

Геофизика

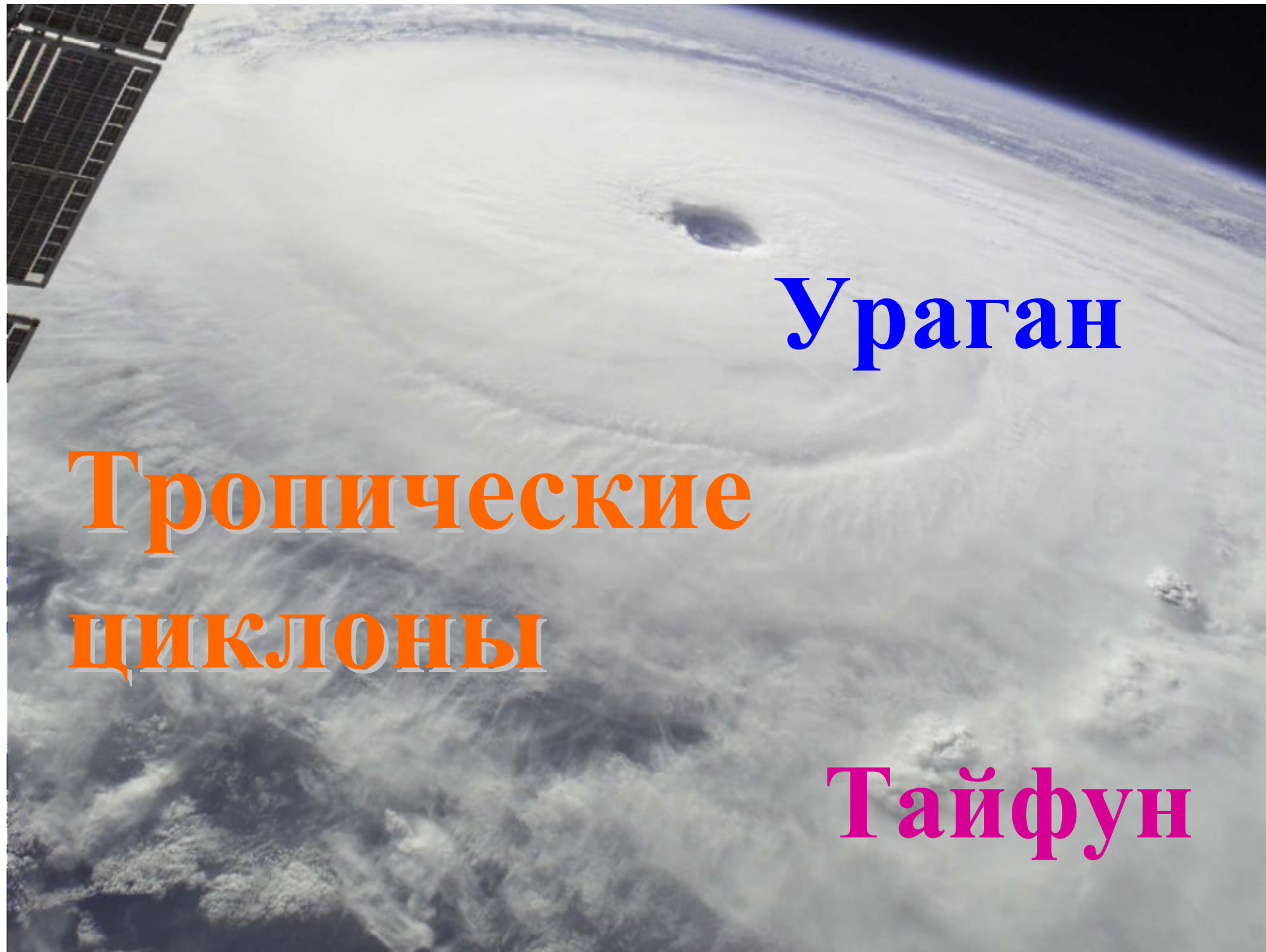


2023 Лекция №10

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

<http://ocean.phys.msu.ru/courses/geo/>



Ураган

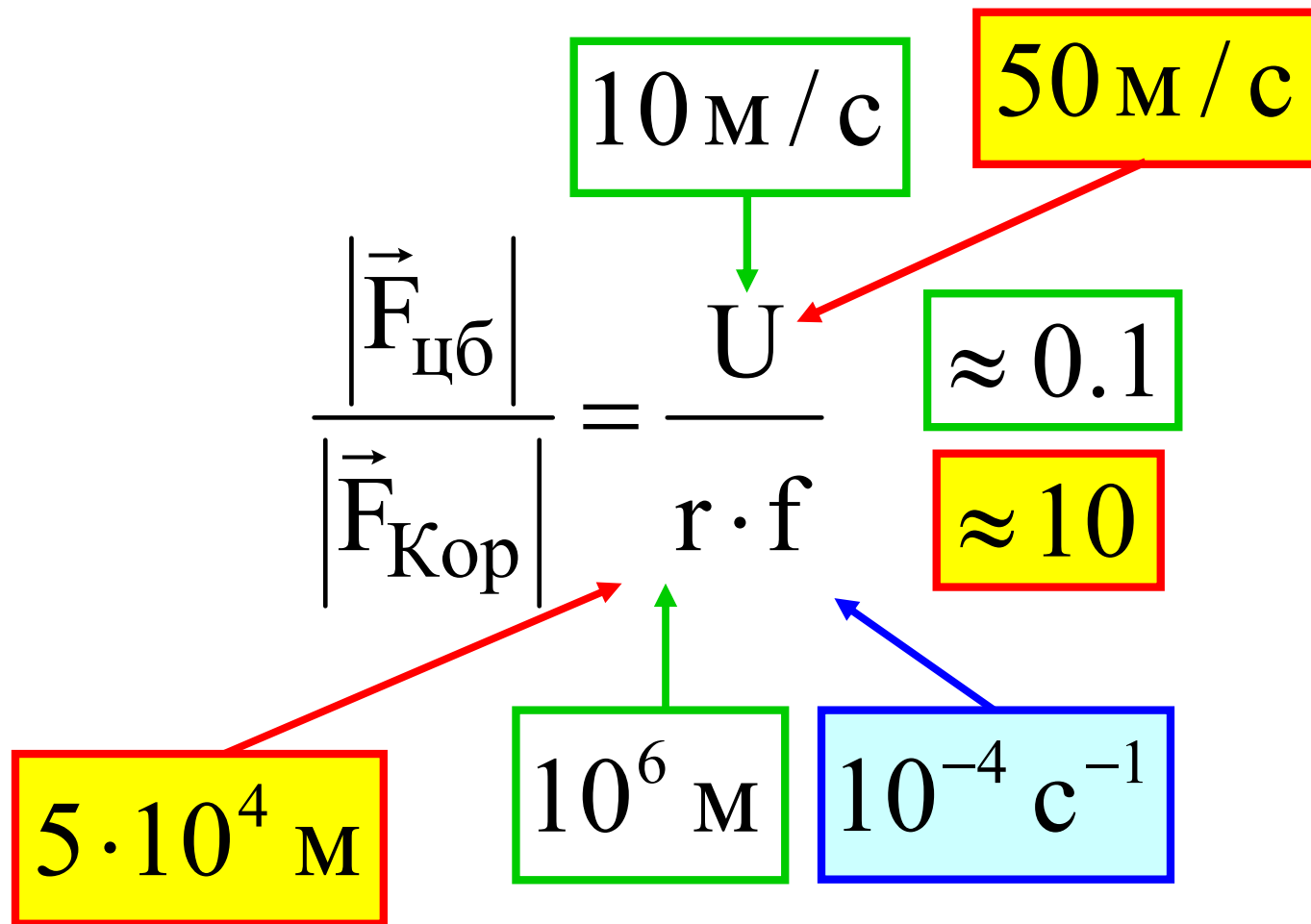
Тропические
ЦИКЛОНЫ

Тайфун

Роль и значимость центробежной силы

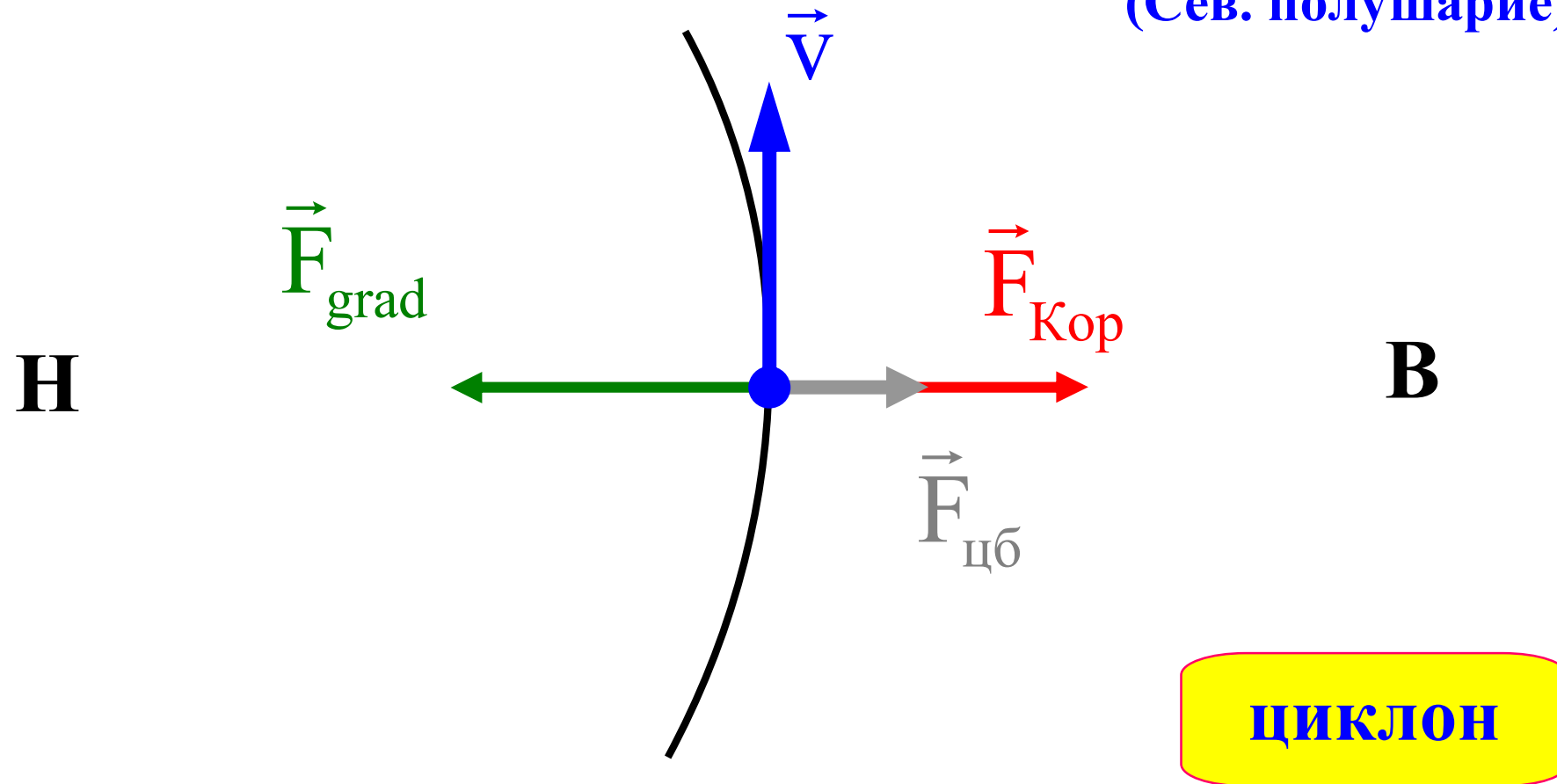
$$|\vec{F}_{\text{цб}}| = \frac{U^2}{r}$$

$$|\vec{F}_{\text{Кор}}| = |f \cdot U|$$



Роль и значимость центробежной силы

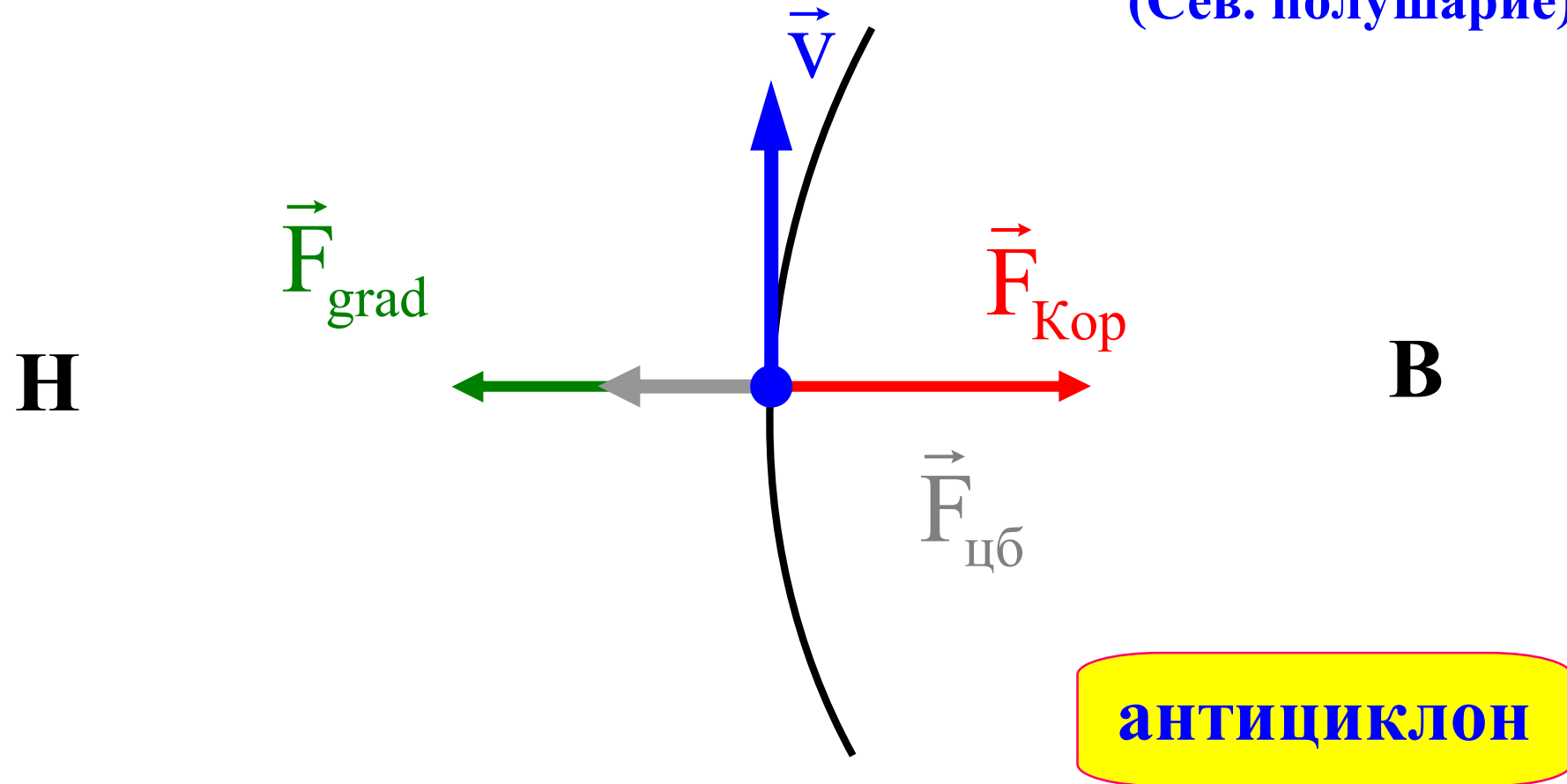
(Сев. полушарие)



$$\left| \vec{F}_{\text{grad}} \right| = \left| \vec{F}_{\text{Кор}} \right| + \left| \vec{F}_{\text{цб}} \right|$$

Роль и значимость центробежной силы

(Сев. полушарие)



$$\left| \vec{F}_{\text{grad}} \right| = \left| \vec{F}_{\text{Кор}} \right| - \left| \vec{F}_{\text{цб}} \right|$$

Роль и значимость центробежной силы

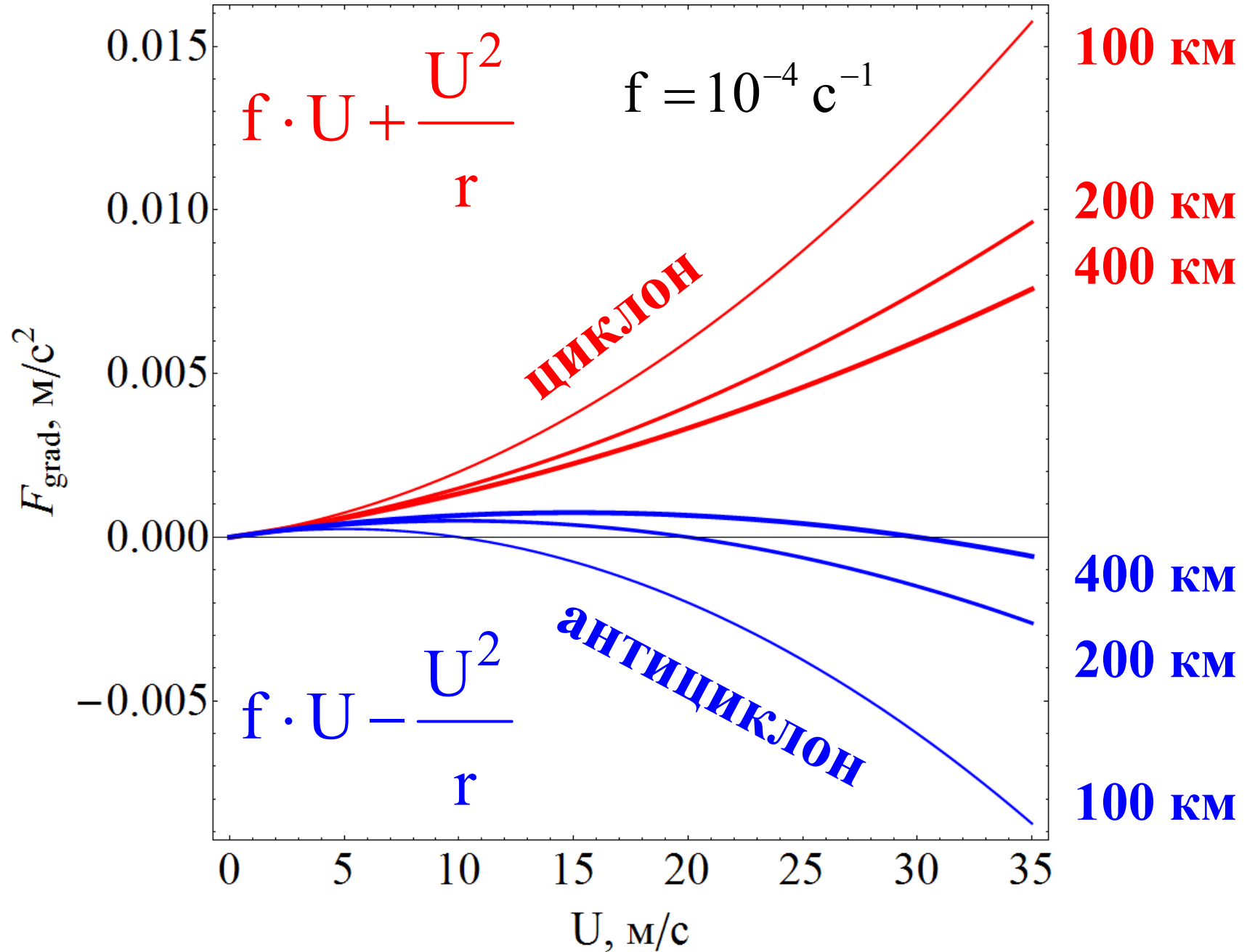
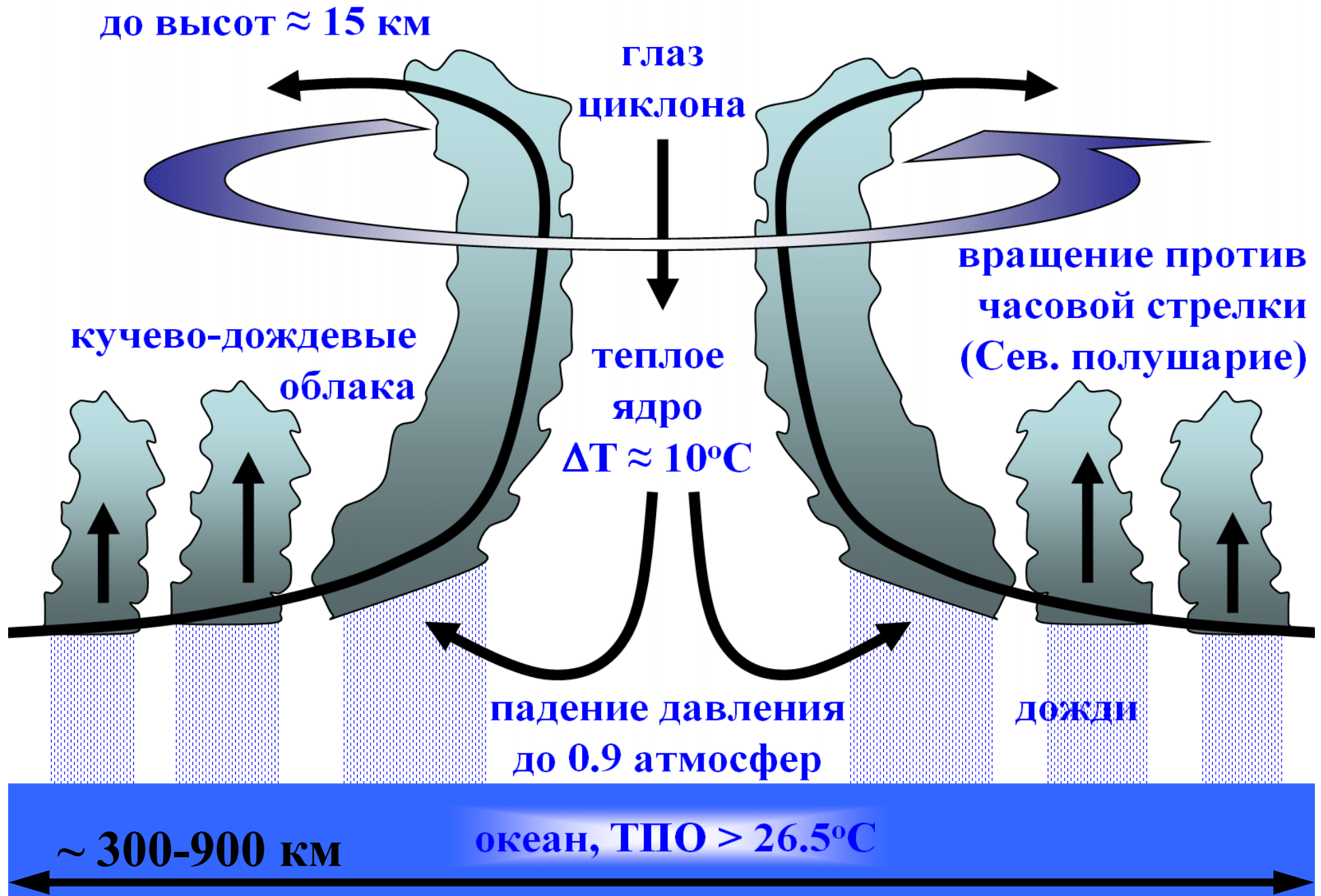
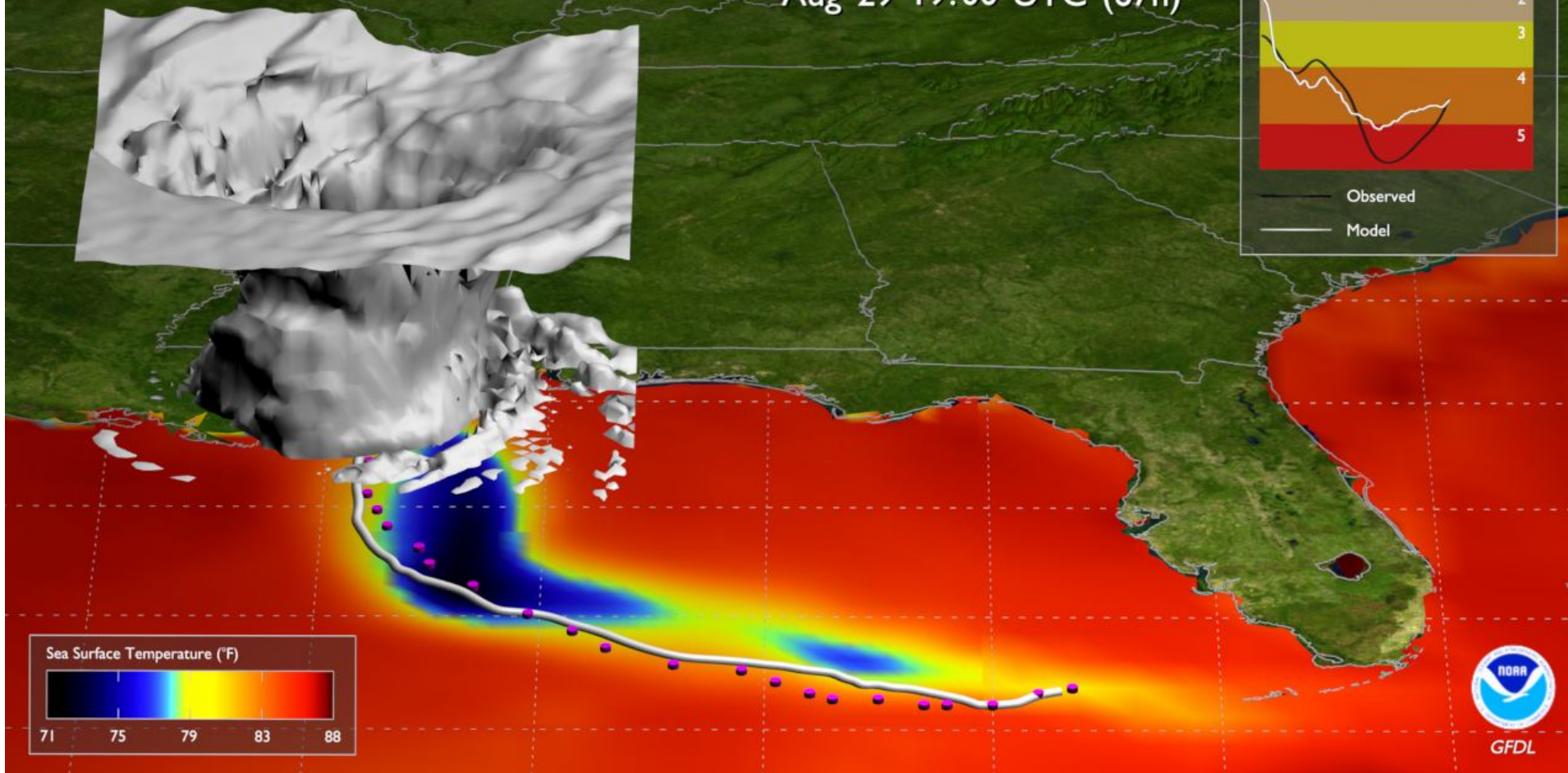


Схема тропического циклона



Hurricane Katrina Coupled Model Forecast

Aug 29 19:00 UTC (67h)

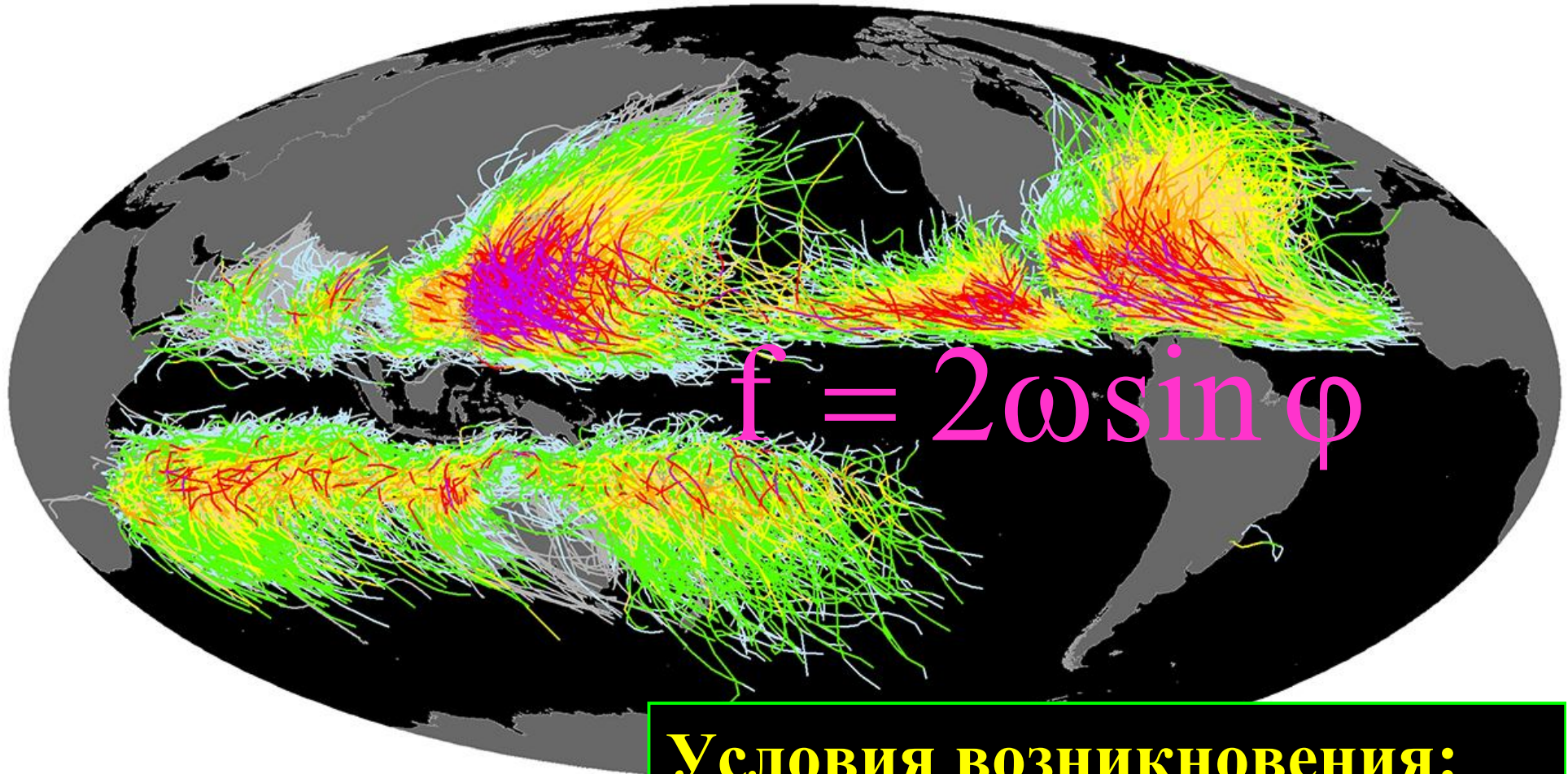


положительная обратная связь:

«скорость ветра –

поток явного и скрытого тепла с пов-ти океана»

Треки всех известных тропических циклонов

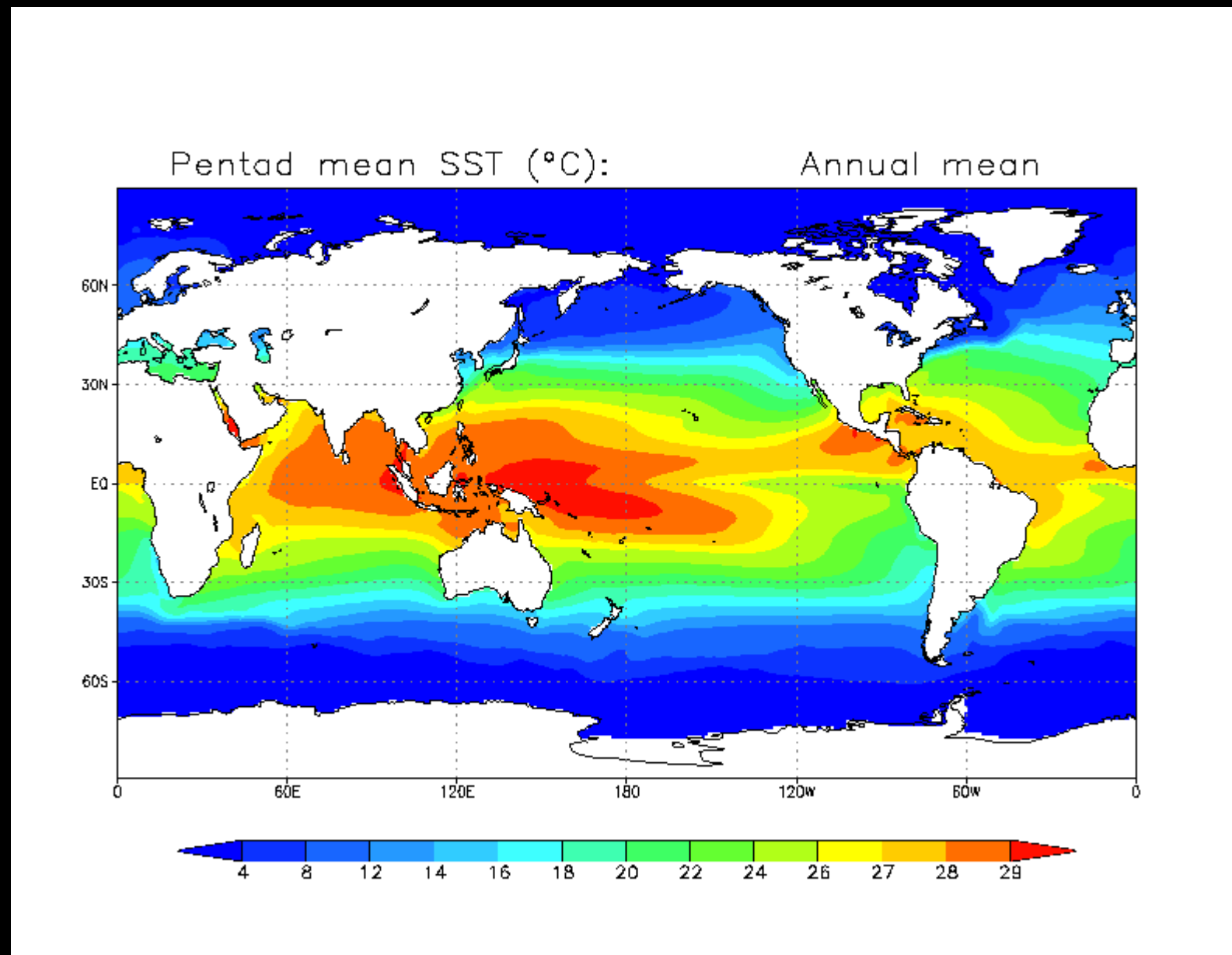


The International Best Track Archive
(IBTrACS) stores global tropical cyc

Условия возникновения:

- широты выше $5-10^\circ$
- ТПО $> 26.5^\circ\text{C}$

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:

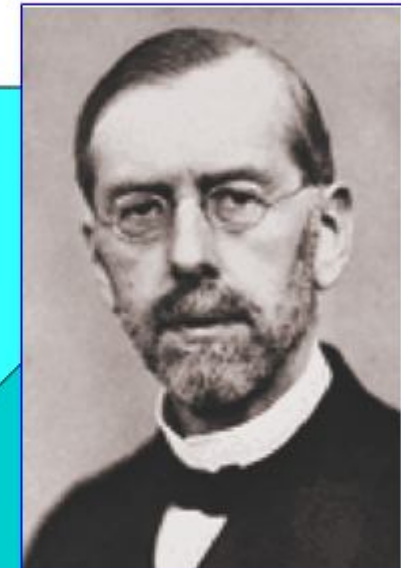
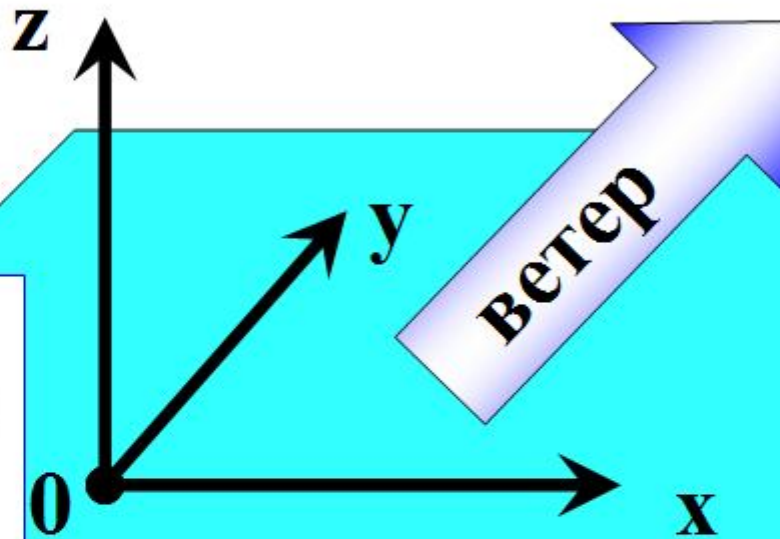
- Ветер («...сделан из металла...»)
- Дожди (0.5 м за сутки и более)
- Волны (до 30 м)
- Штормовые нагоны

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: течение стационарно,
однородно и безгранично по горизонтали:**

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**уравнение гидростатики
для дальнейшего решения
не требуется**

Задача Экмана для океана бесконечной глубины

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

Граничные условия:

поверхность ($z = 0$) *большая глубина ($z = -\infty$)*

$$u_z = 0$$

напряжение
трения ветра

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

$$v_z = \frac{\tau}{\rho \nu}$$

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Решение: спираль Экмана

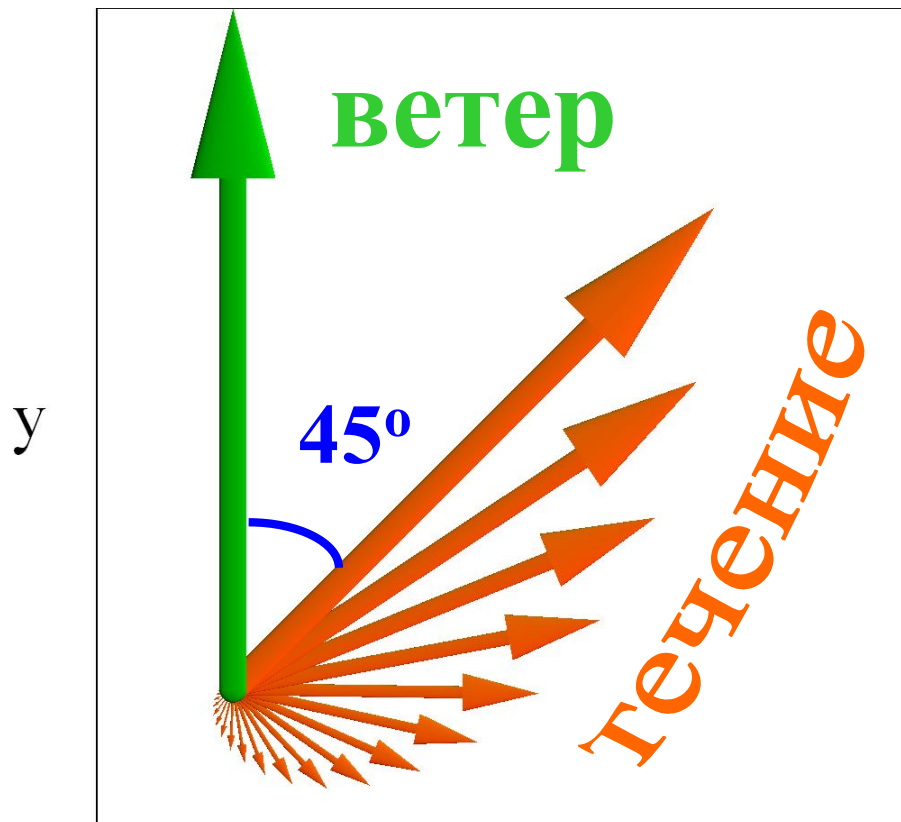
$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

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

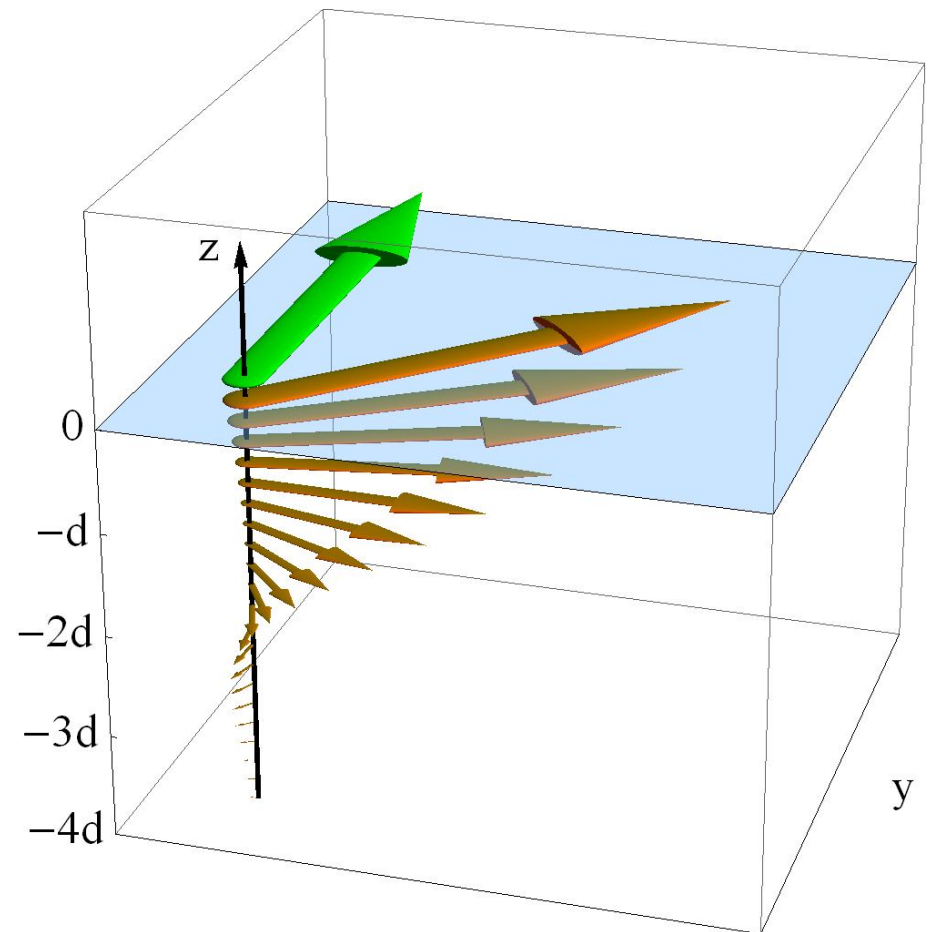
глубина
Экмана

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

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



x



x

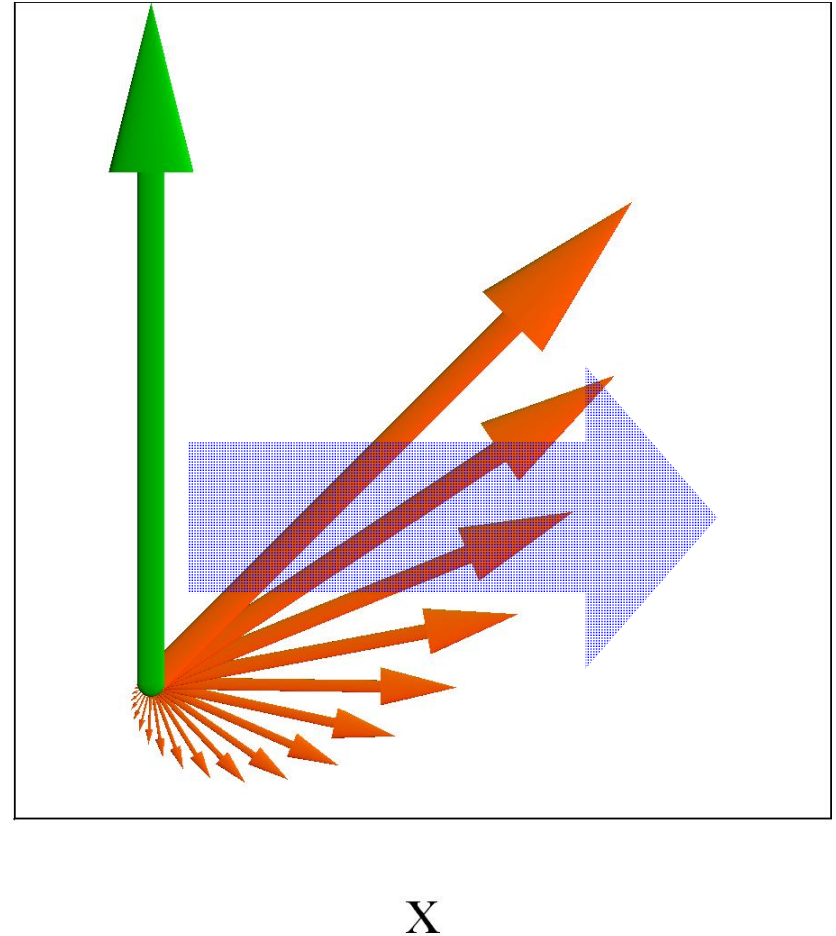
Направление интегрального переноса вод

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

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

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

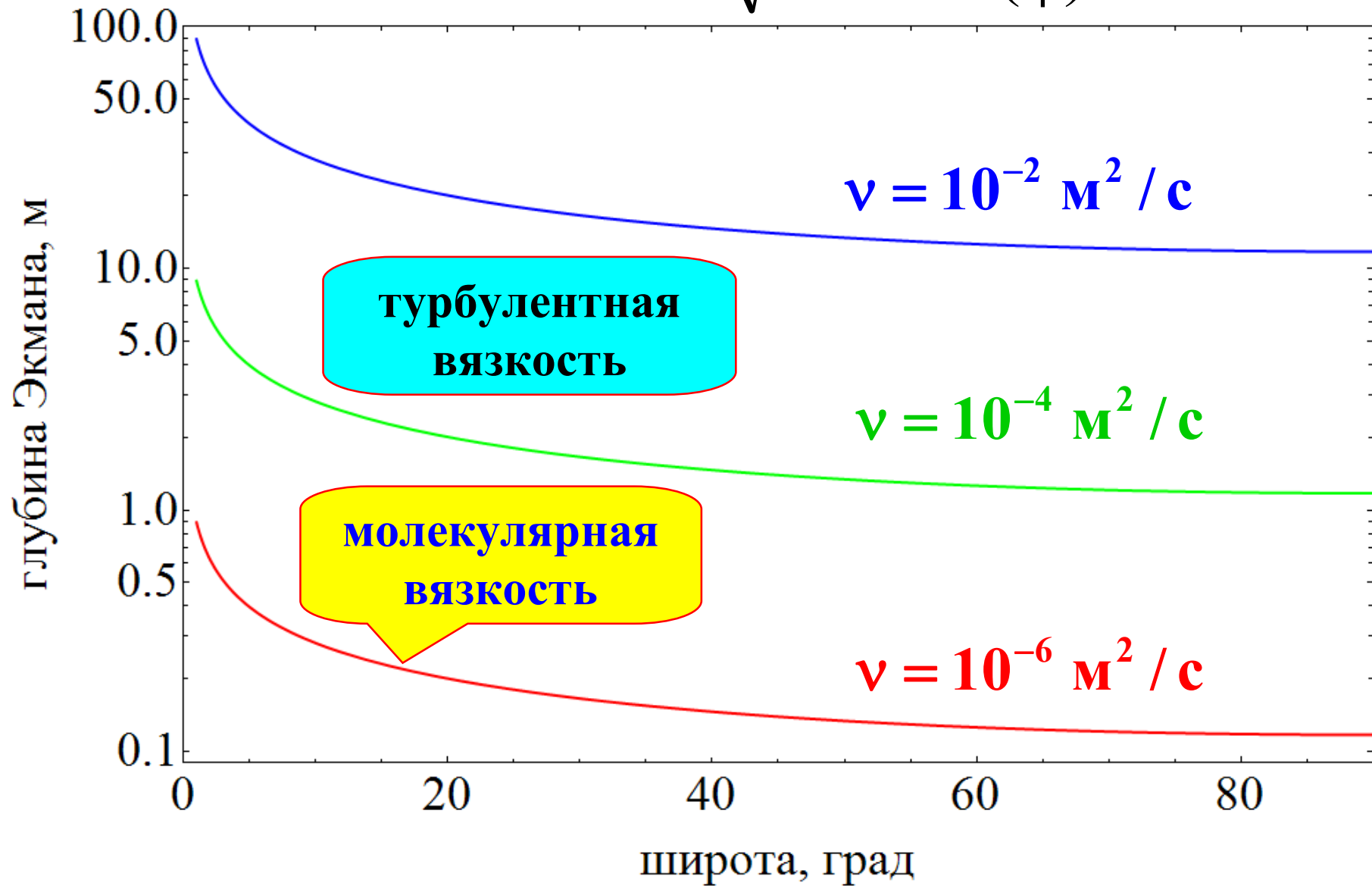
$$\int_{-\infty}^0 v(z) dz = 0$$



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

Глубина Экмана

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



Задача Экмана для океана **конечной** глубины

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

Граничные условия:

поверхность ($z = 0$)

дно ($z = -H$)

$$u_z = 0$$

напряжение
трения ветра

$$v_z = \frac{\tau}{\rho \nu}$$

$$u(-H) = 0$$

$$v(-H) = 0$$

Задача Экмана для океана конечной глубины

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

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

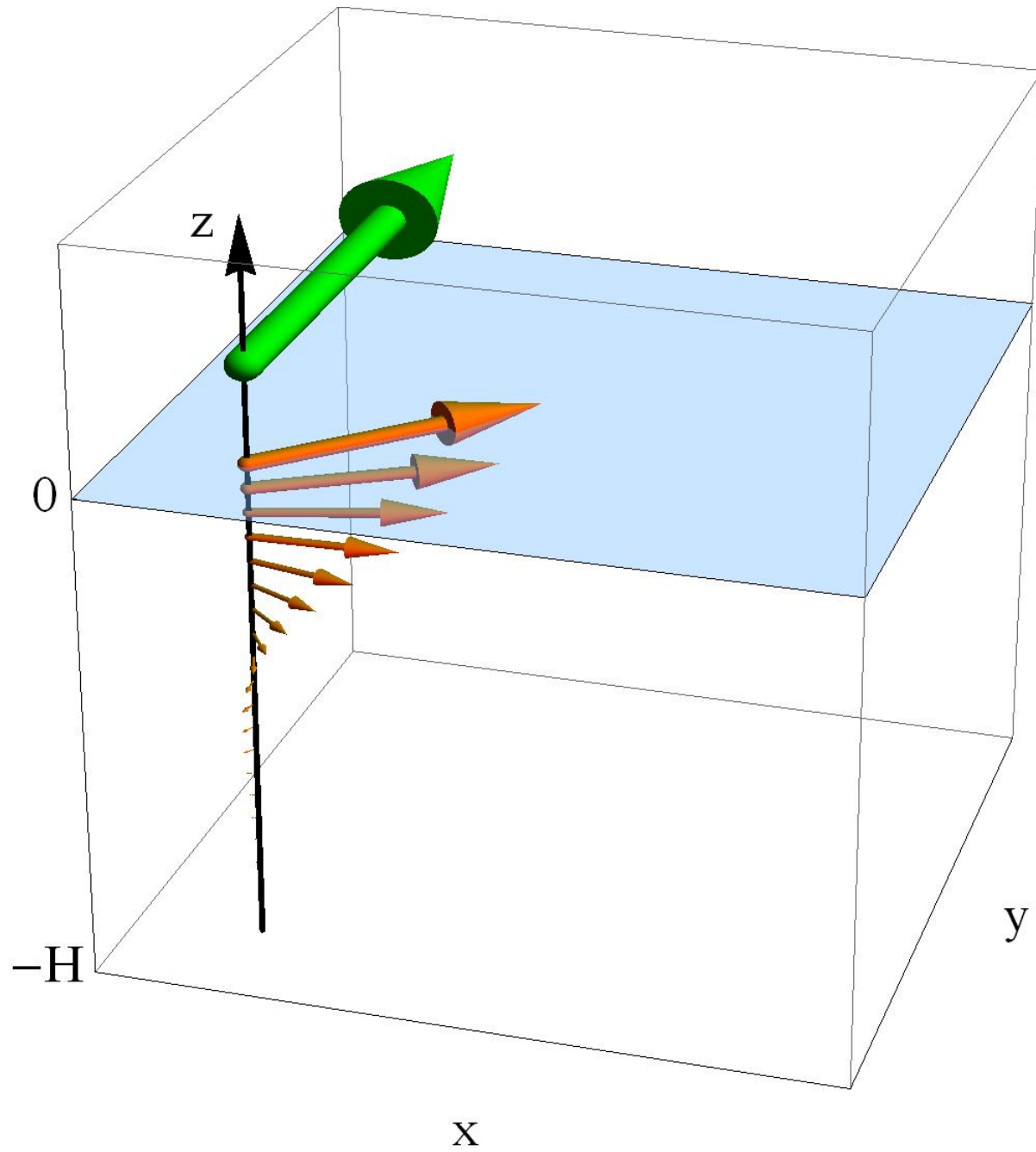
$$Z'|_{z=0} = u' + i v' = i \frac{\tau}{\rho \nu}$$

**граничное
условие на
поверхности**

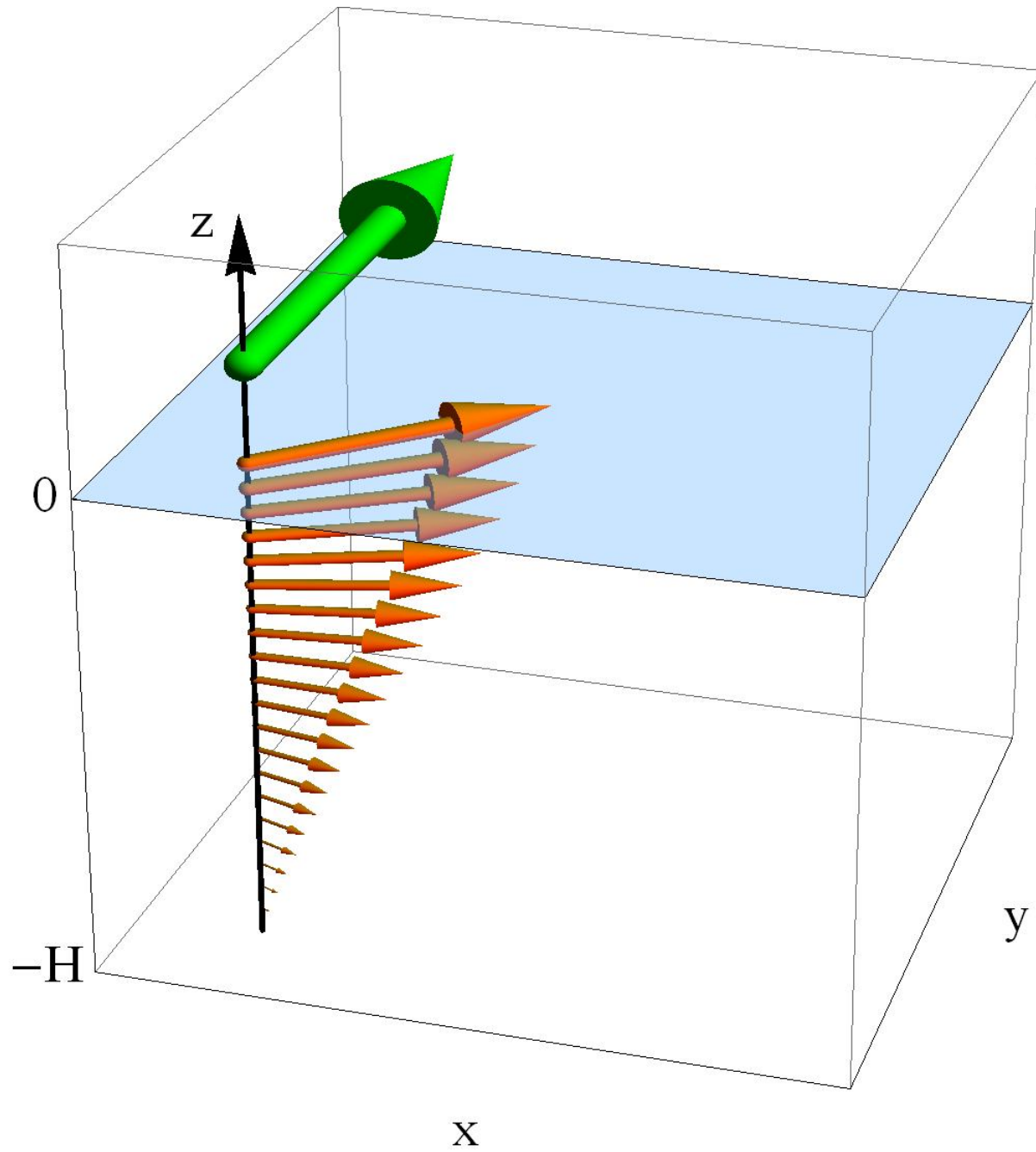
$$Z|_{z=-H} = u + i v = 0$$

**граничное
условие на дне**

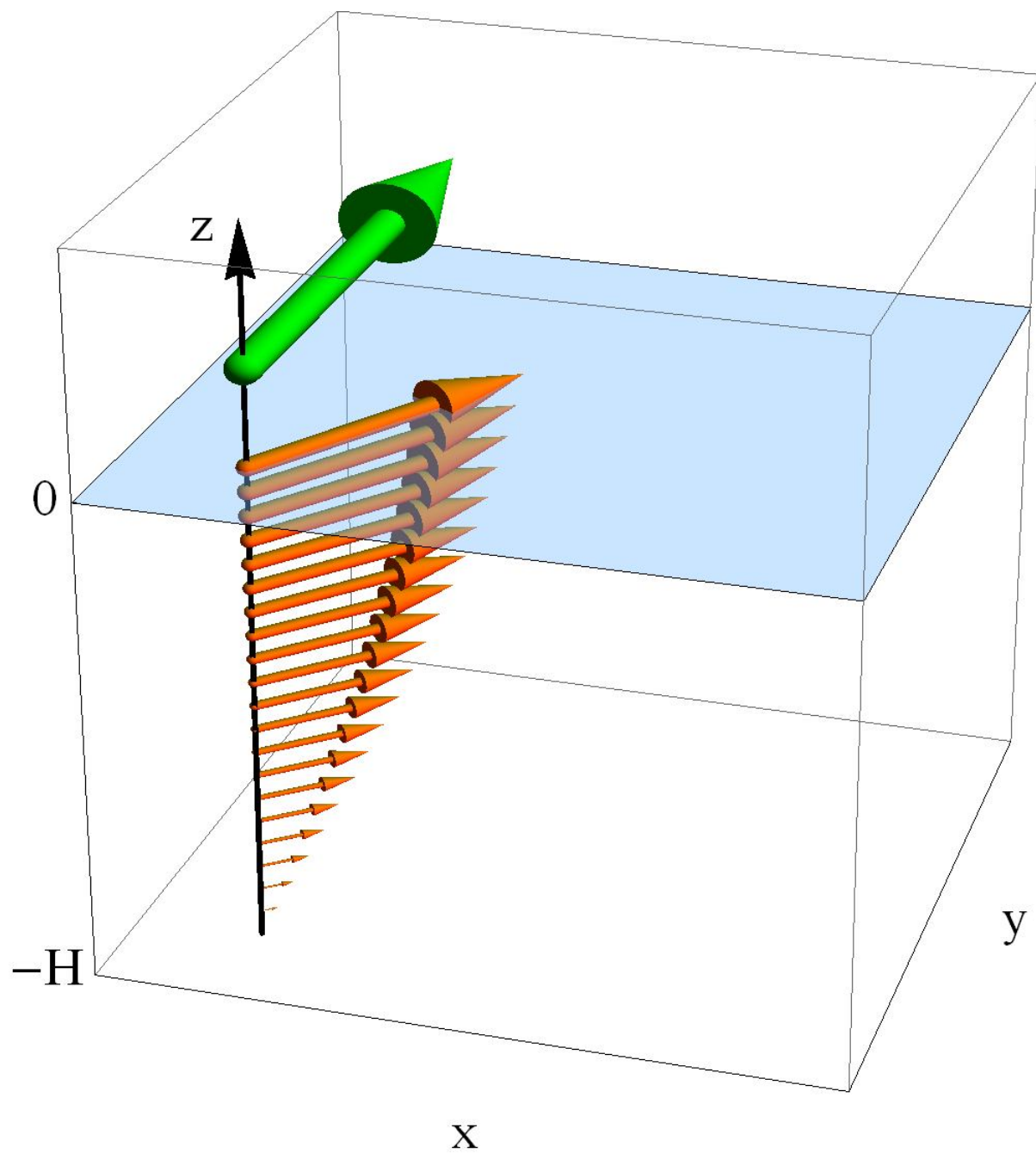
$$H=5d$$



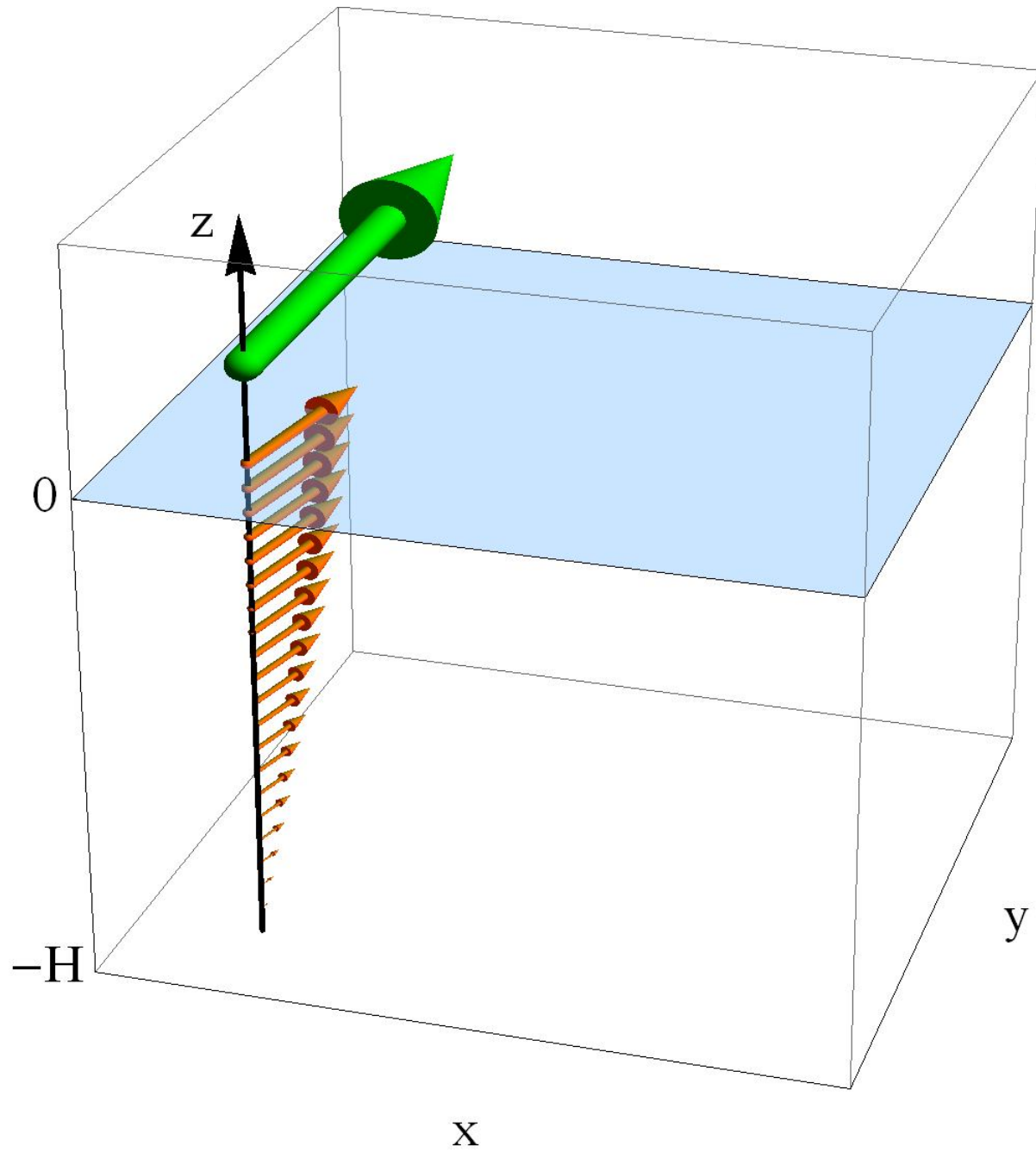
$$H=2d$$



$$H=d$$



$H=0.5d$



Общая циркуляция атмосферы и океана



Местные ветры

Бриз

Муссон

день

лето



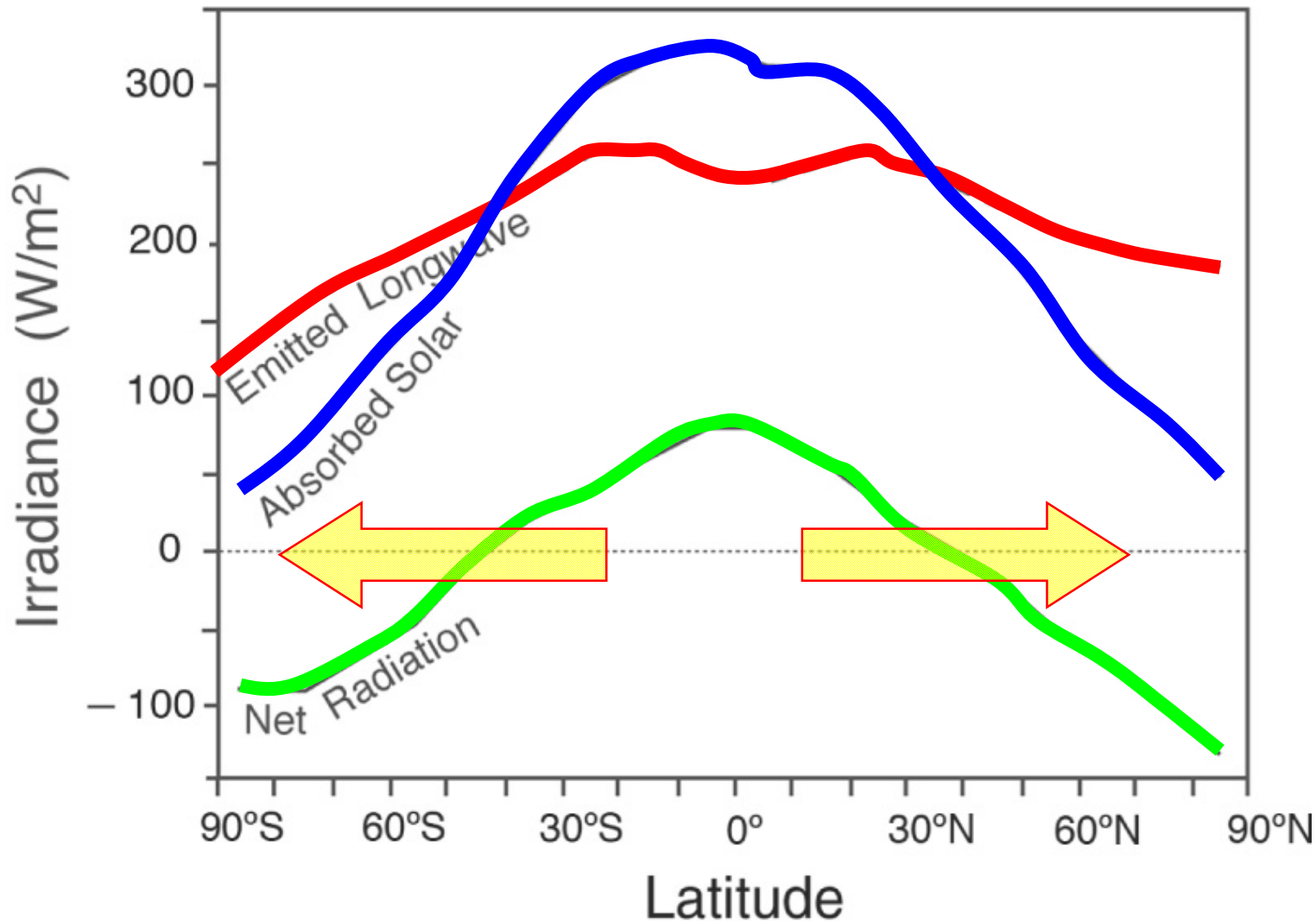
Существуют и другие местные ветры

ночь

зима

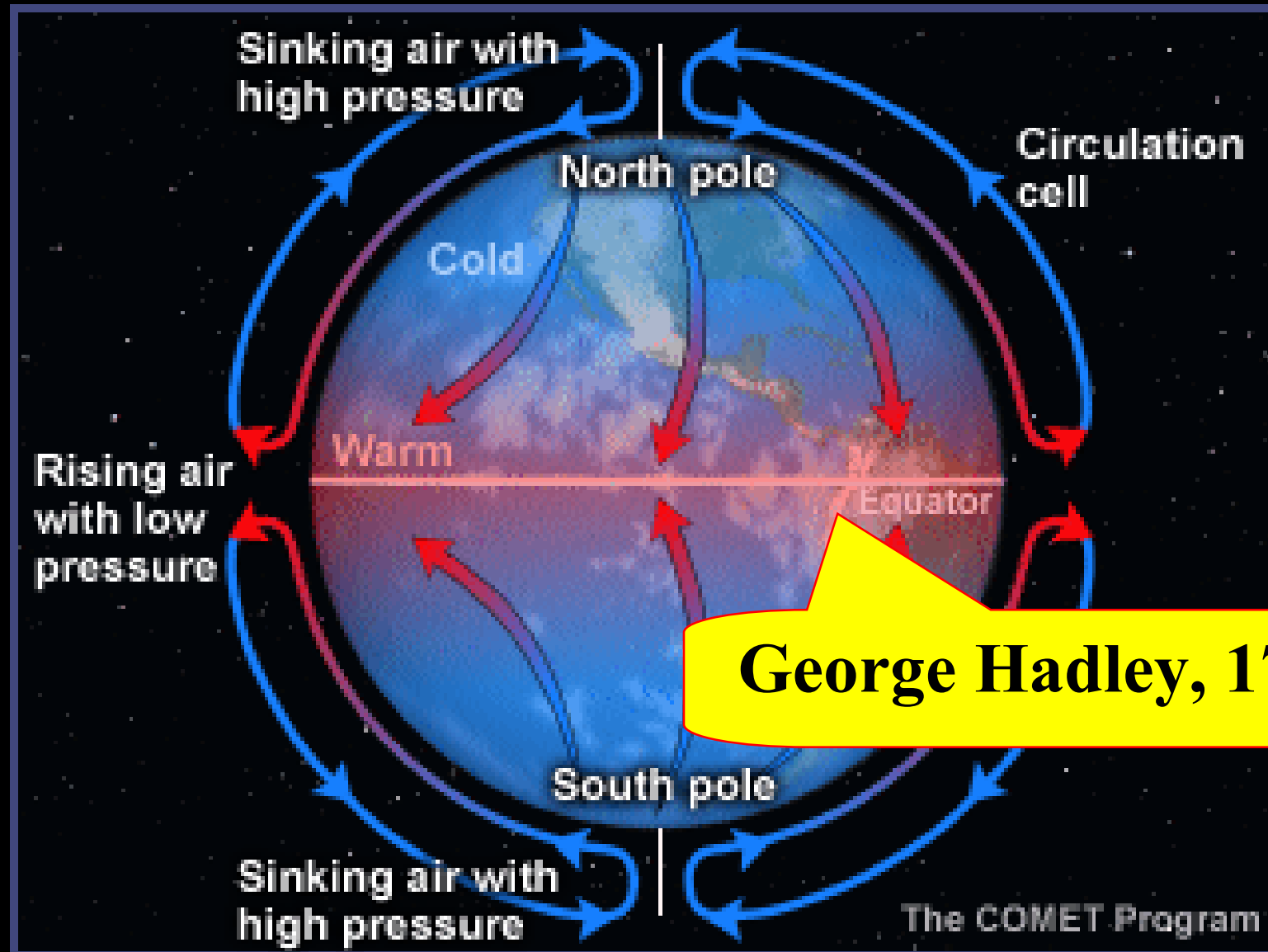


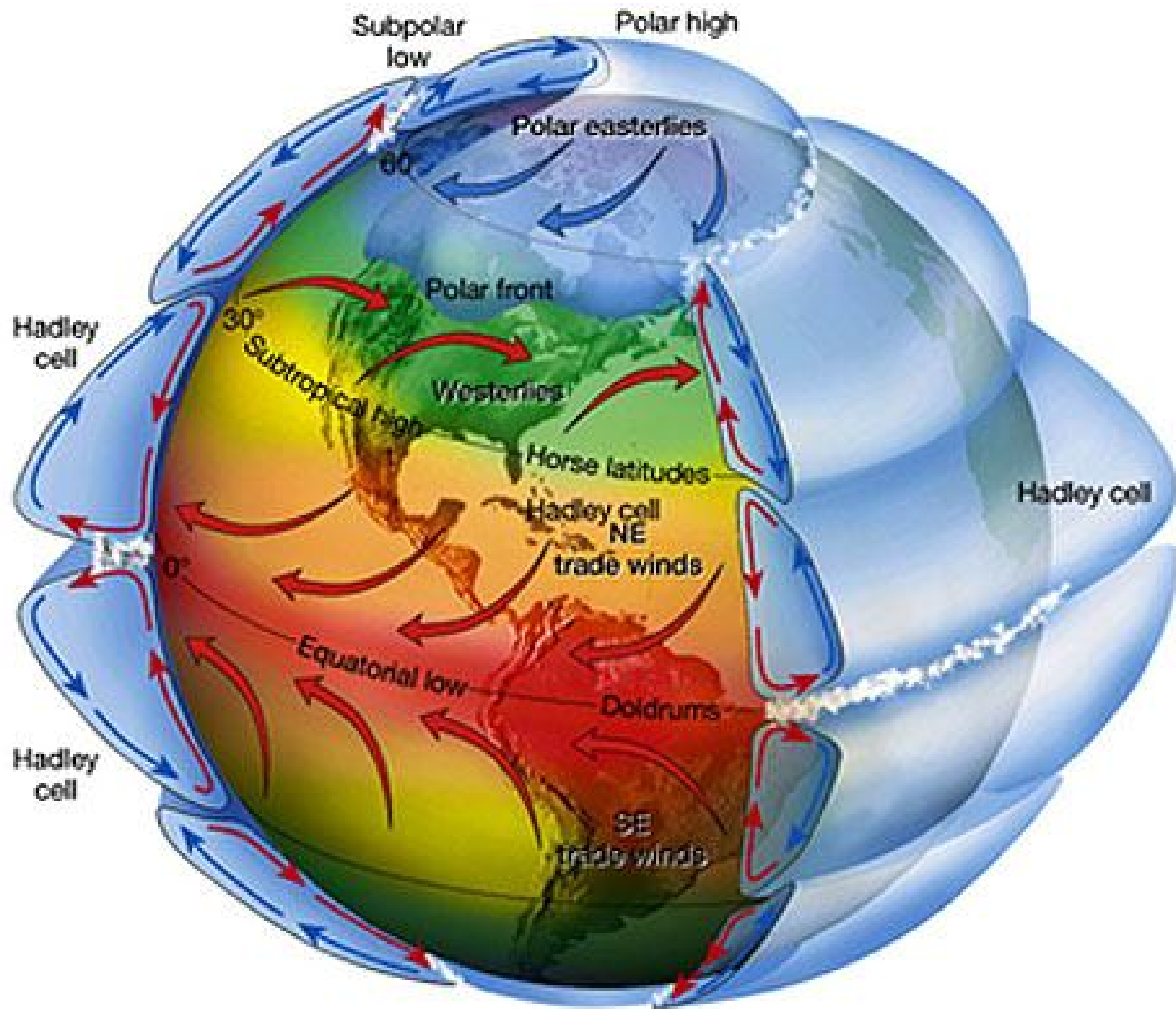
**Среднегодовые широтные распределения радиации ($\text{Вт}/\text{м}^2$):
поглощенной солнечной, излученной длинноволновой
и их разница**



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**



**Полярная
ячейка**

**Ячейка
Ферреля**

**Ячейка
Гадлея**

**Слабый
восточный
перенос**

**Западный
перенос**

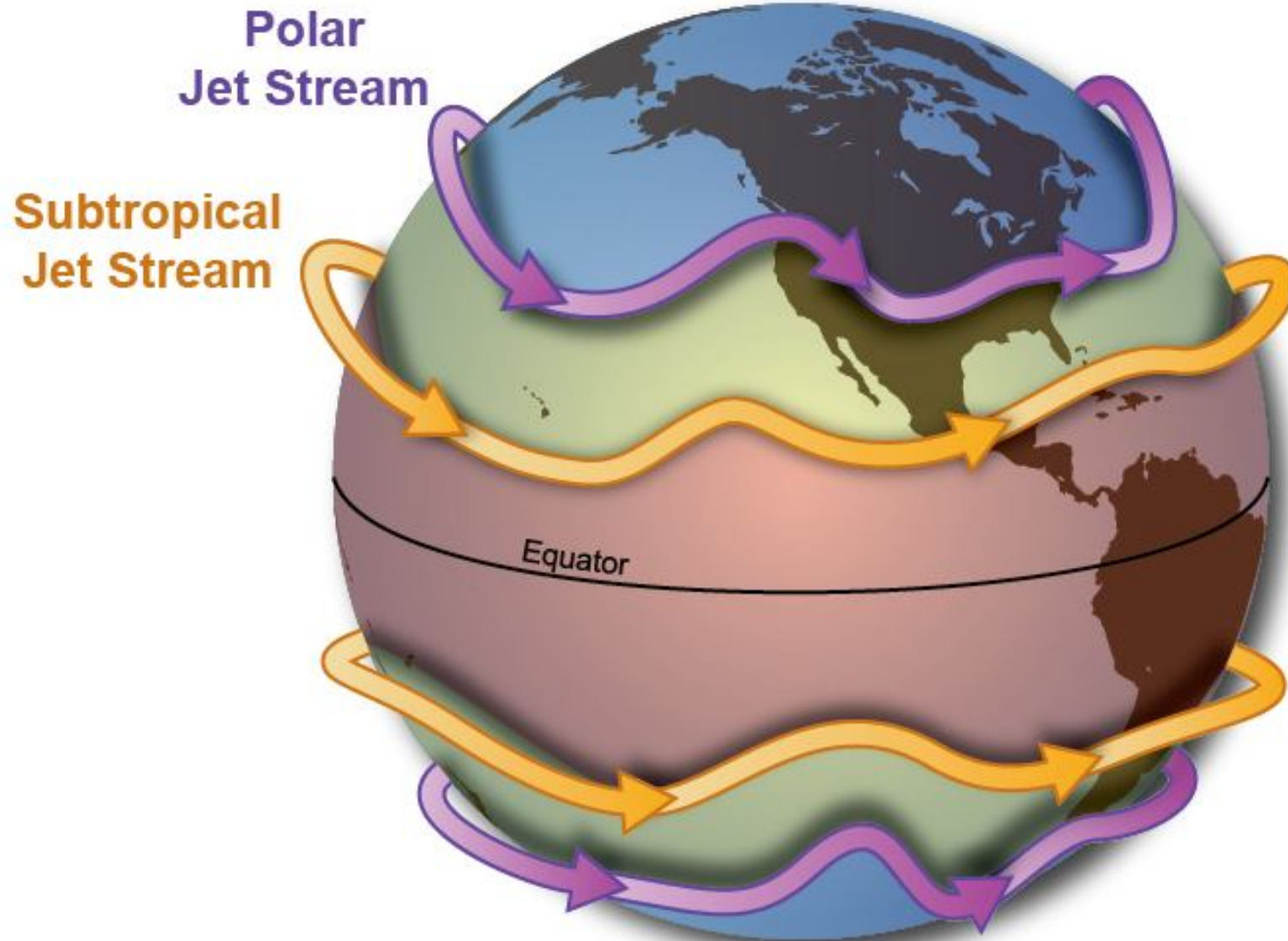
**Зона
пассатов**

**Пояс низкого
давления**

**Конские
широты**

**Внутритропическая
зона конвергенции**

Струйные течения

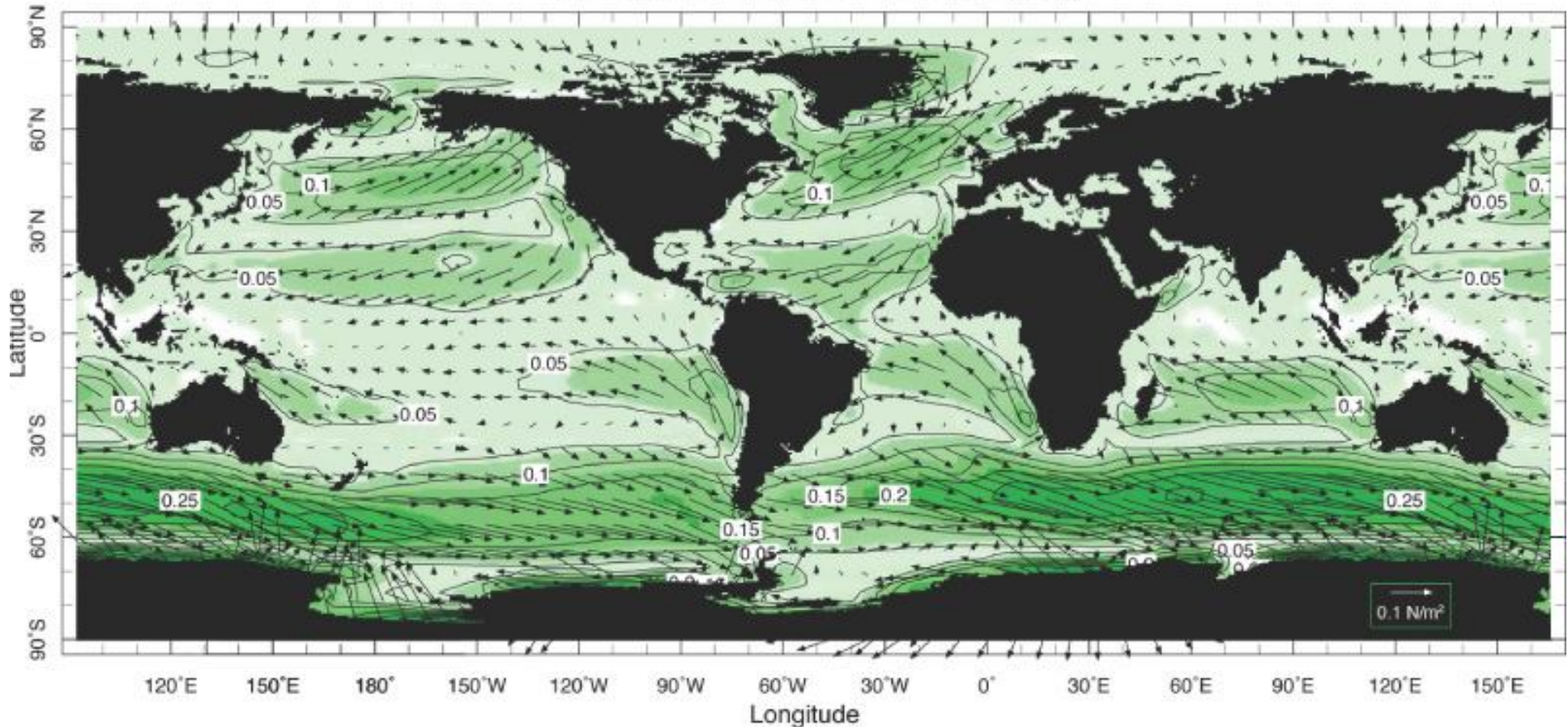


Напряжения трения ветра, действующее на поверхность океана

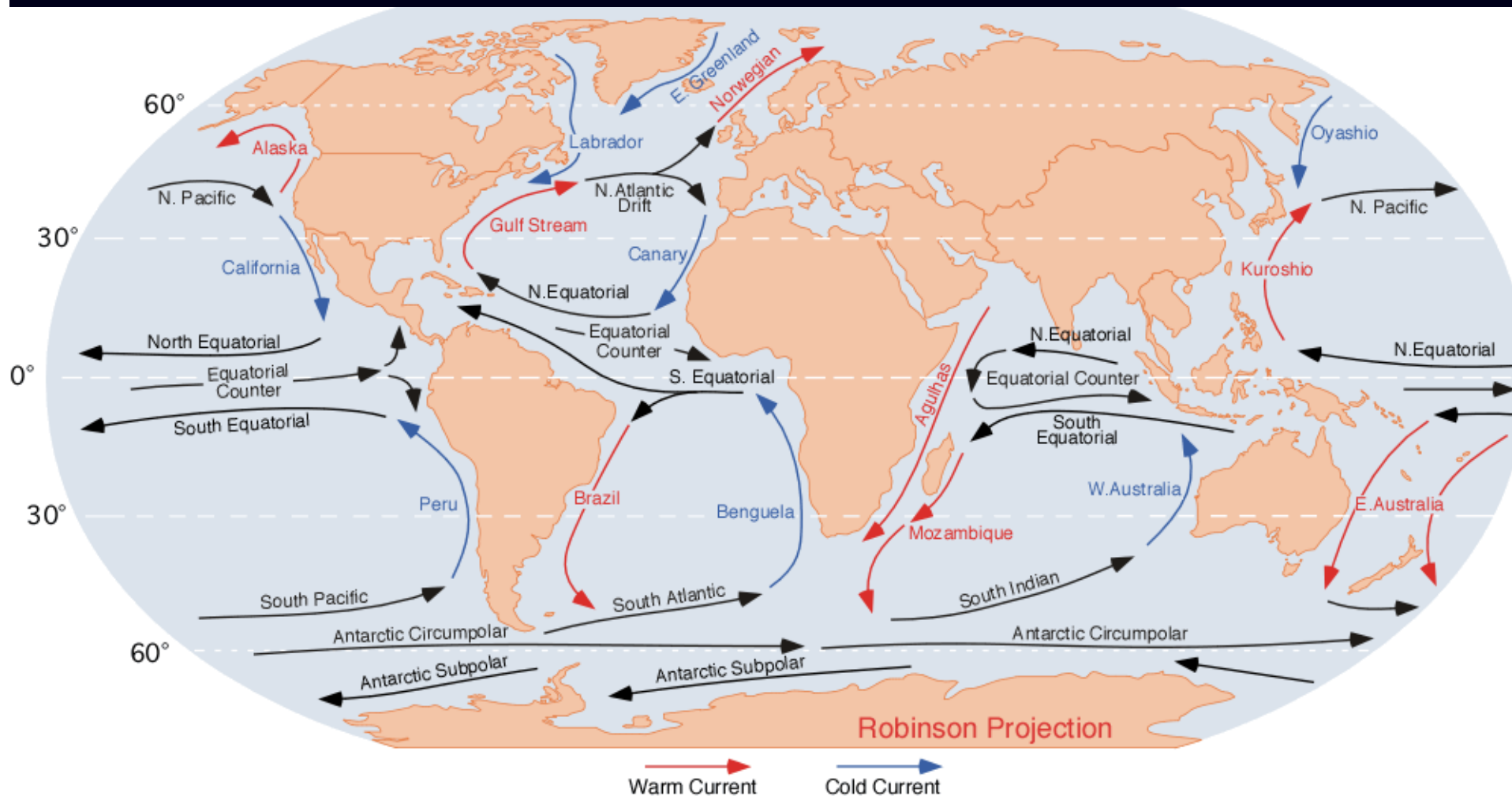
$$\vec{\tau} = C \rho_{\text{атм}} \left| \vec{V} \right| \vec{V}, \quad C \approx 0.0025$$

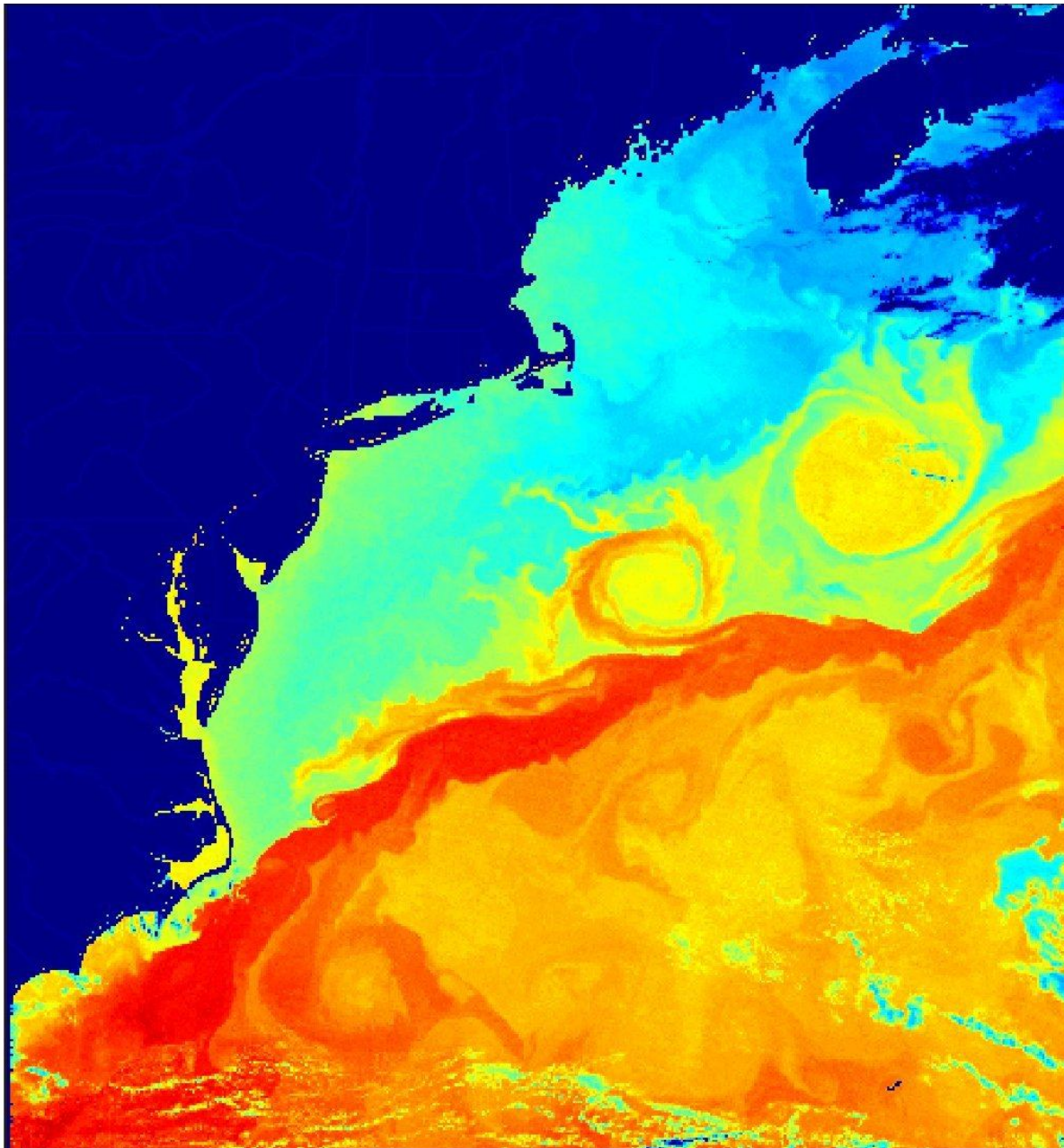
Среднегодовое распределение напряжения трения ветра (Н/м²)

Surface Wind Stress (N/m²)



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

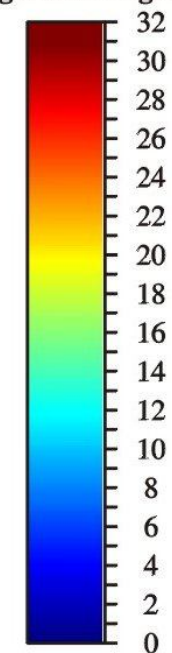
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

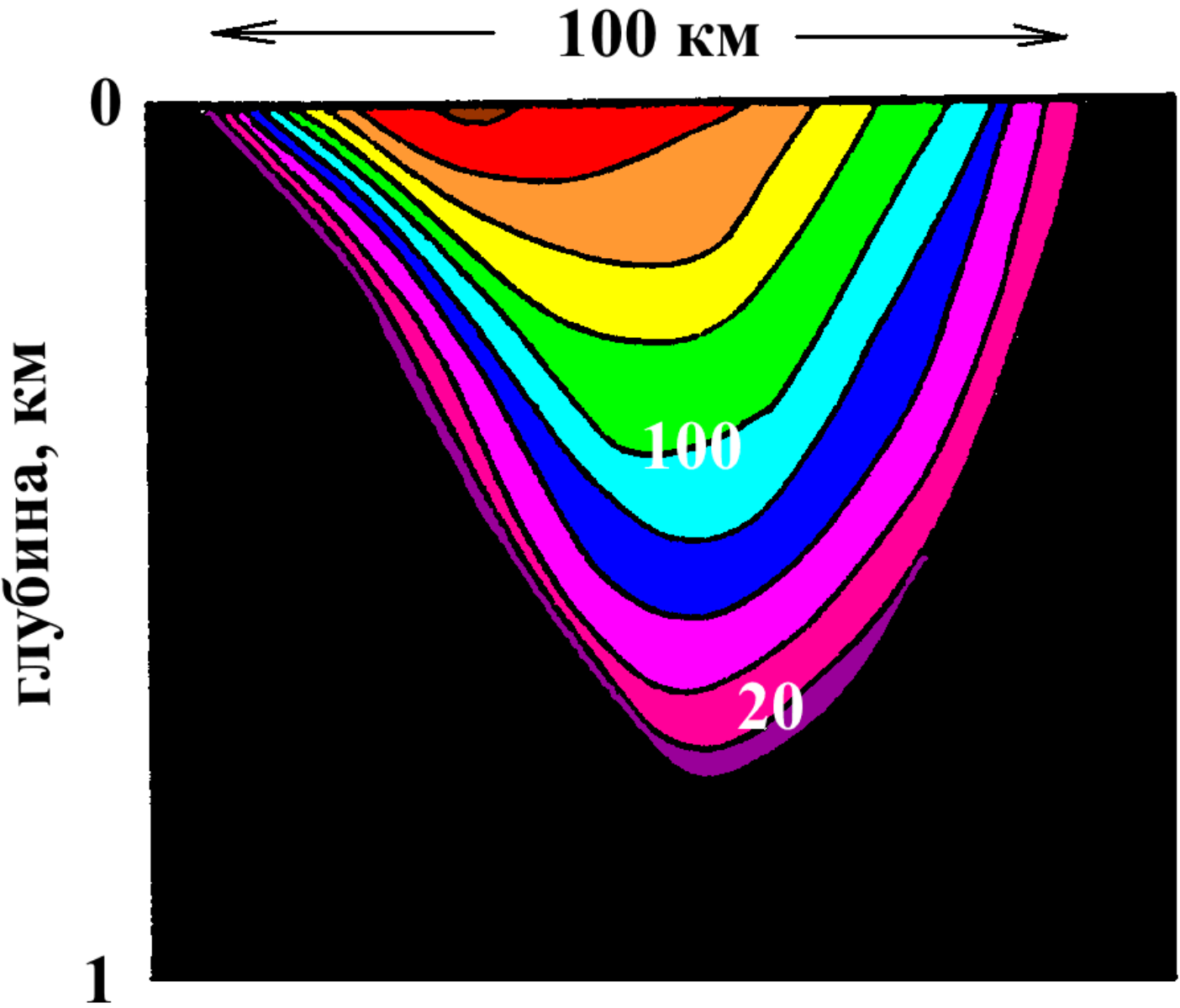
Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

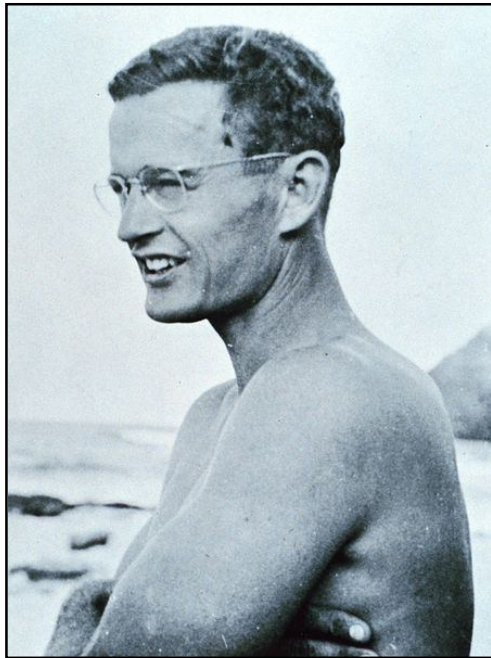
Surface Temperature (Degrees Centigrade)



Вертикальная структура течения Гольфстрим



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



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

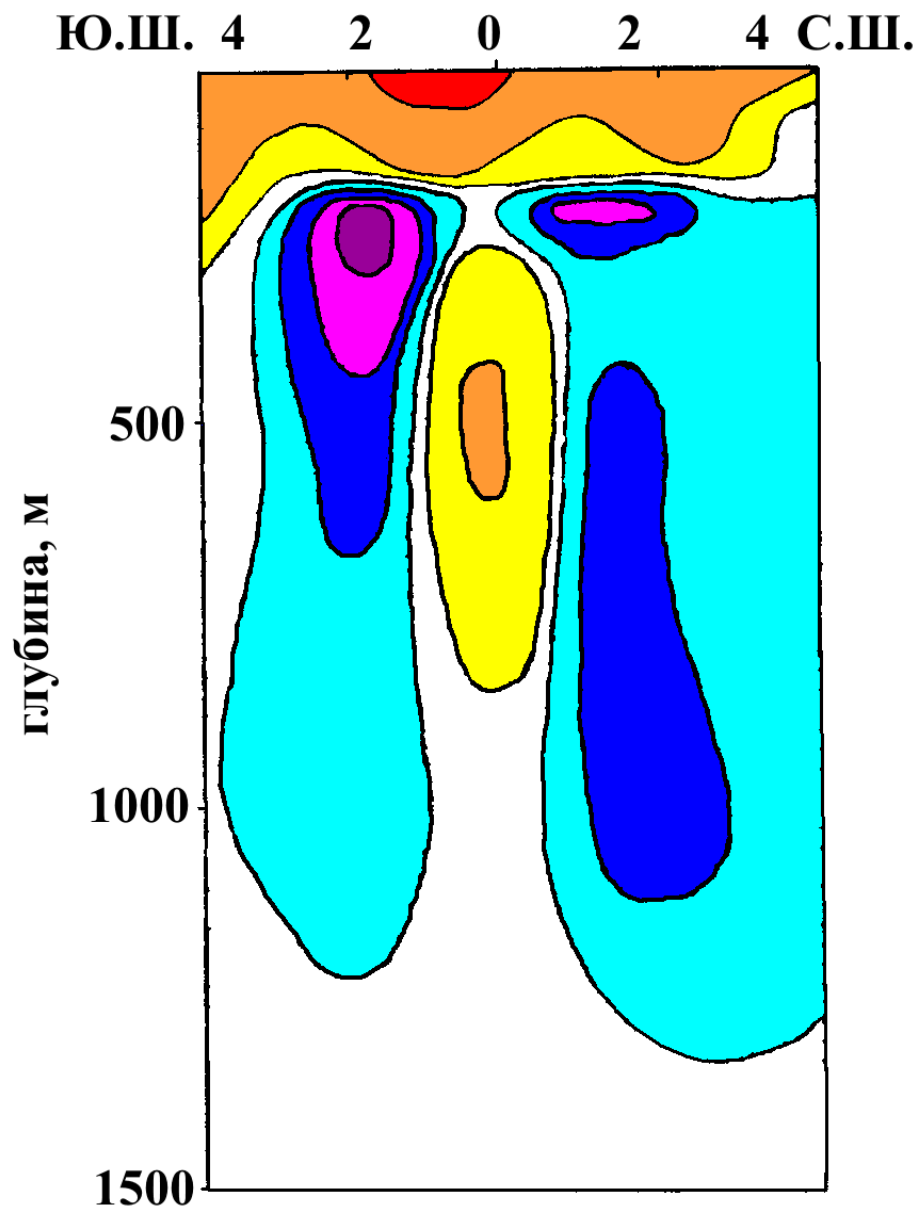
- ❑ *Таунсенд Кромвелл:*
«...подводная река вдоль
Экватора от Соломоновых
до Галапагосских о-вов
(8000 миль), ширина 150-200
миль, скорость до 1.5 м/с»**
- ❑ Вначале названо
Экваториальным
противотечением, после
гибели Т.Кромвелла в 1958г.
в авиакатастрофе
переименовано в течение
Кромвелла**
- ❑ В дальнейшем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

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



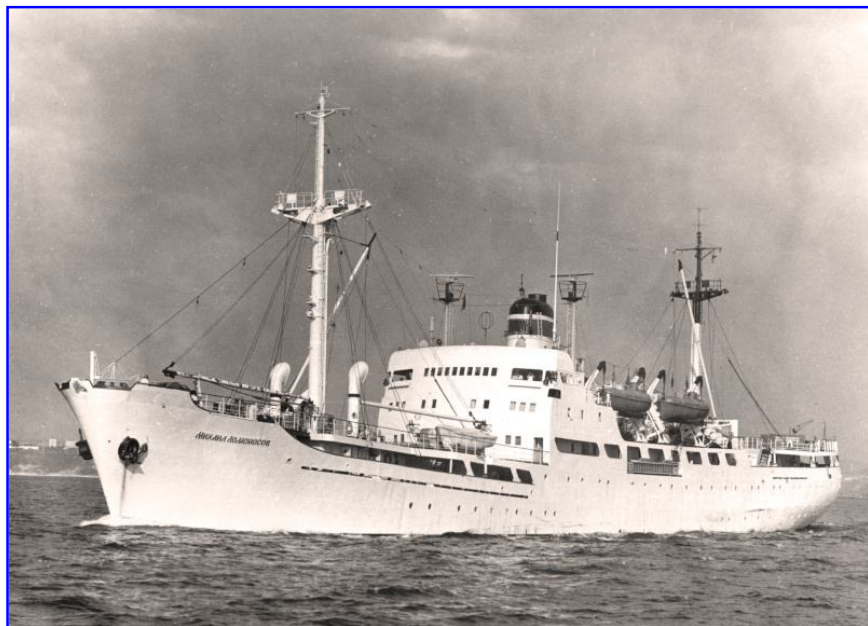
Особенности:

- 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)

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

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

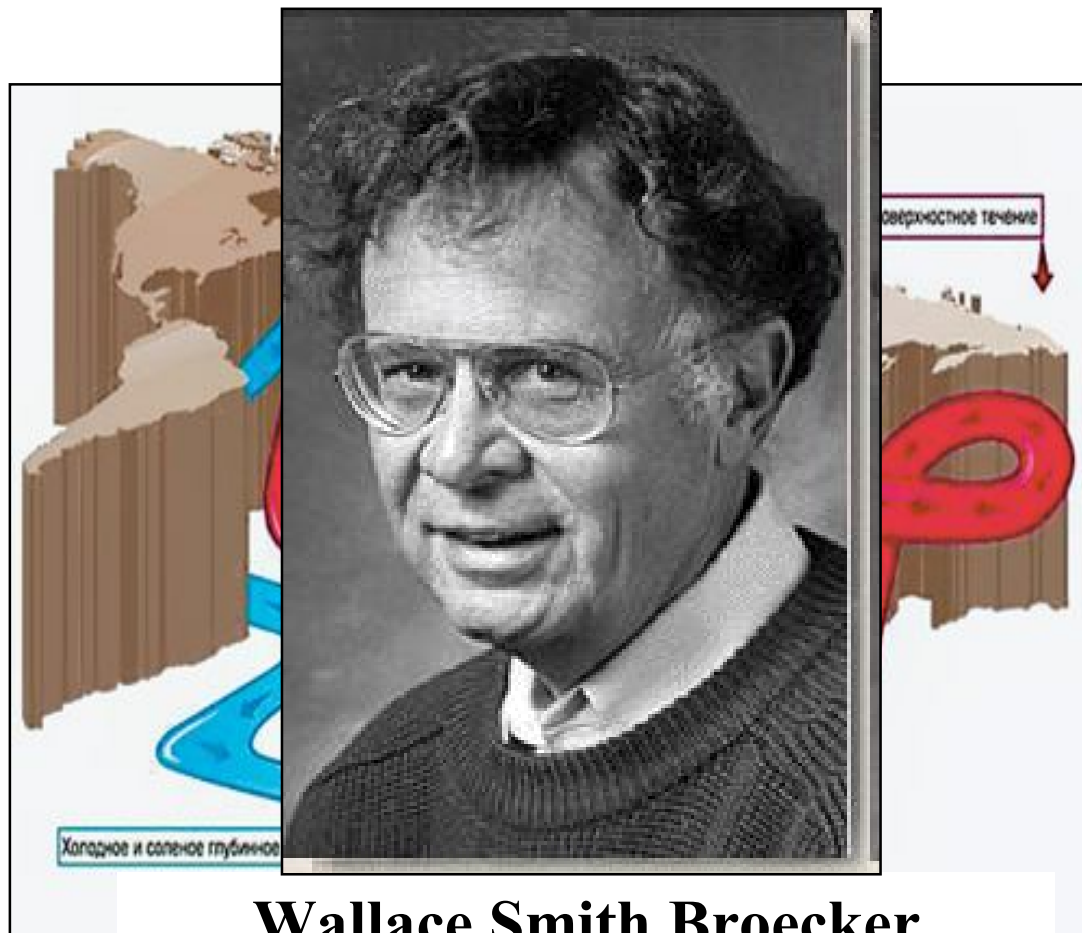
Глубины 600 – 800 м, ширина 80-150 миль.



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»)

