркуляция атмосферы и океана

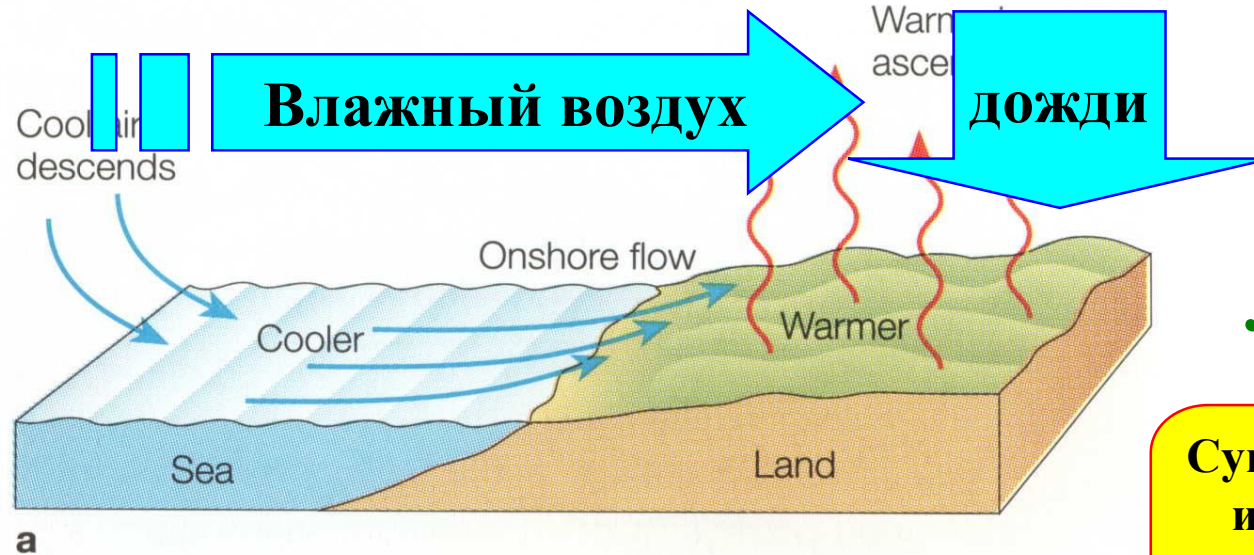


Местные ветры

Бриз

Муссон

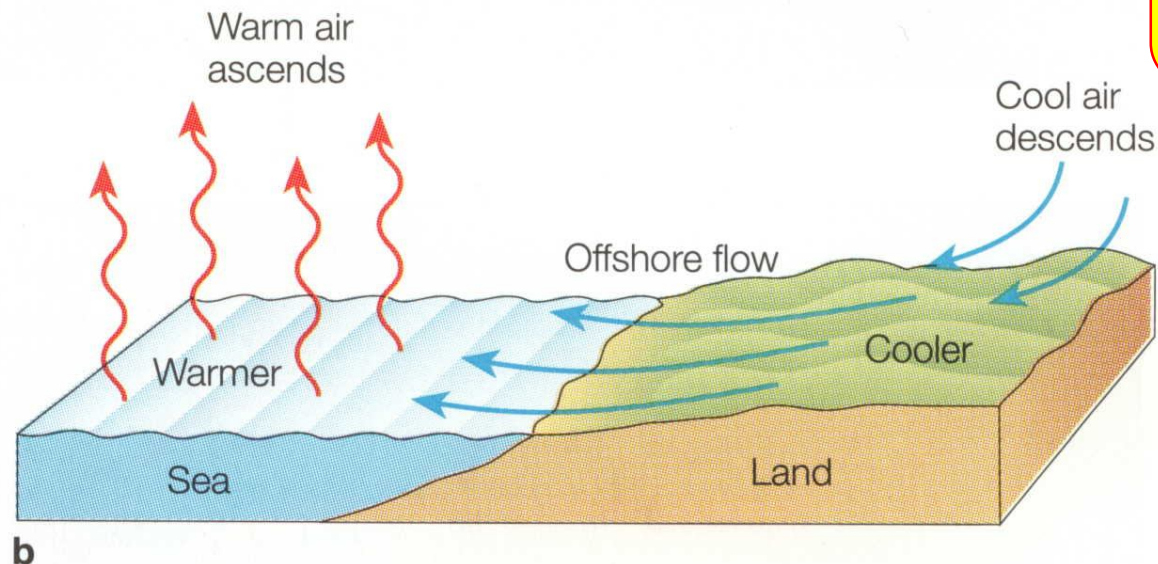
день



лето

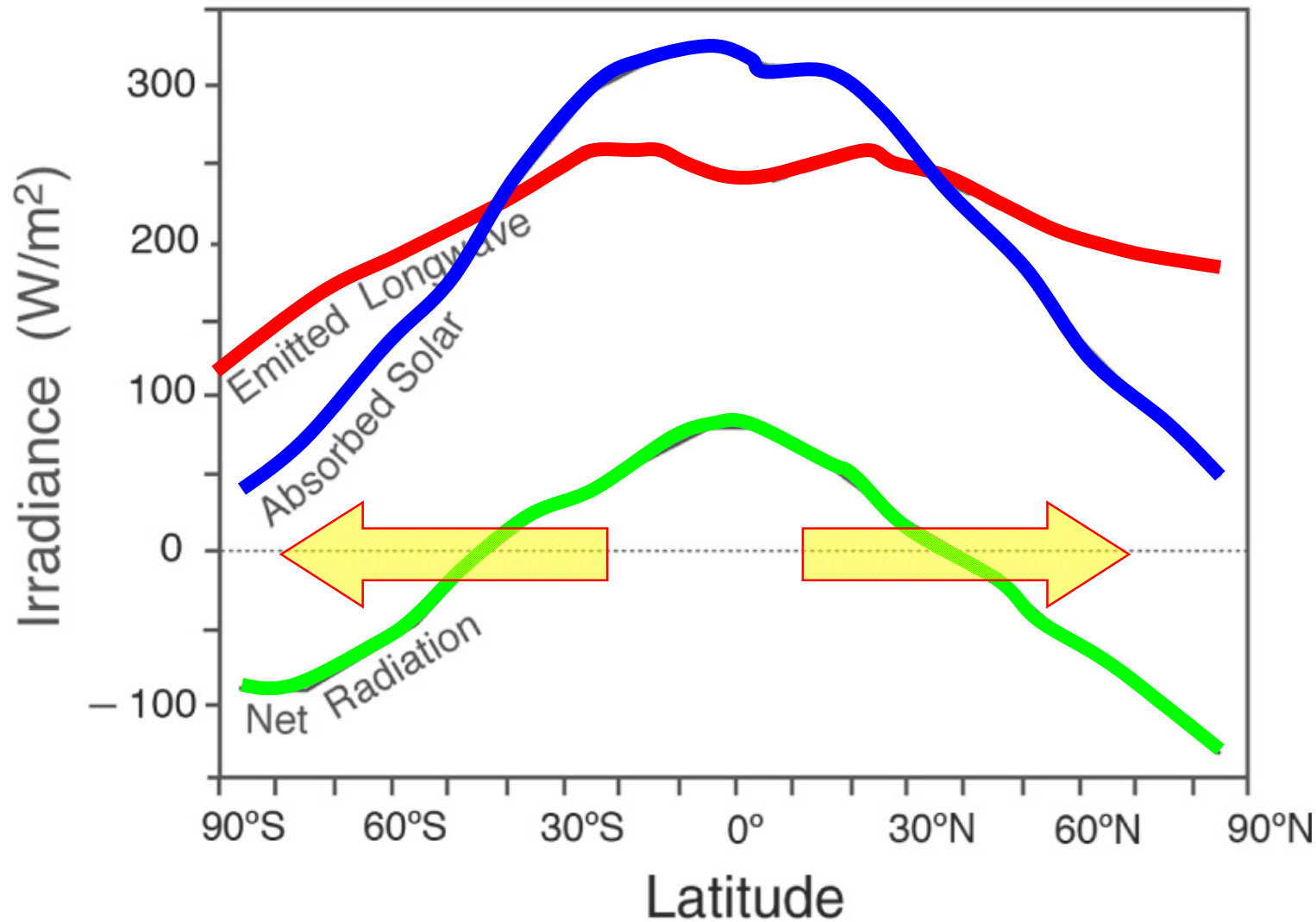
Существуют
и другие
местные
ветры

ночь



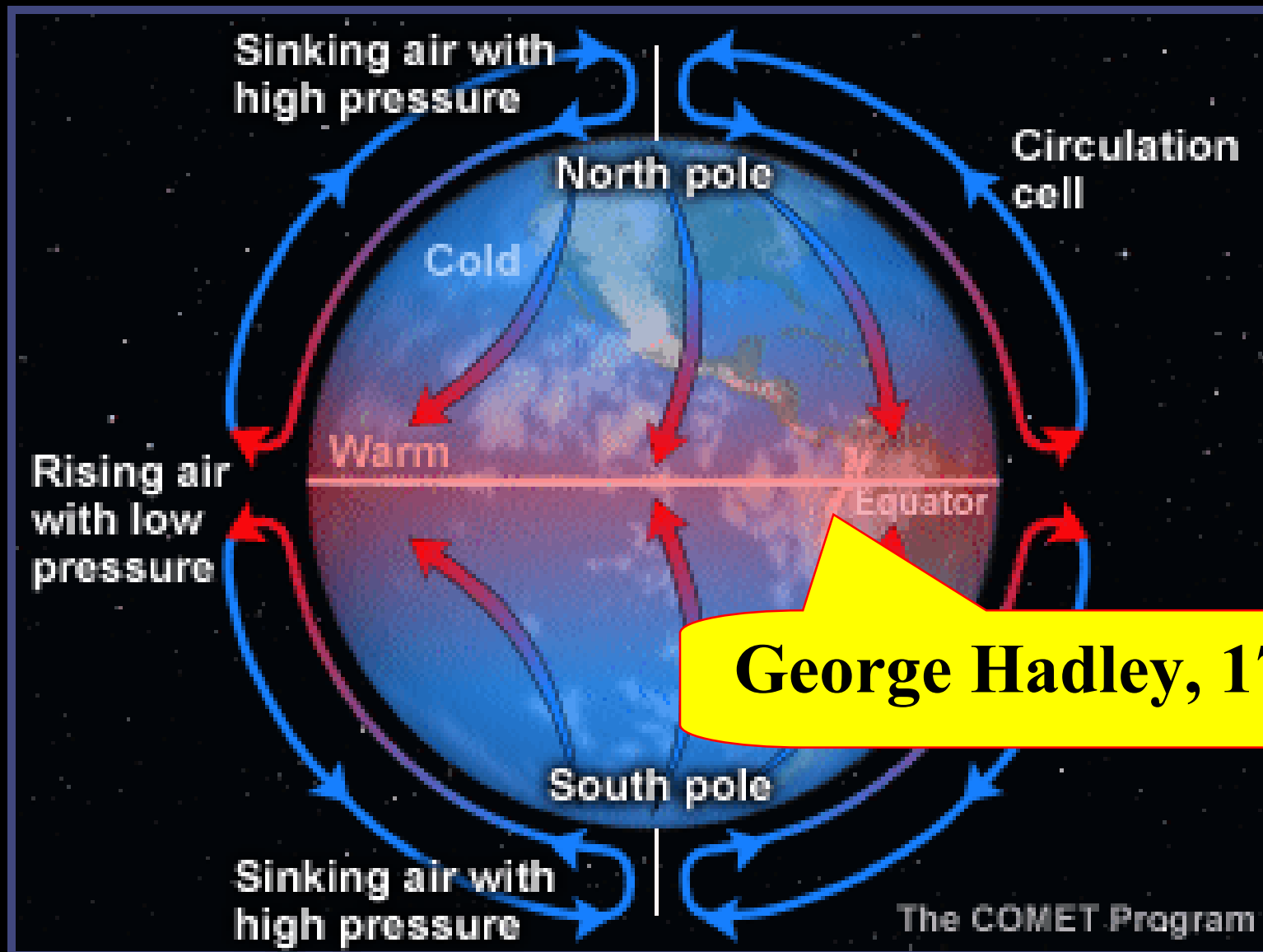
зима

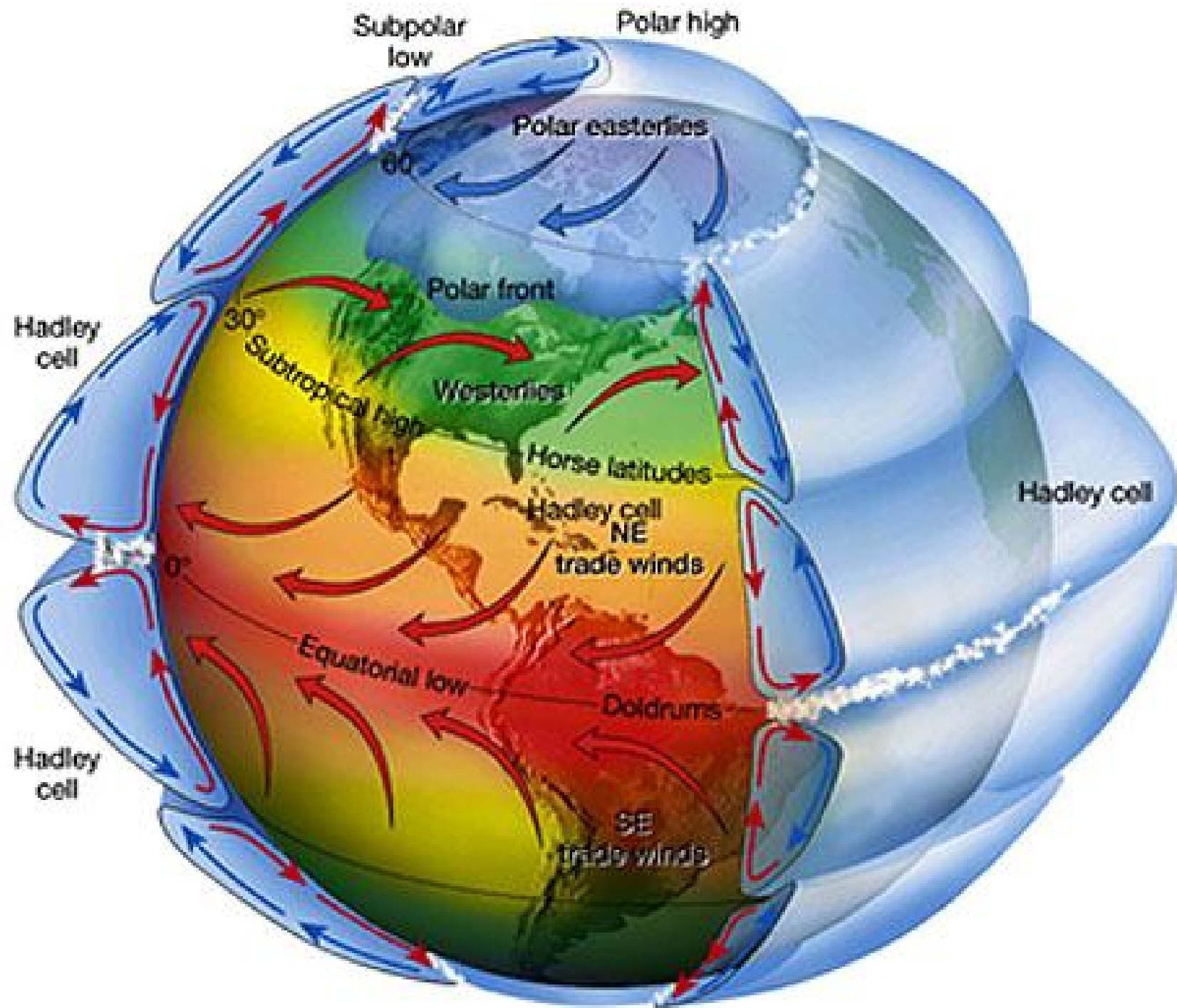
Среднегодовые широтные распределения радиации (Вт/м²):
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой
и их разница



Существует поток тепла от экватора к полюсам

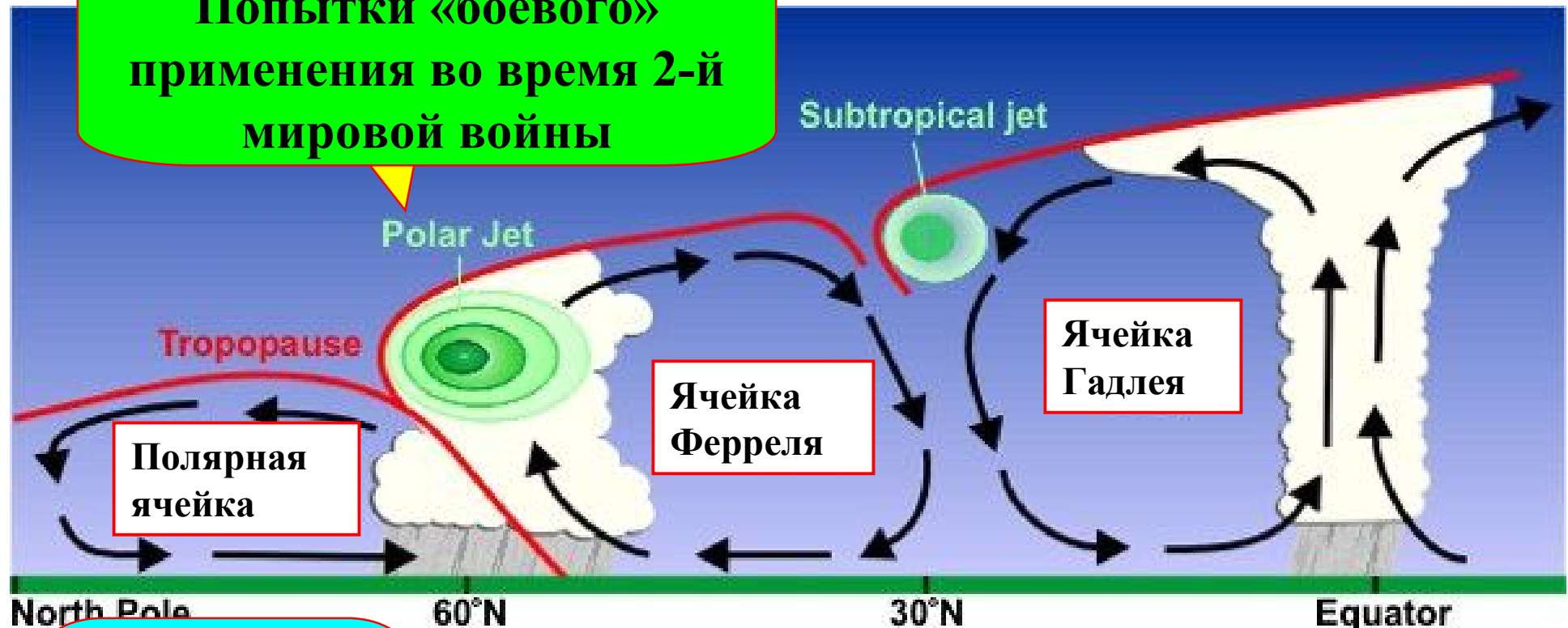
Упрощенная модель циркуляции атмосферы





Струйное течение (до 100 м/с)

**Попытки «боевого»
применения во время 2-й
мировой войны**



**Слабый
восточный
перенос**

**Западный
перенос**

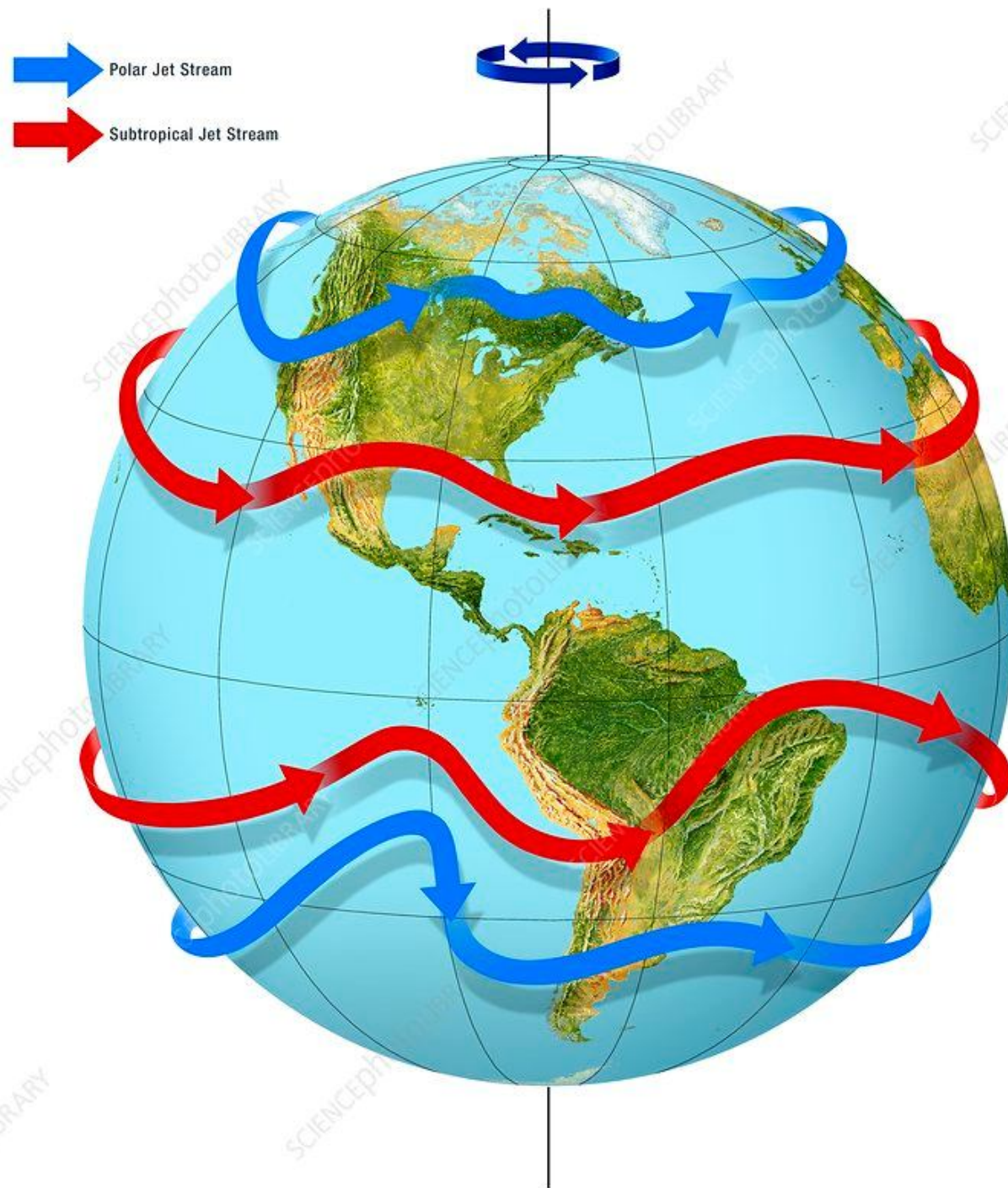
**Зона
пассатов**

**Пояс низкого
давления**

**Конские
широты**

**Внутритропическая
зона конвергенции**

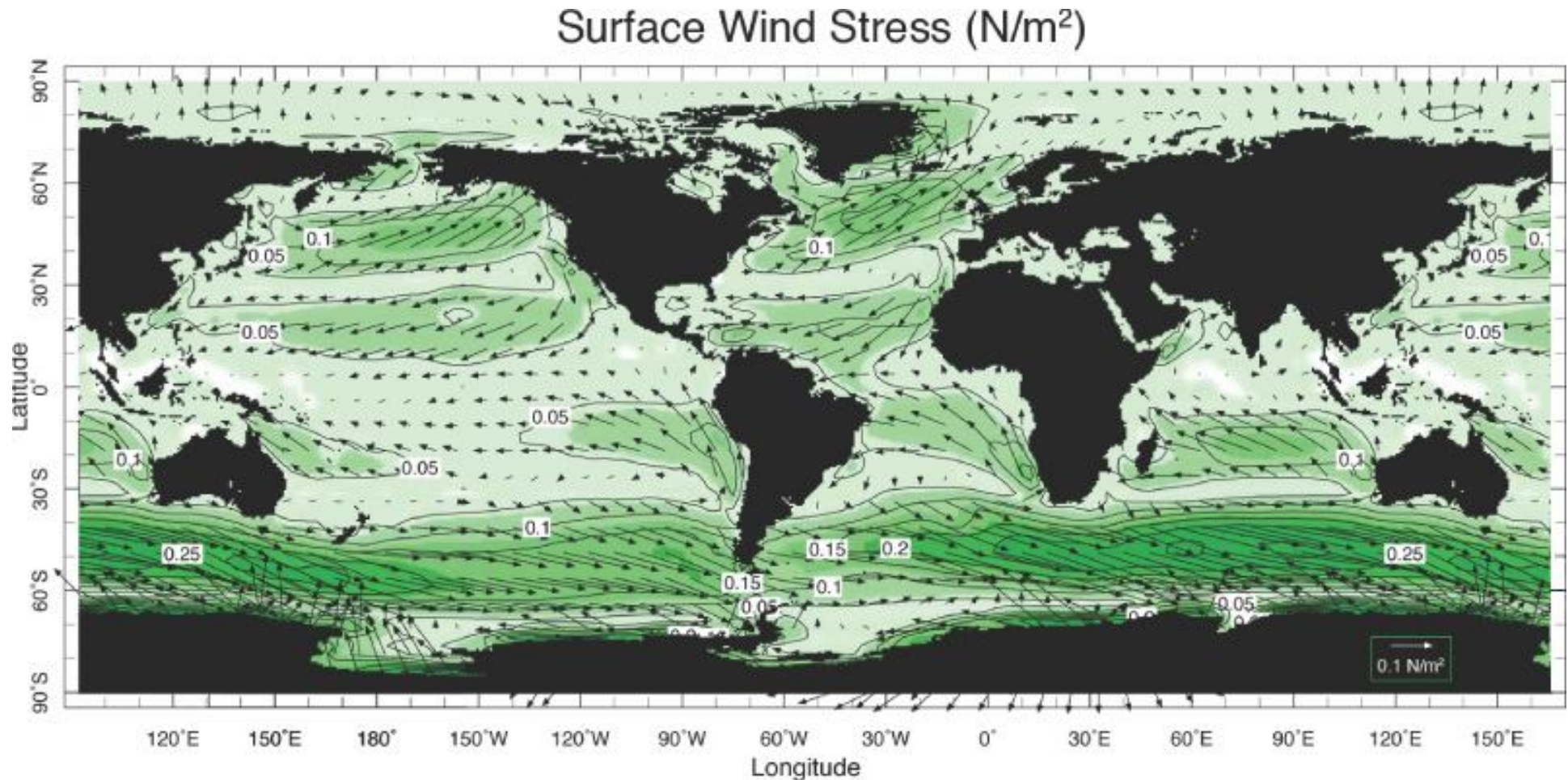
Струйные течения (jets)



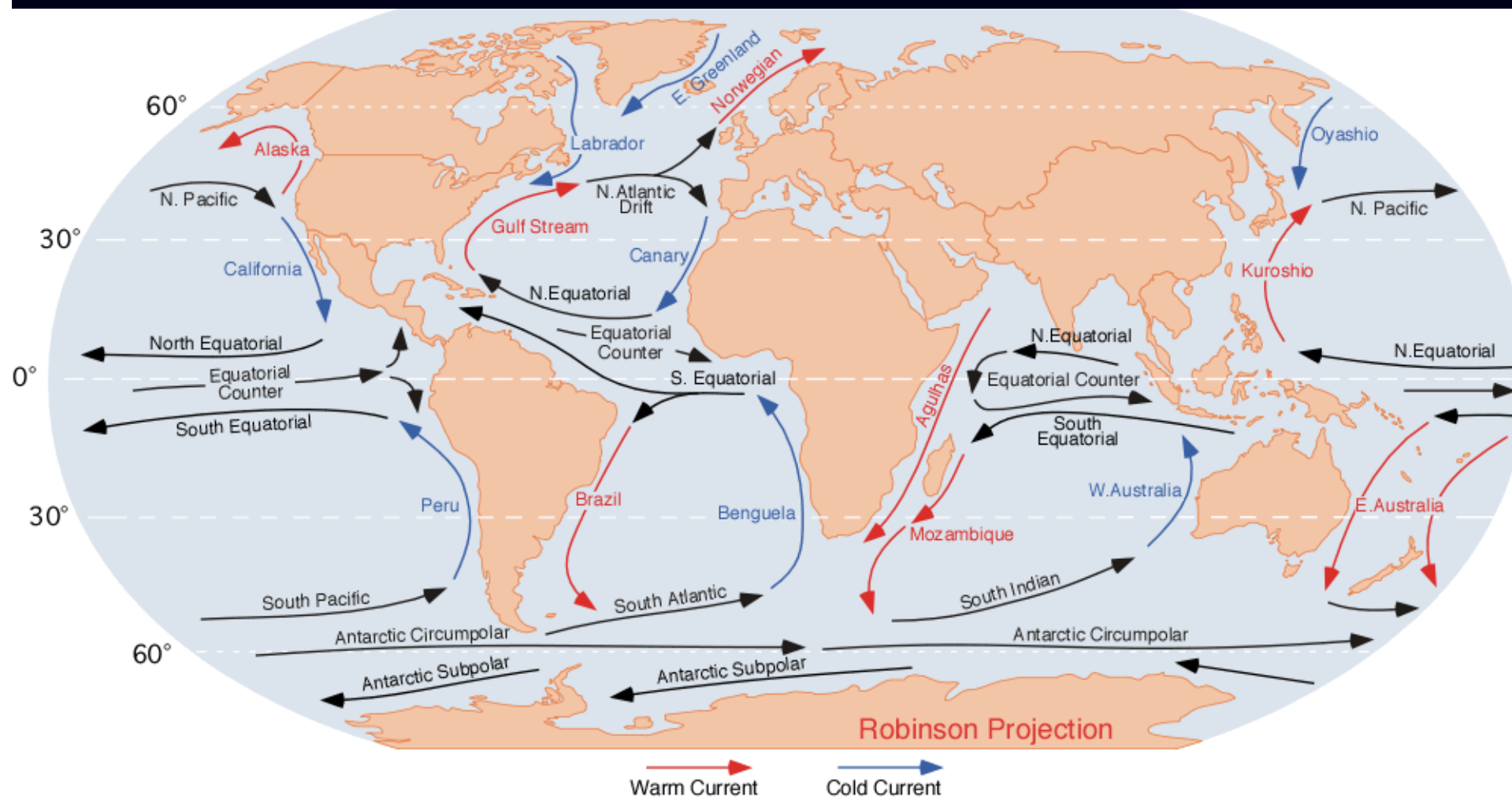
Напряжения трения ветра, действующее на поверхность океана

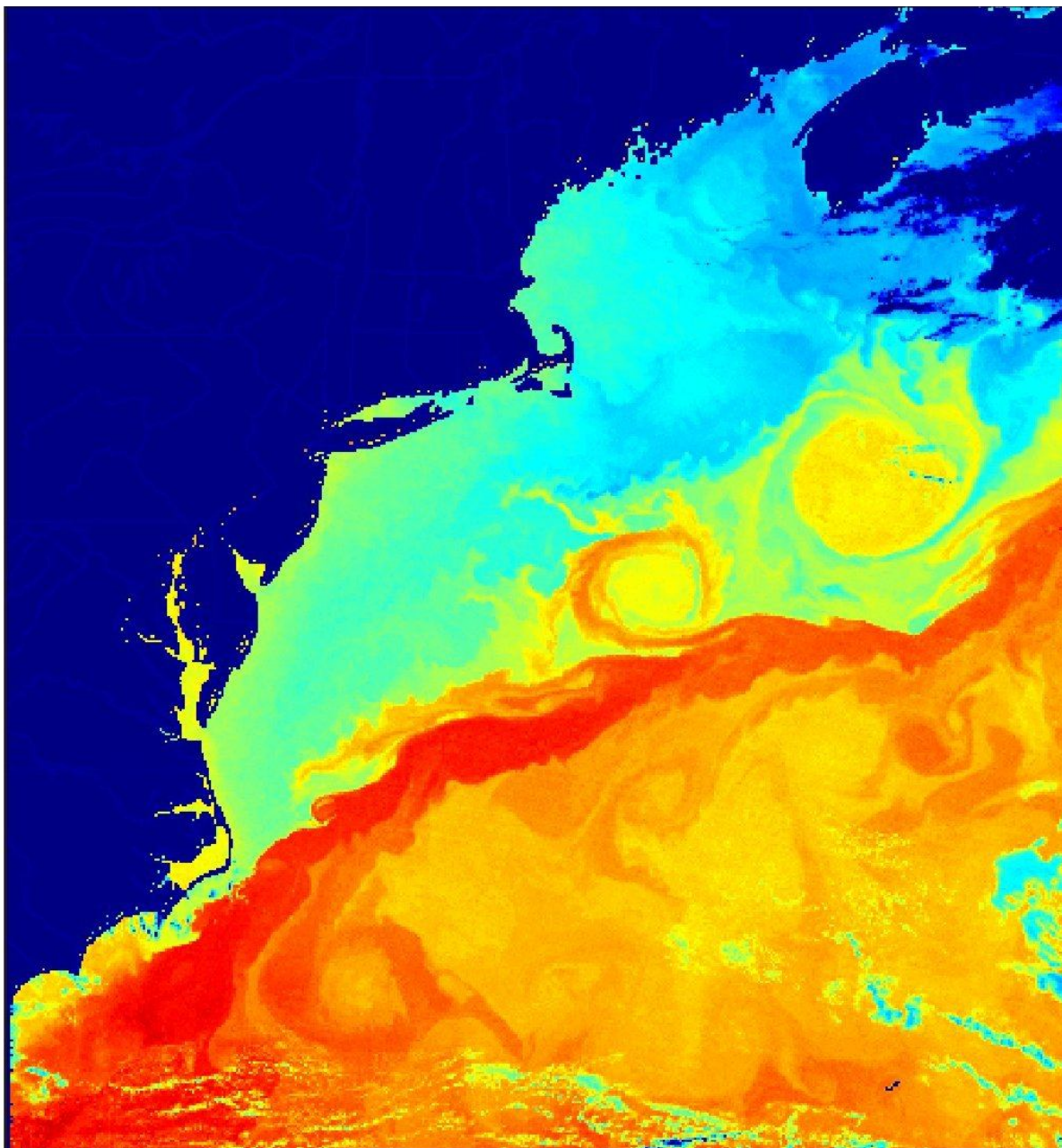
$$\vec{\tau} = C \rho_{\text{атм}} \left| \vec{V} \right| \vec{V}, \quad C \approx 0.0025$$

Среднегодовое распределение напряжения трения ветра (Н/м²)



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

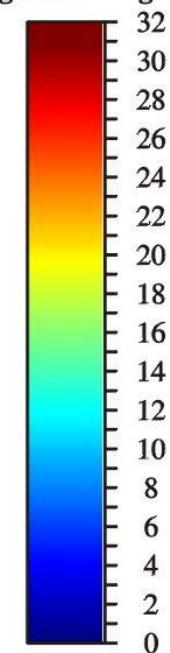
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

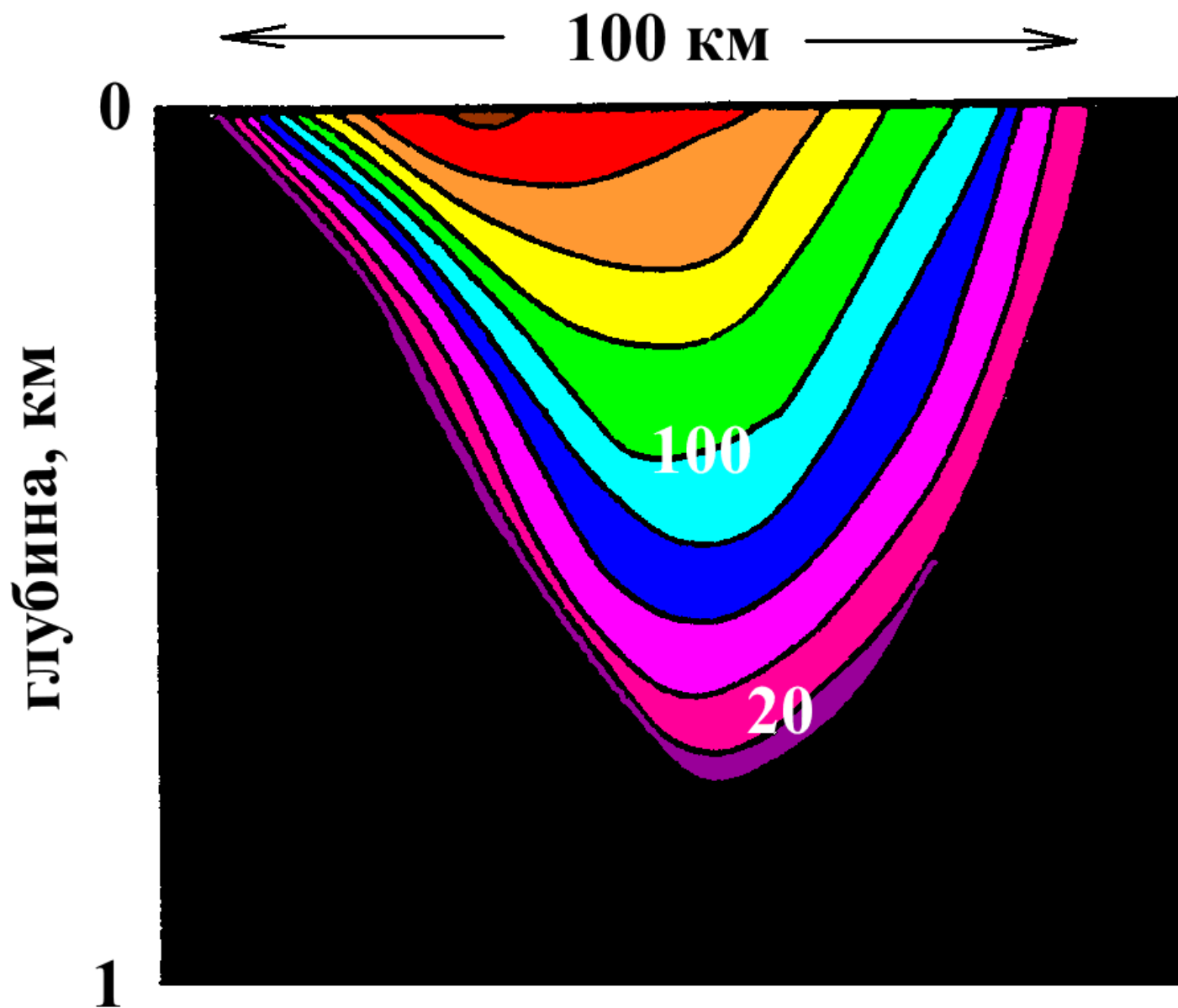
Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

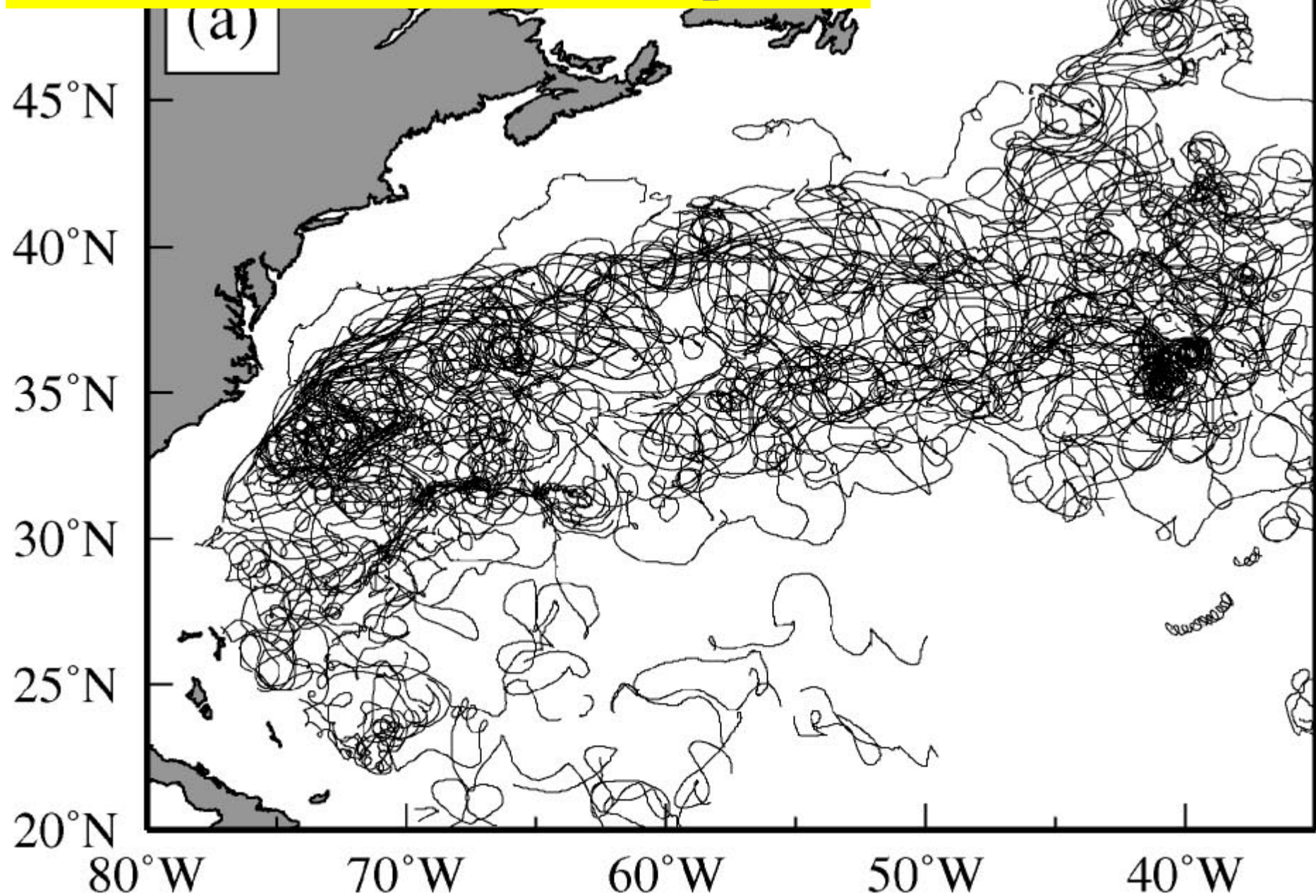
Surface Temperature (Degrees Centigrade)



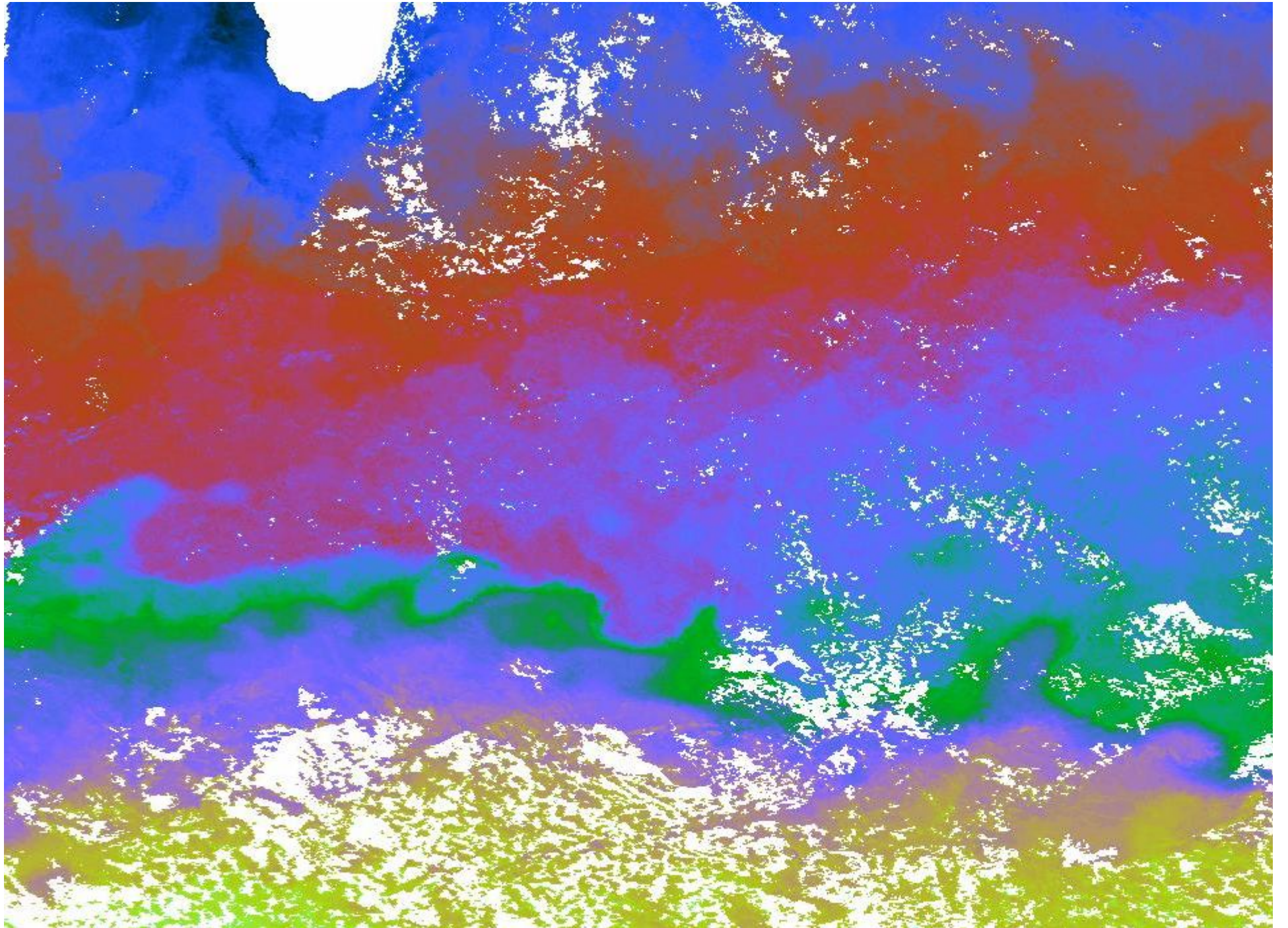
Вертикальная структура течения Гольфстрим



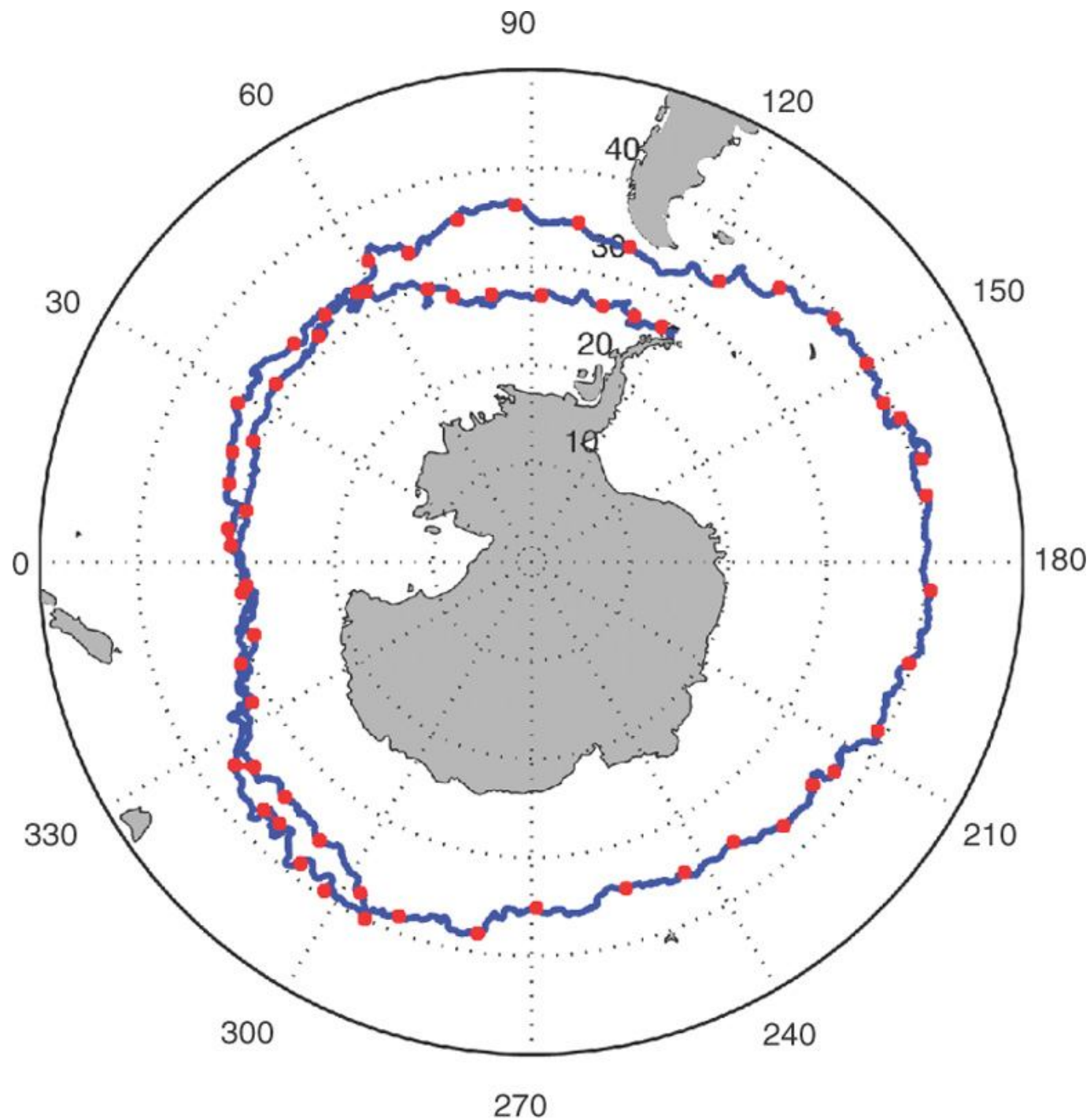
Isobaric floats at 700-m depth



[Veneziani et al., 2004]

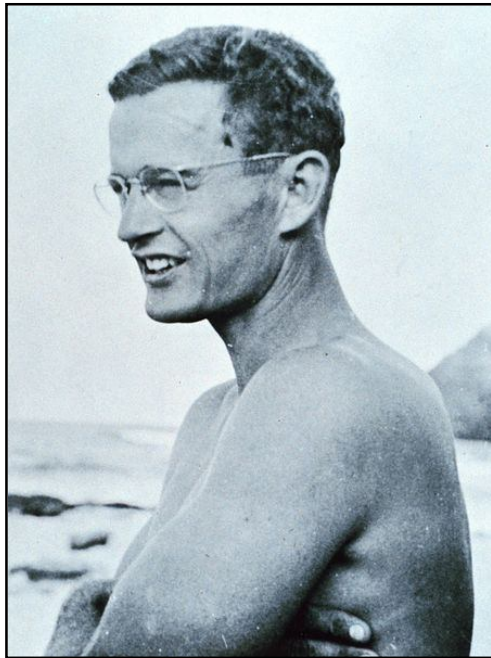


**Траектория
поверхностного
дрифтера за
период с марта
1995 г. по март
2000 г. Красные
точки – 30 сут.
интервал**



(Courtesy of Nikolai Maximenko.)

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



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

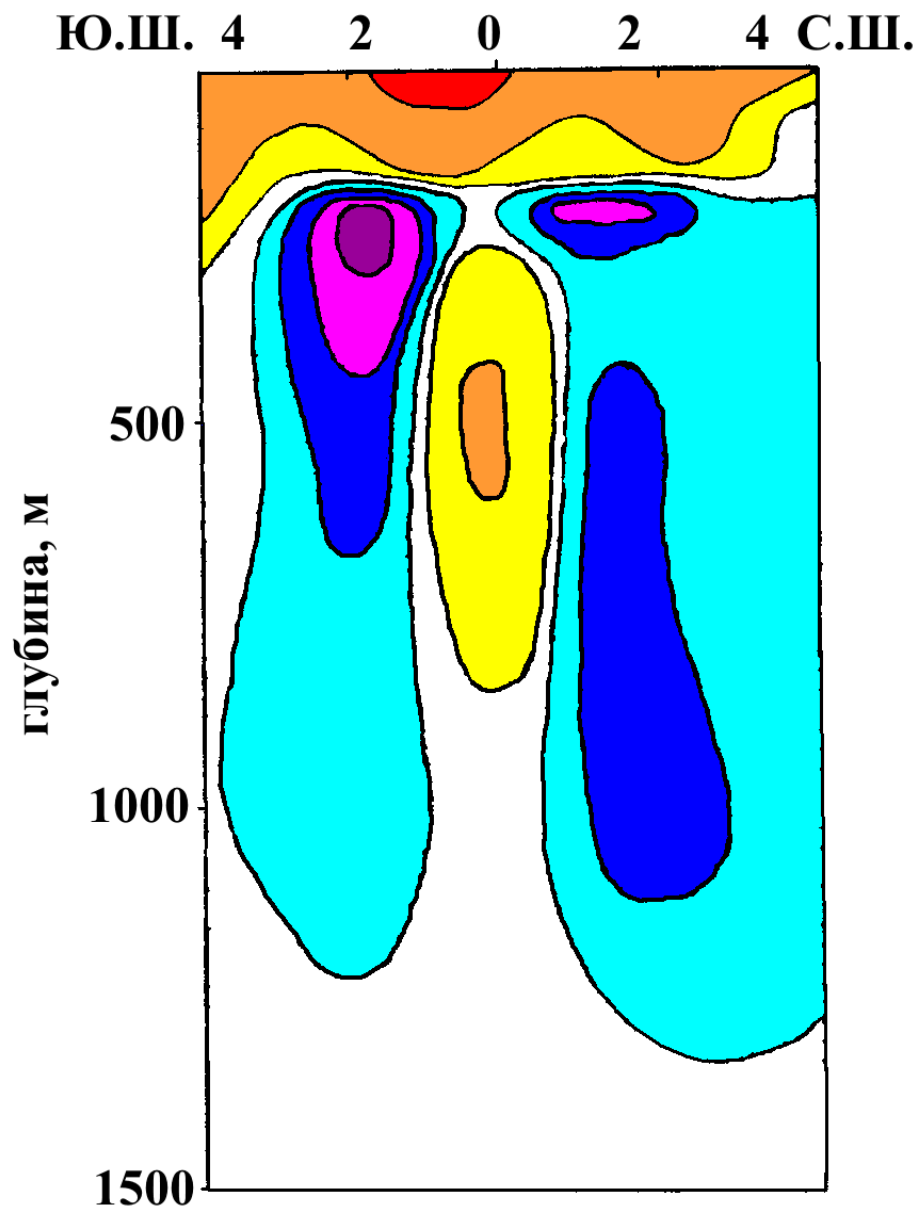
- ❑ *Таунсенд Кромвелл:*
«...подводная река вдоль
Экватора от Соломоновых
до Галапогосских о-вов
(8000 миль), ширина 150-200
миль, скорость до 1.5 м/с»**
- ❑ Вначале названо
Экваториальным
противотечением, после
гибели Т.Кромвелла в 1958г.
в авиакатастрофе
переименовано в течение
Кромвелла**
- ❑ В дальнейшем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

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



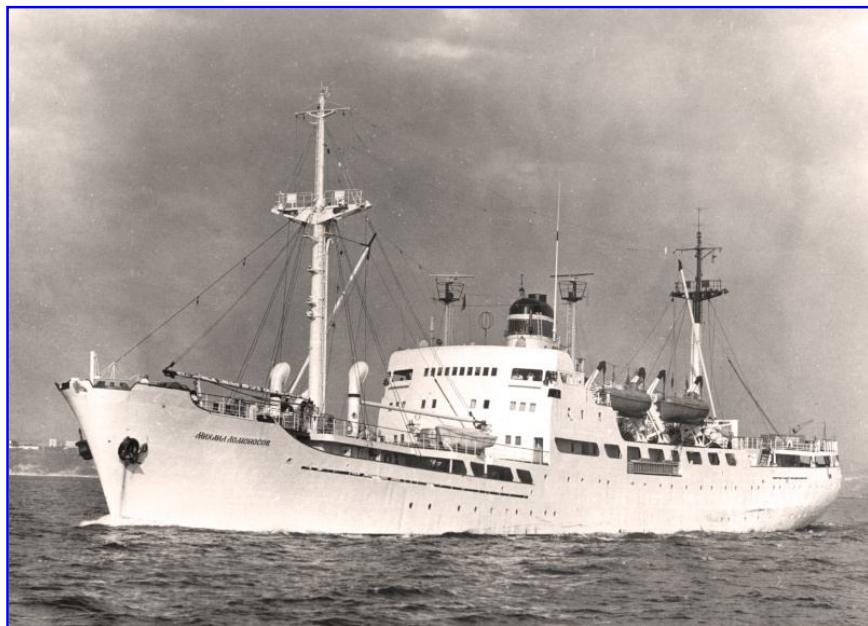
Особенности:

- 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**

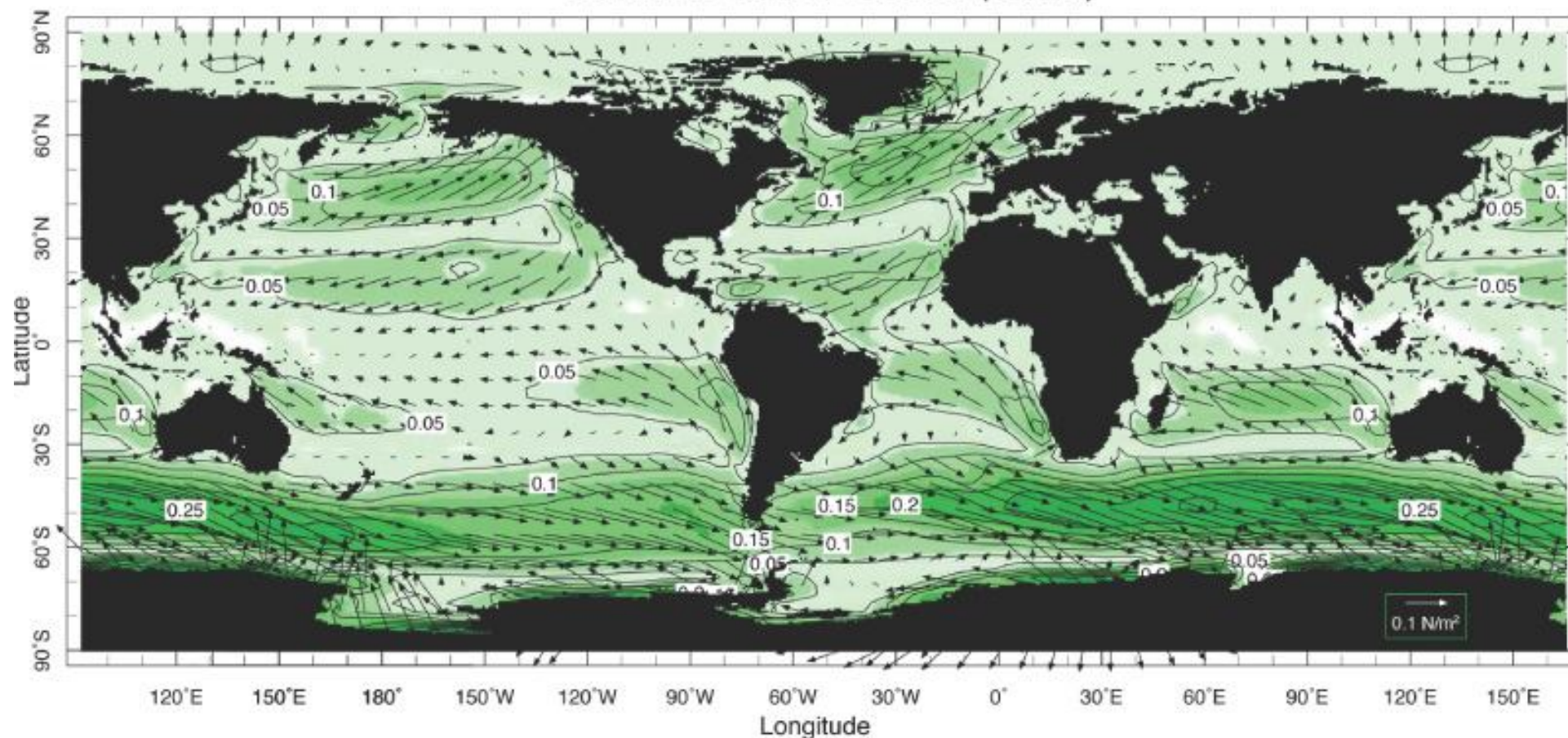
Глубины 600 – 800 м, ширина 80-150 миль.



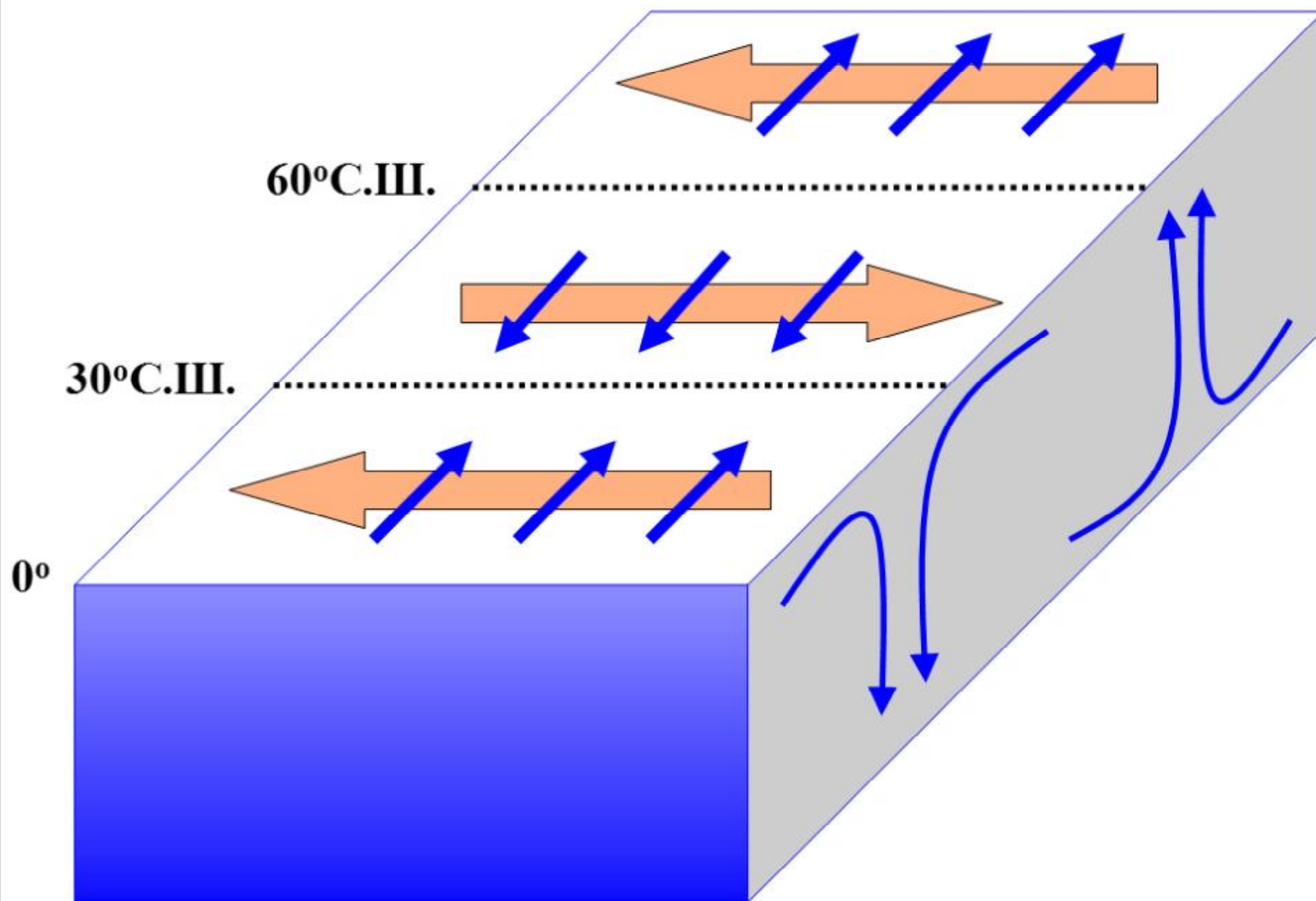
Среднегодовое напряжение трения ветра на поверхности океана

$$\vec{\tau} = C \rho_{\text{атм}} \vec{v} |\vec{v}|, \quad C \approx 0.0025$$

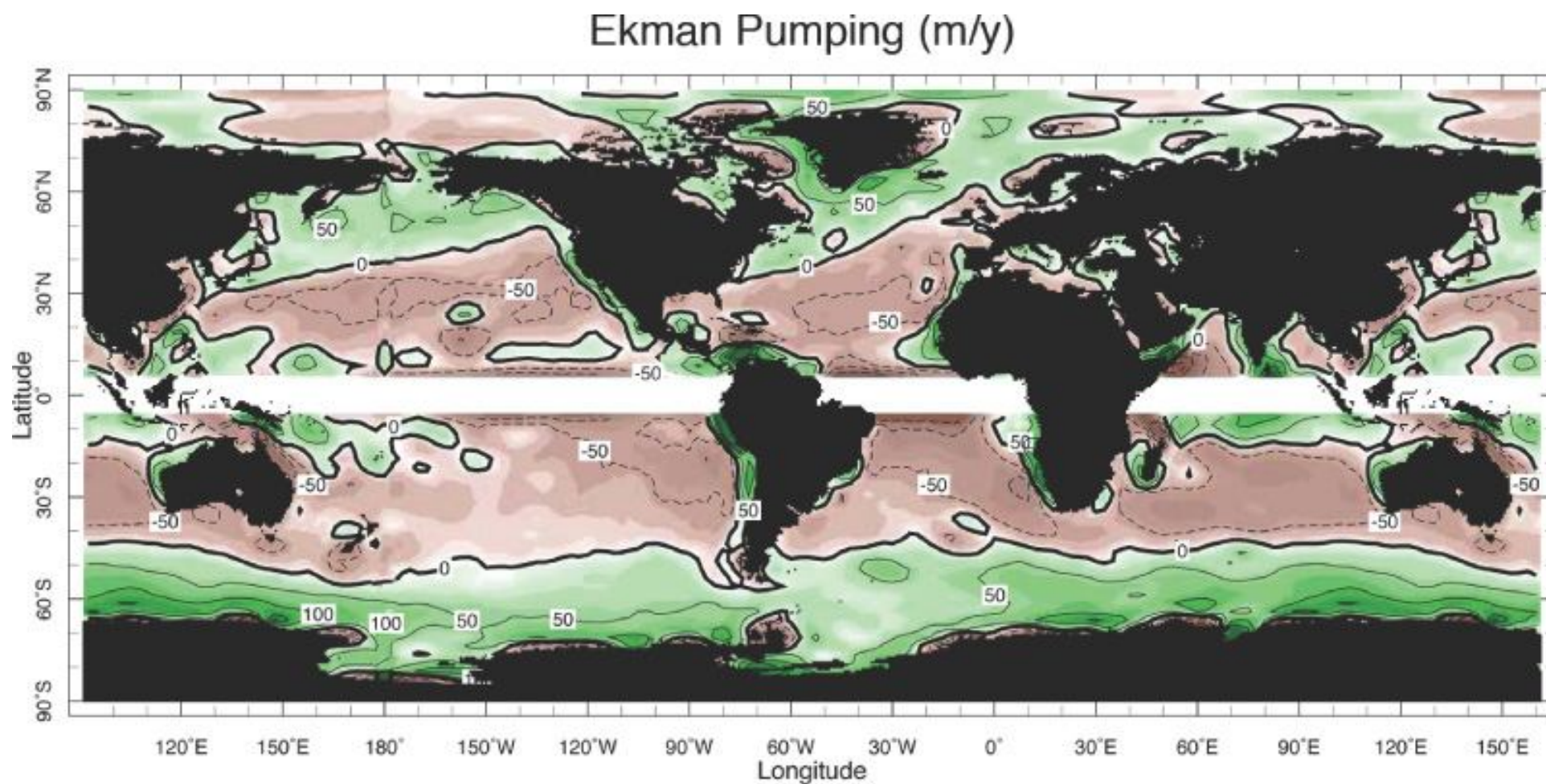
Surface Wind Stress (N/m²)



Экмановский «насос»



Вертикальная компонента скорости [м/год] - результат действия «насоса» Экмана (**поднятие**, **опускание**)



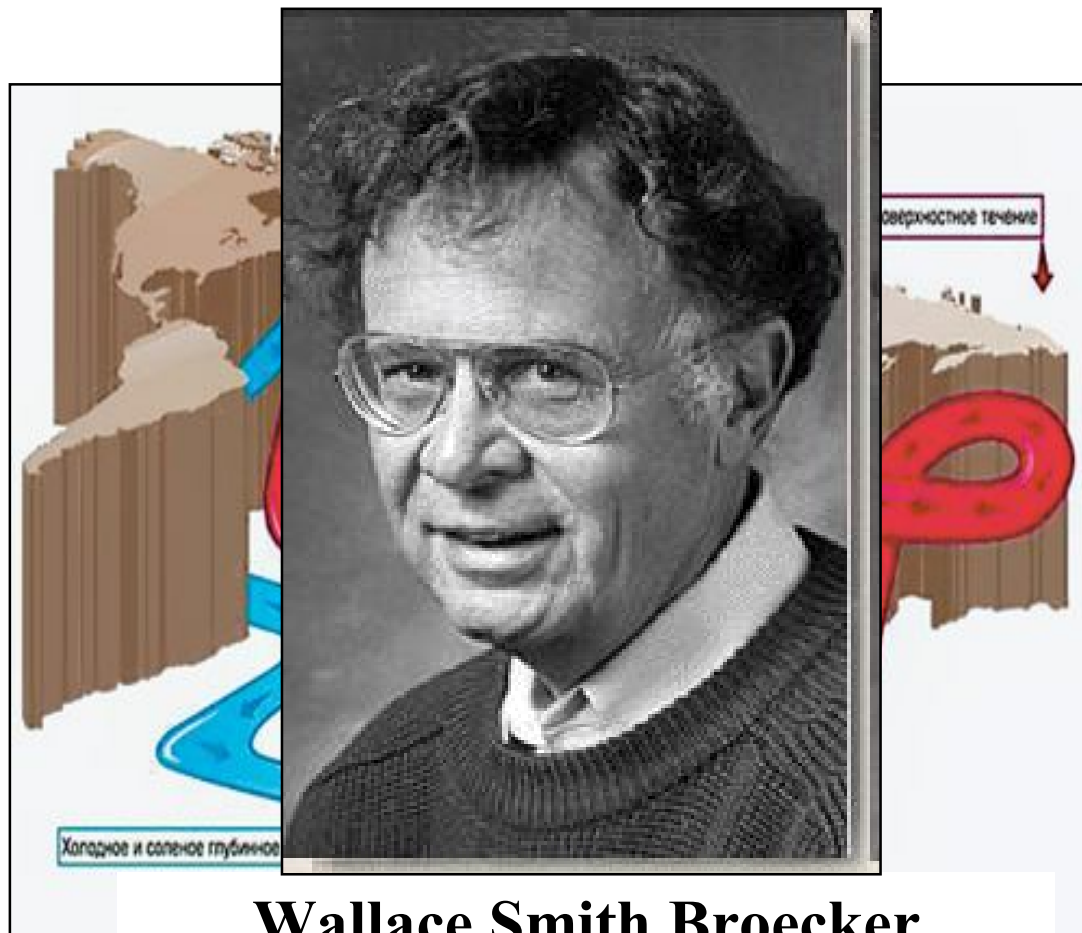
Глобальная межокеанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)



Сергей Сергеевич Лаппо

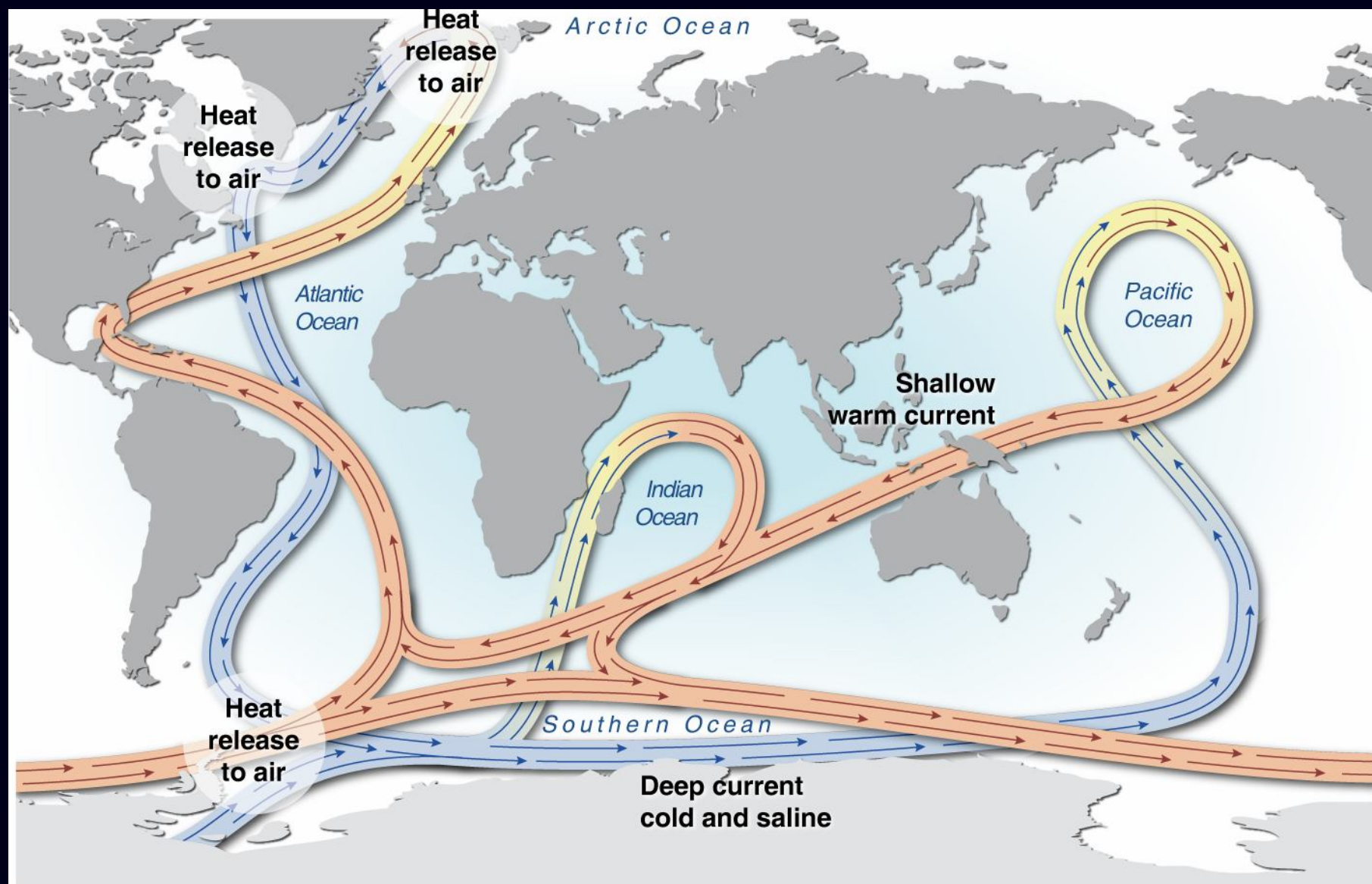
1938-2006

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»)

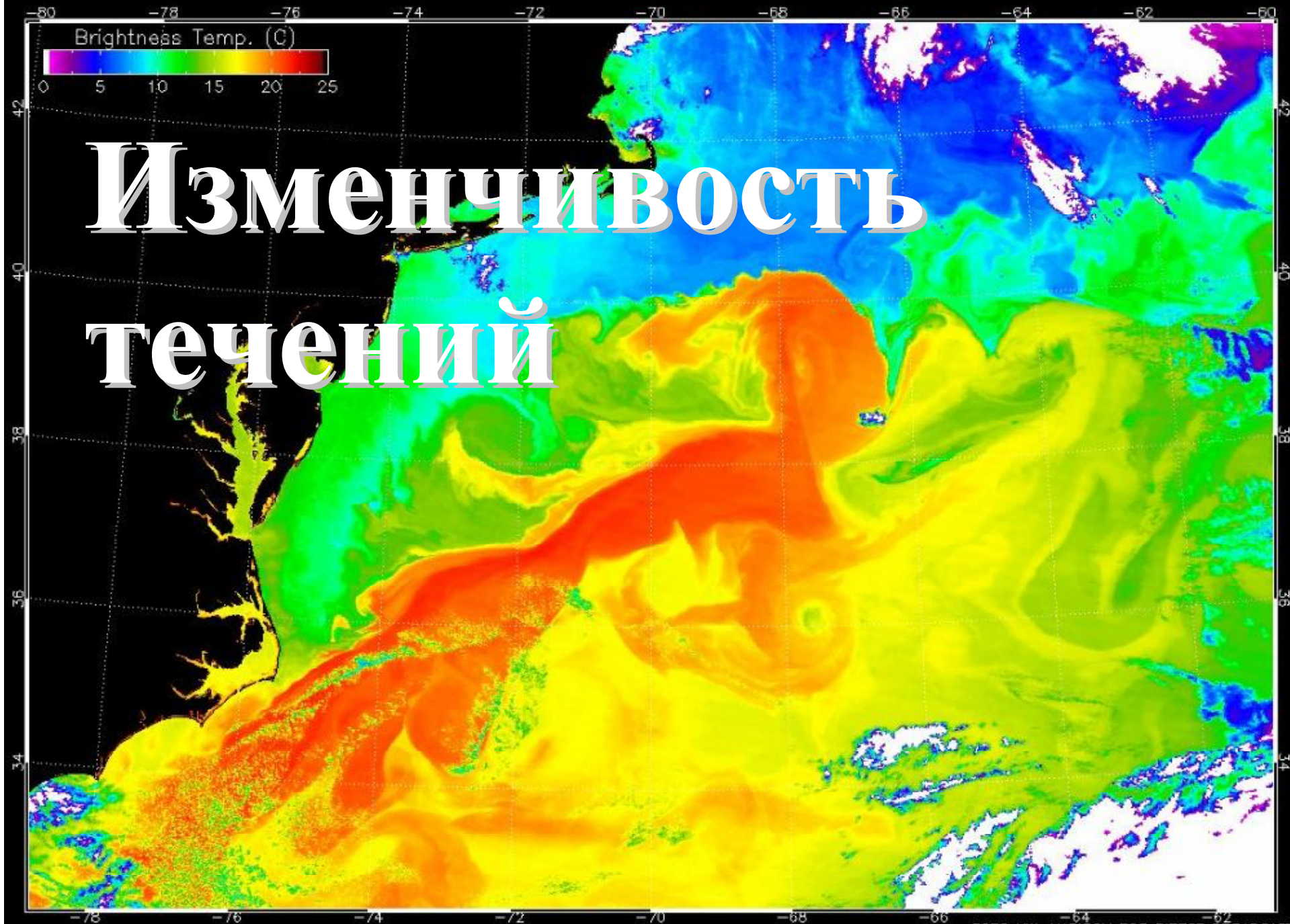


TERRA MODIS 2001-05-02 1543-1553 UTC Band 31 1KM: Gulf Stream

Brightness Temp. (C)



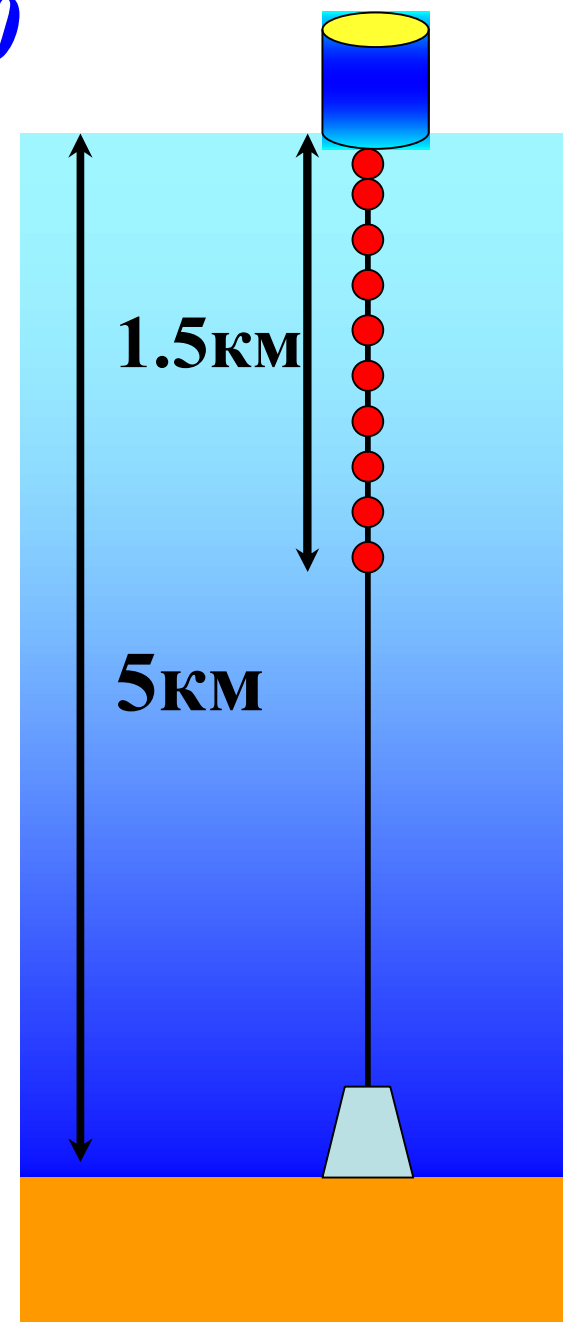
Изменчивость течений



SSEC UW-MADISON EOS DIRECT BROADCAST

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

