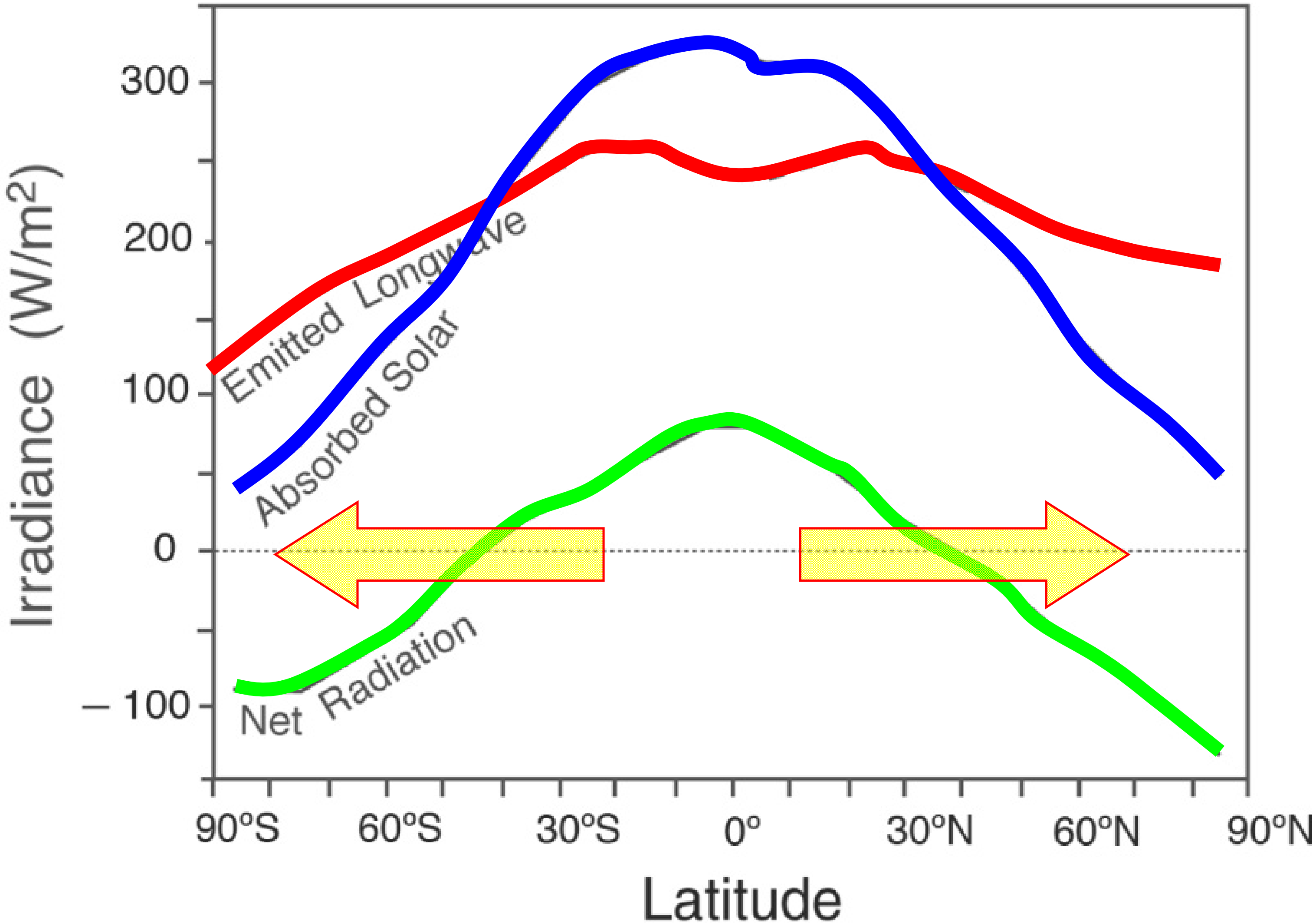
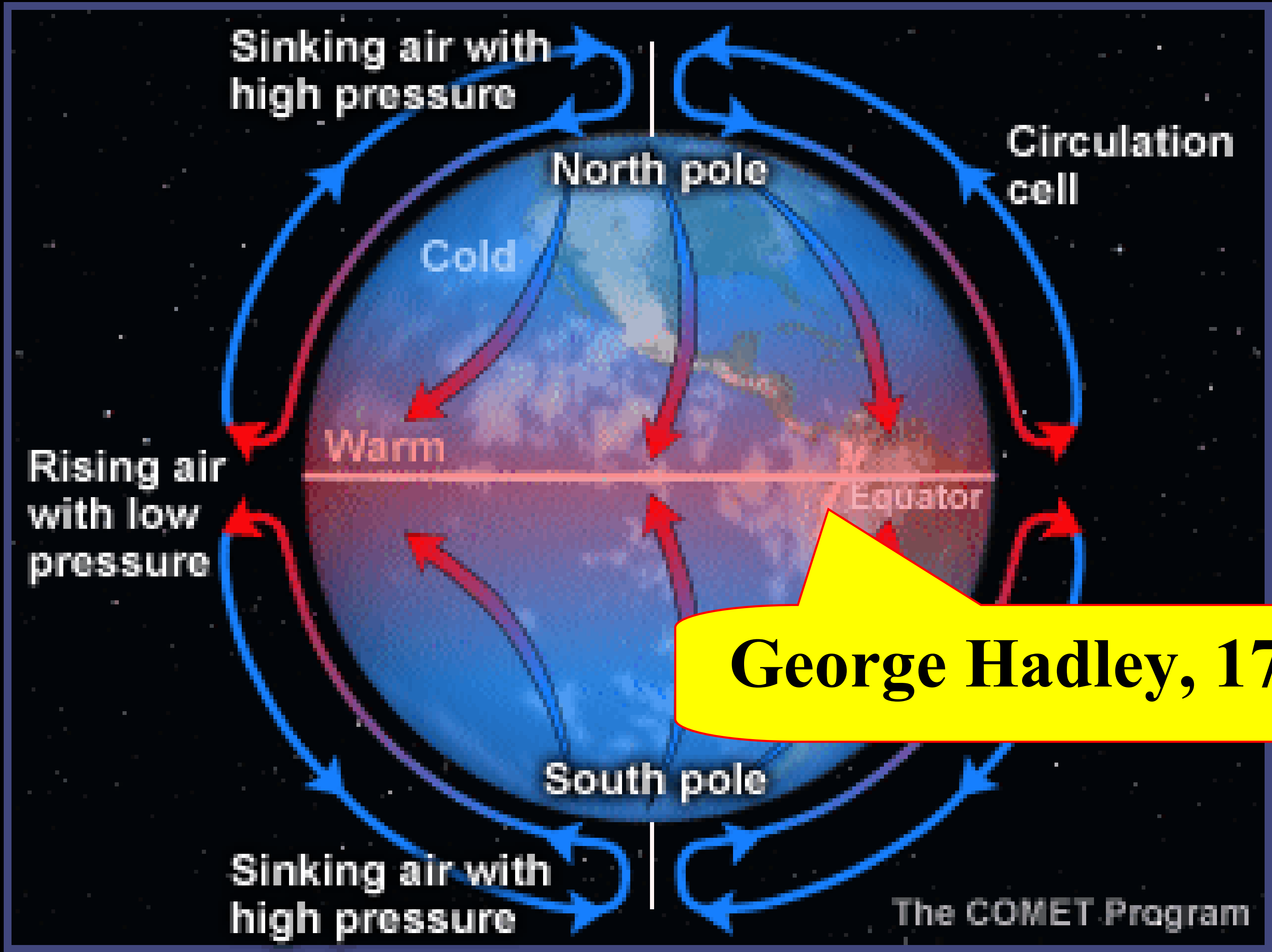
Общая циркуляция атмосферы и океана

Среднегодовые широтные распределения радиации (Вт/м^2): поглощенной солнечной, излученной длинноволновой и их разница

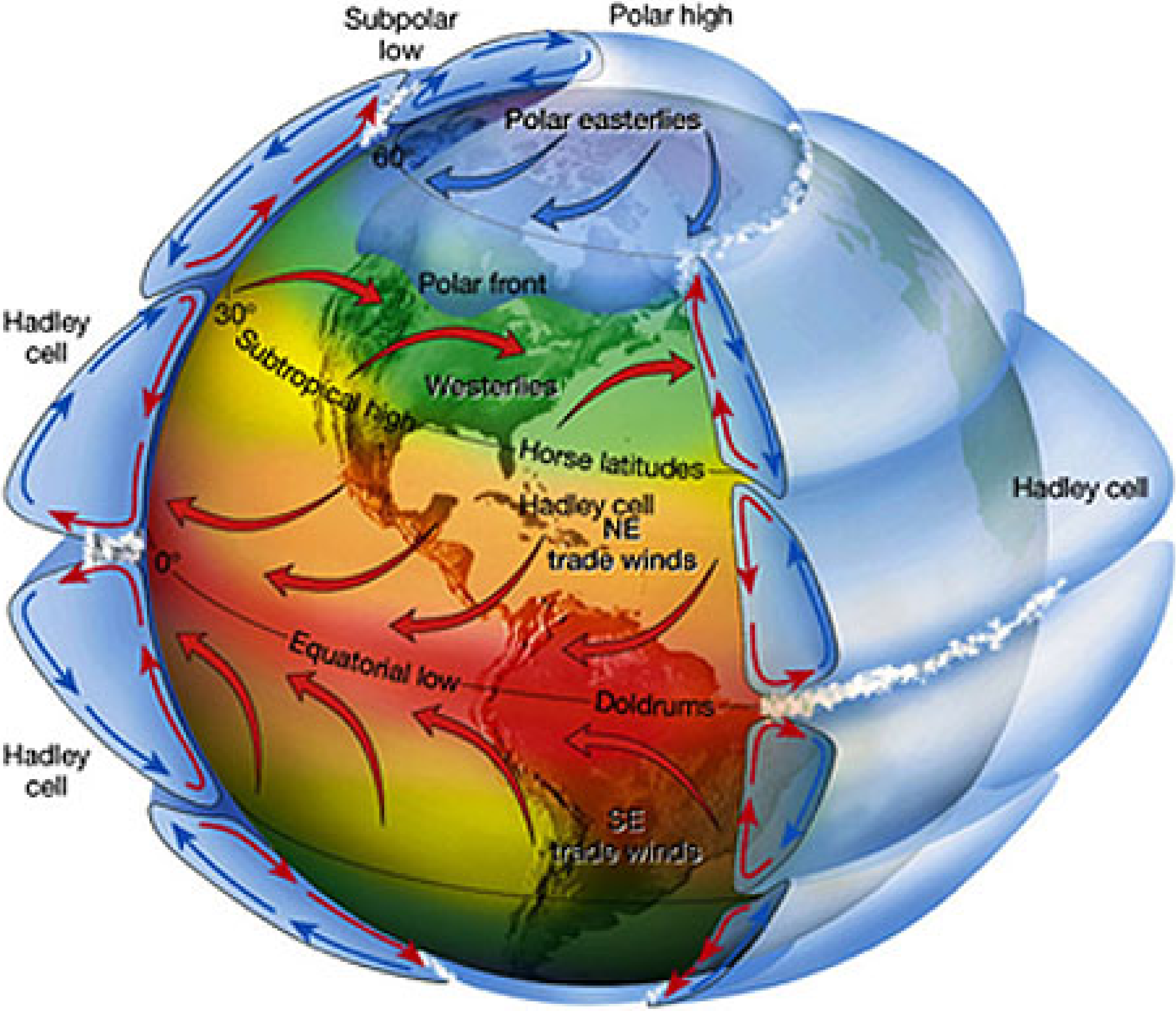


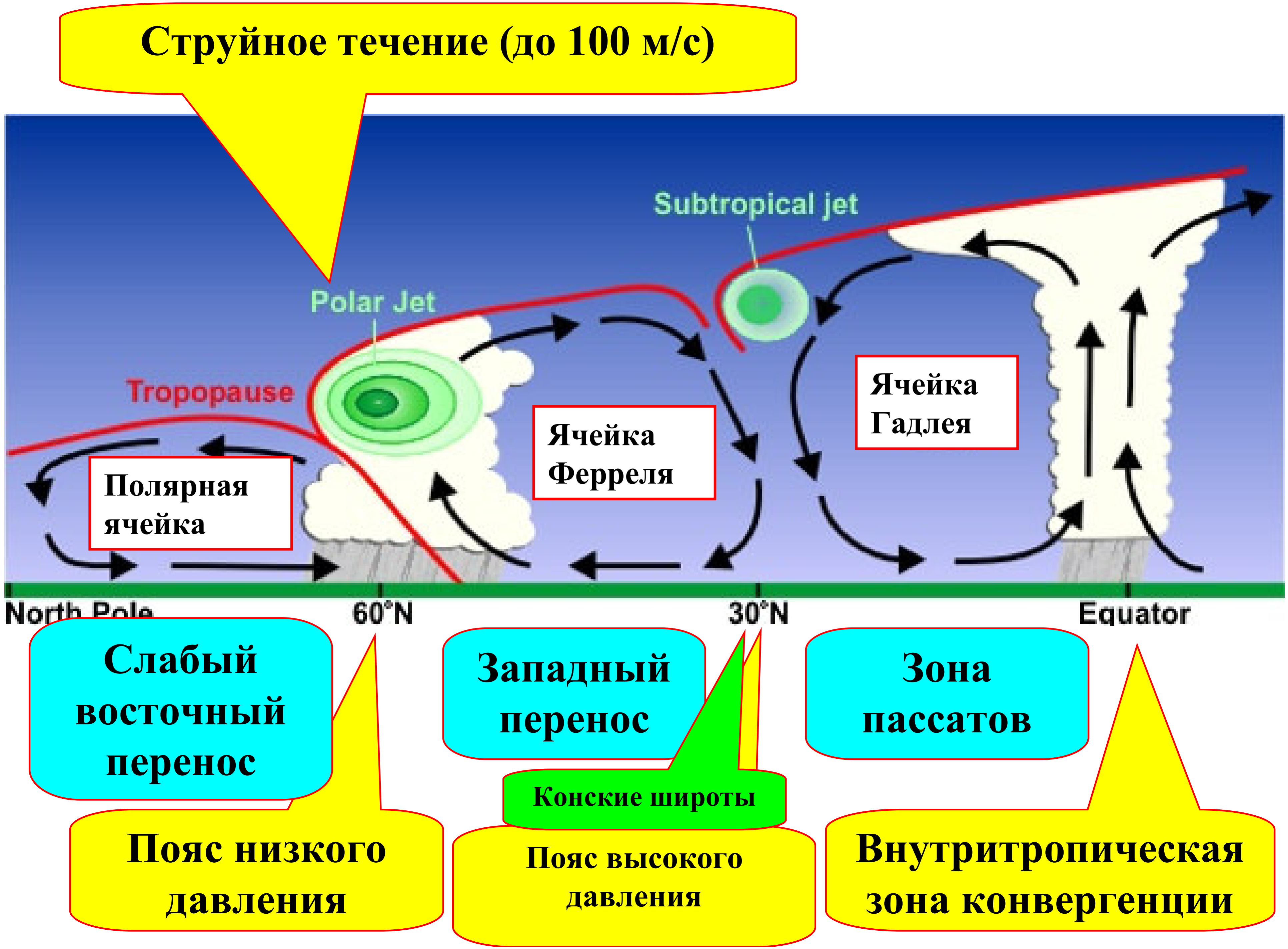
Существует поток тепла от экватора к полюсам

Упрощенная модель циркуляции атмосферы



George Hadley, 1735


Subpolar low
Polar high
Polar easterlies
60°
Polar front
Hadley cell
30°
Subtropical high
Westerlies
Horse latitudes
Hadley cell
Hadley cell
NE trade winds
0°
Equatorial low
Doldrums
Hadley cell
SE trade winds



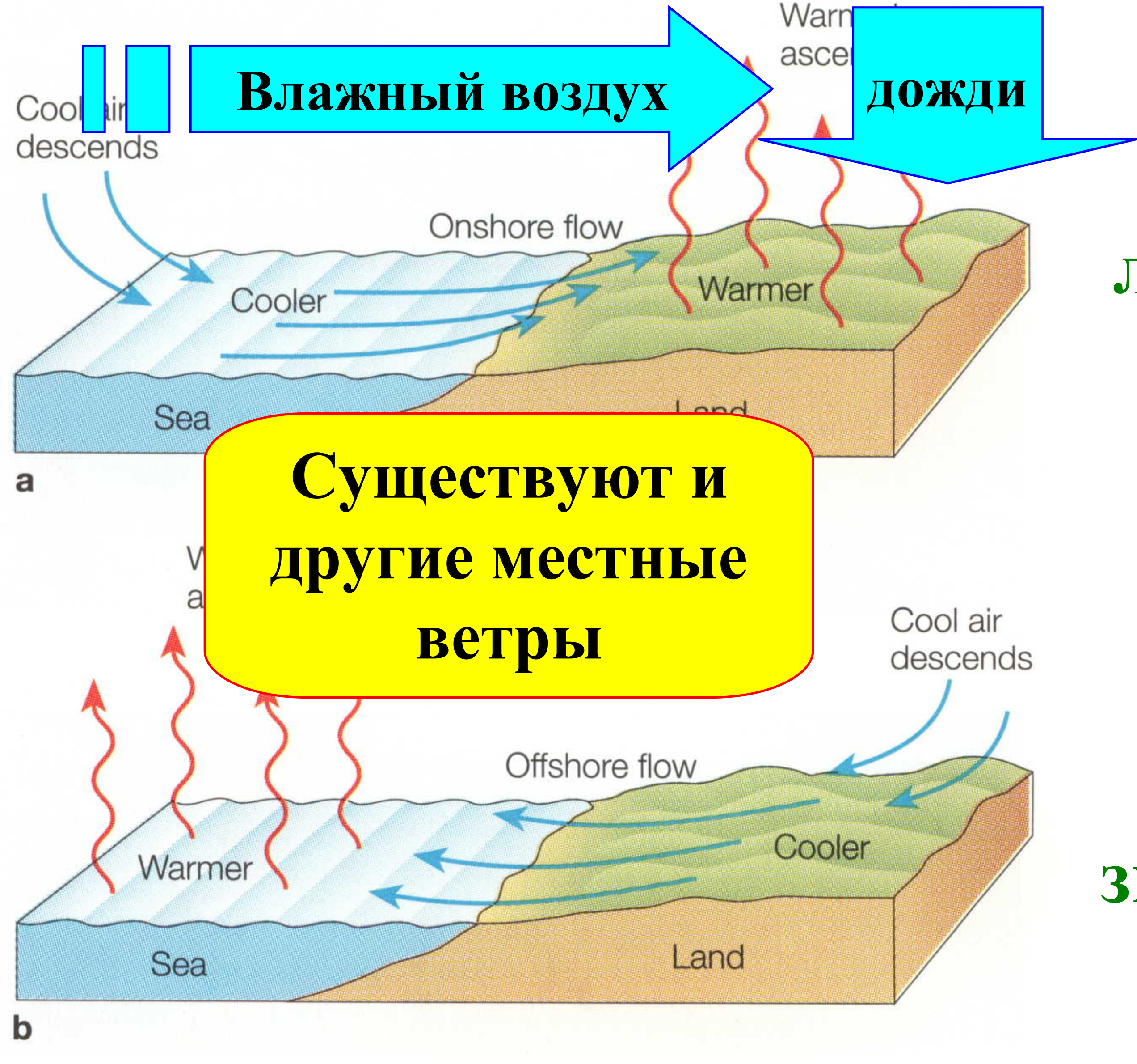
Струйное течение (до 100 м/с)
Subtropical jet
Polar Jet
Tropopause
Полярная ячейка
Ячейка Ферреля
Ячейка Гадлея
North Pole
60°N
30°N
Equator
Слабый восточный перенос
Западный перенос
Зона пассатов
Конские широты
Пояс низкого давления
Пояс высокого давления
Внутритропическая зона конвергенции

Местные ветры

Бриз **Муссон**

день

лето



Существуют и другие местные ветры

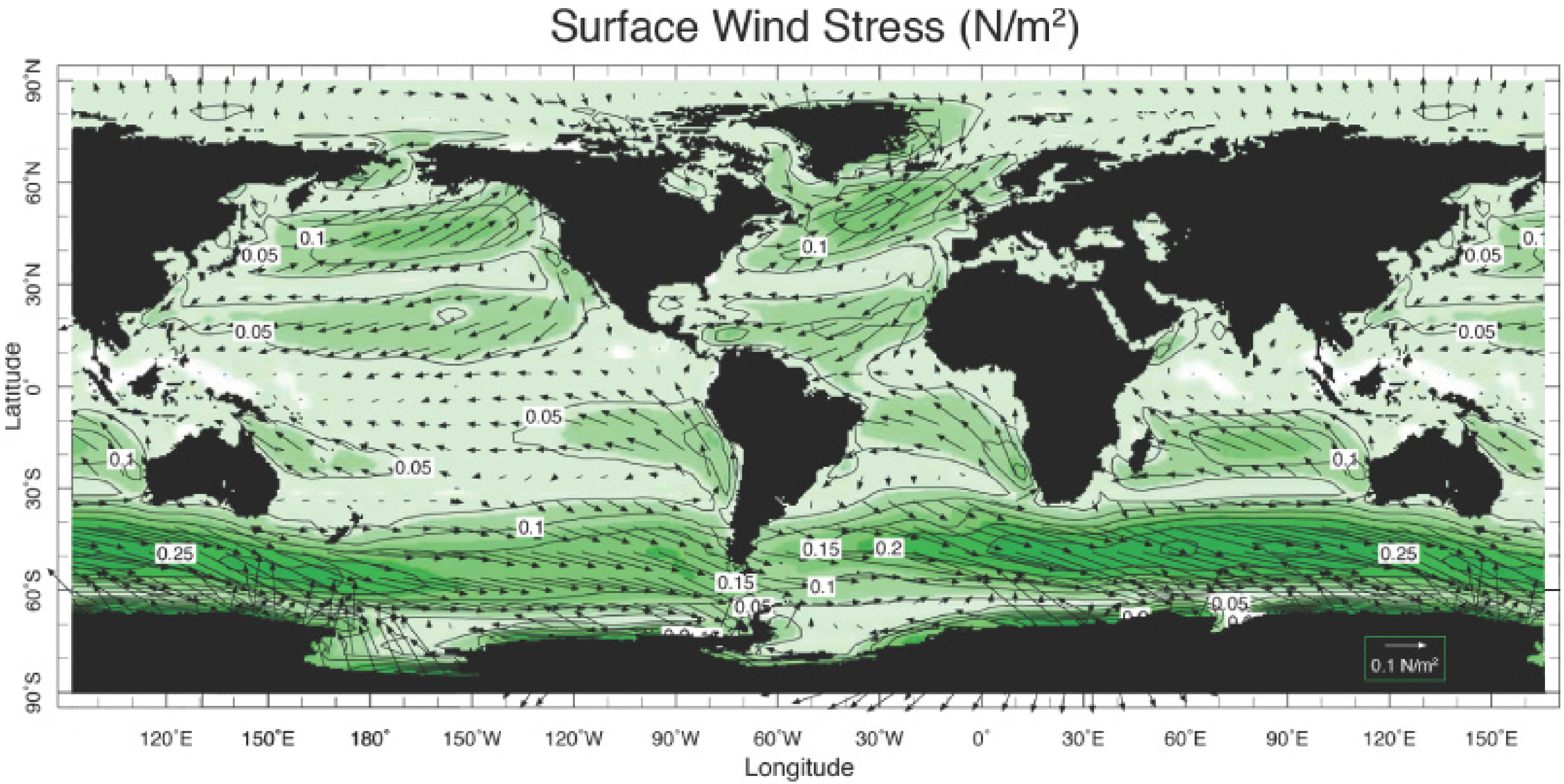
ночь

зима

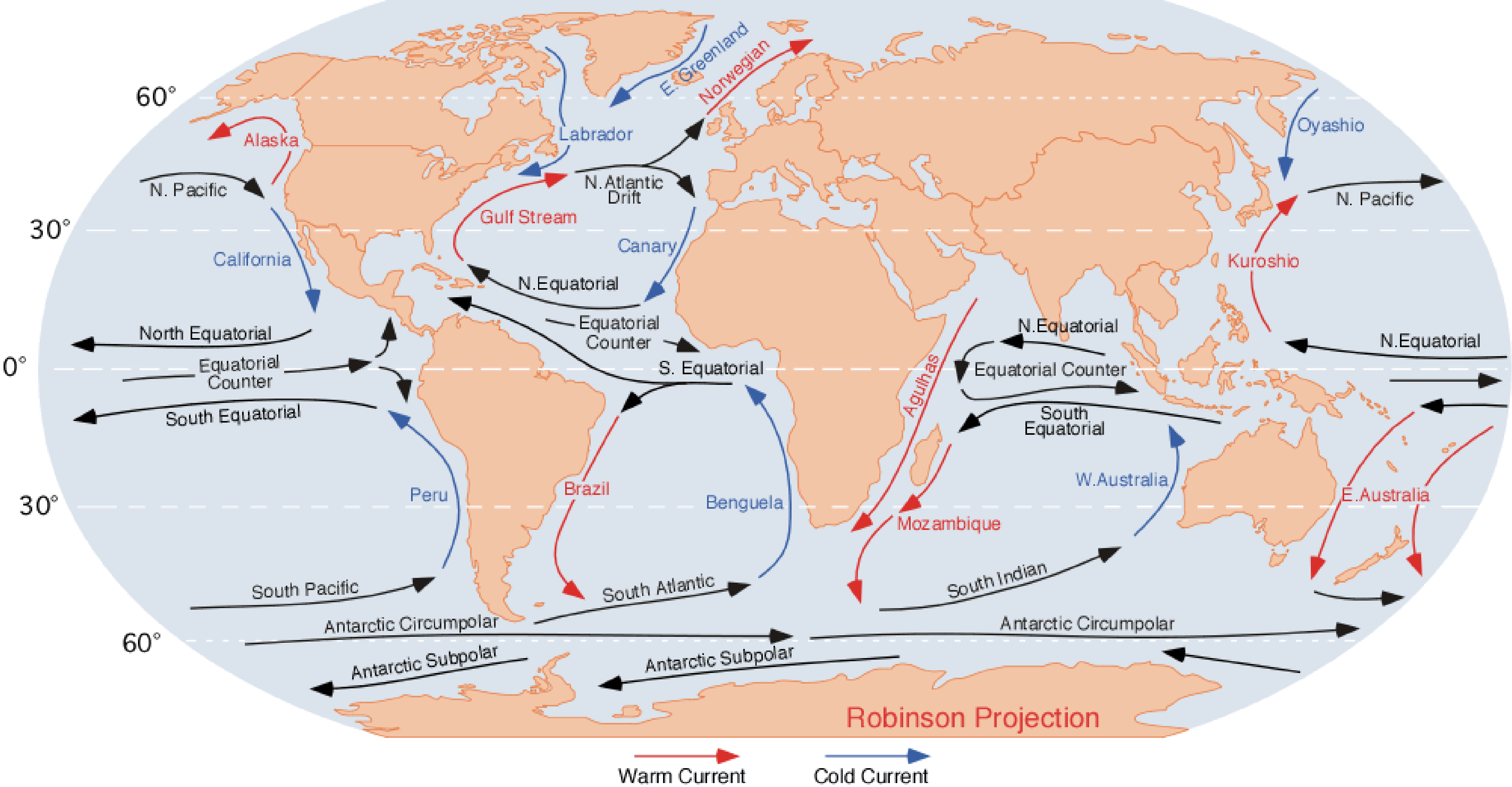
Напряжения трения ветра, действующее на поверхность океана

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

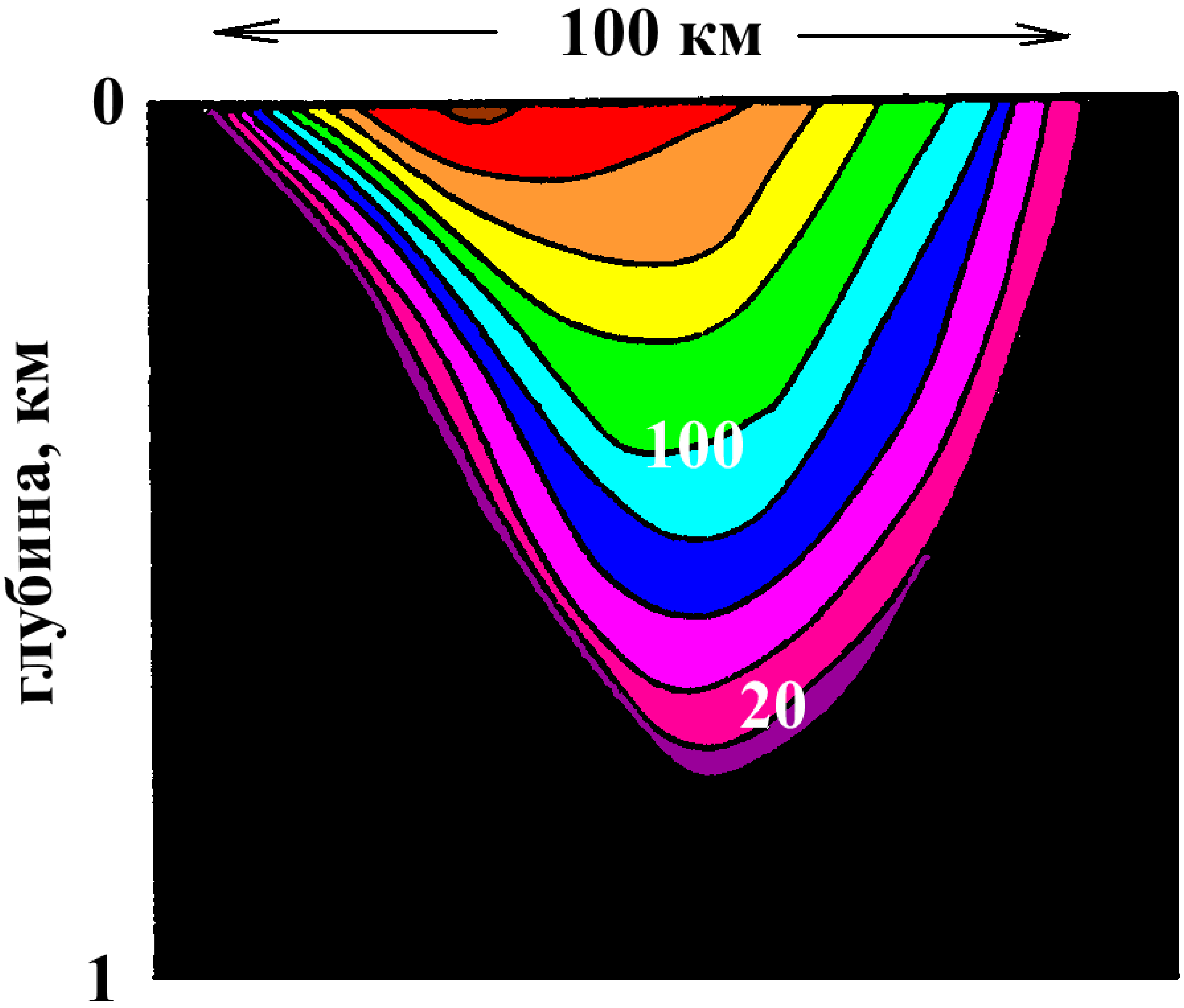
Среднегодовое распределение напряжения трения ветра (Н/м^2)



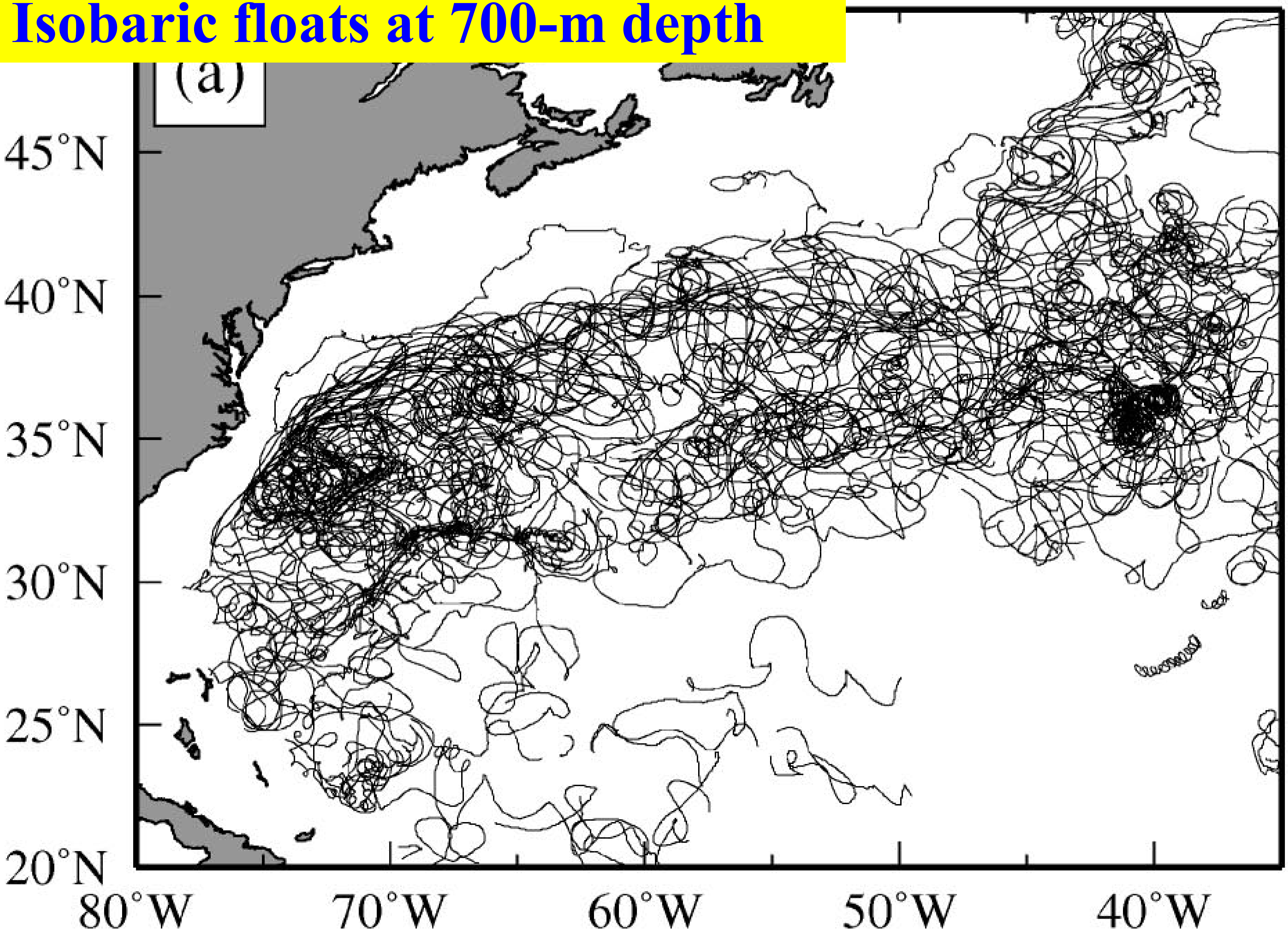
Течения на поверхности Мирового океана



Вертикальная структура течения Гольфстрим

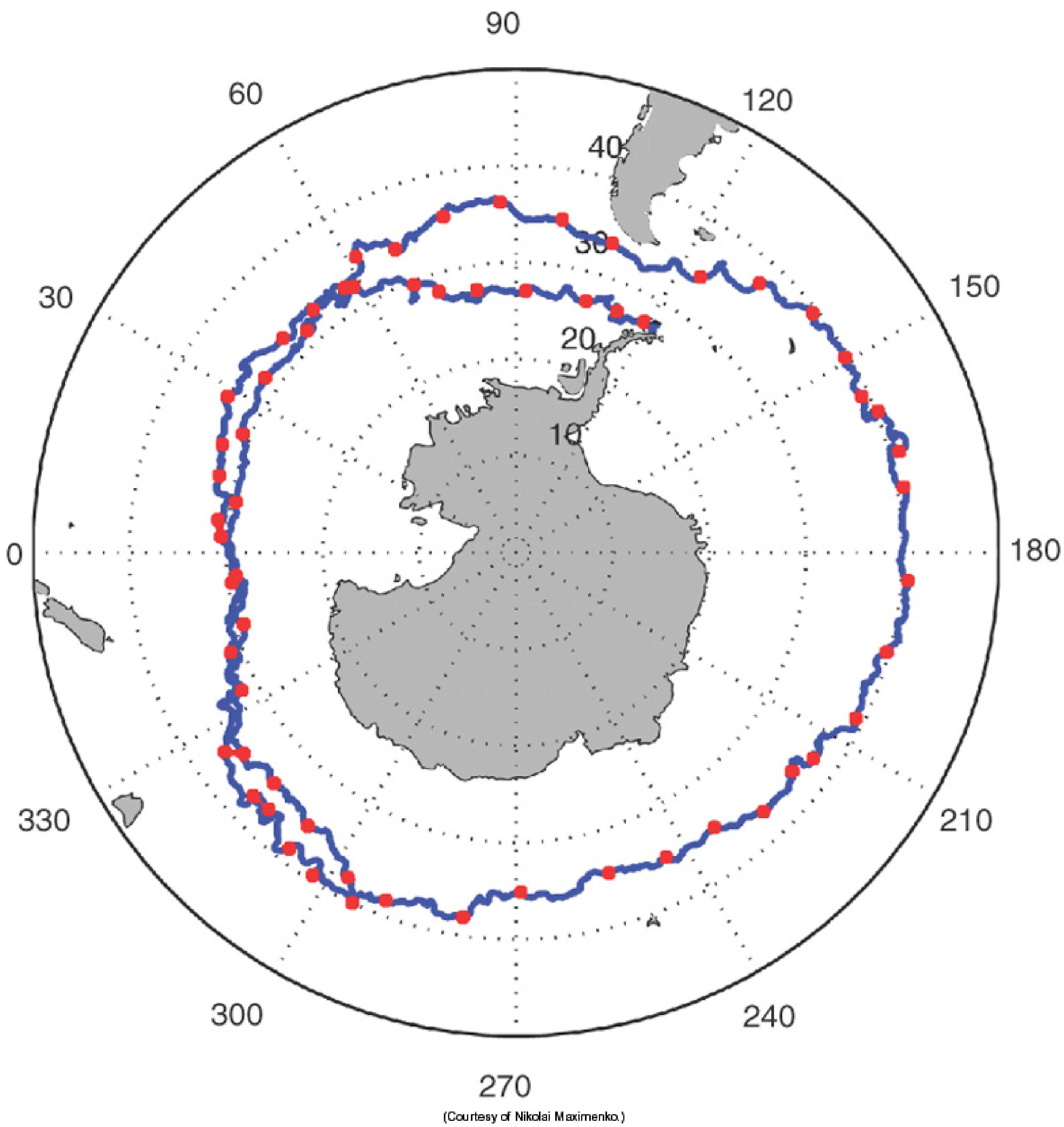


Isobaric floats at 700-m depth

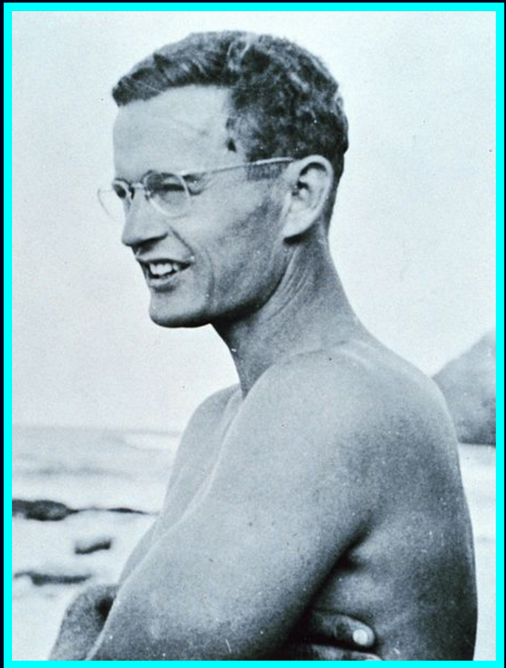


[Veneziani et al., 2004]

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



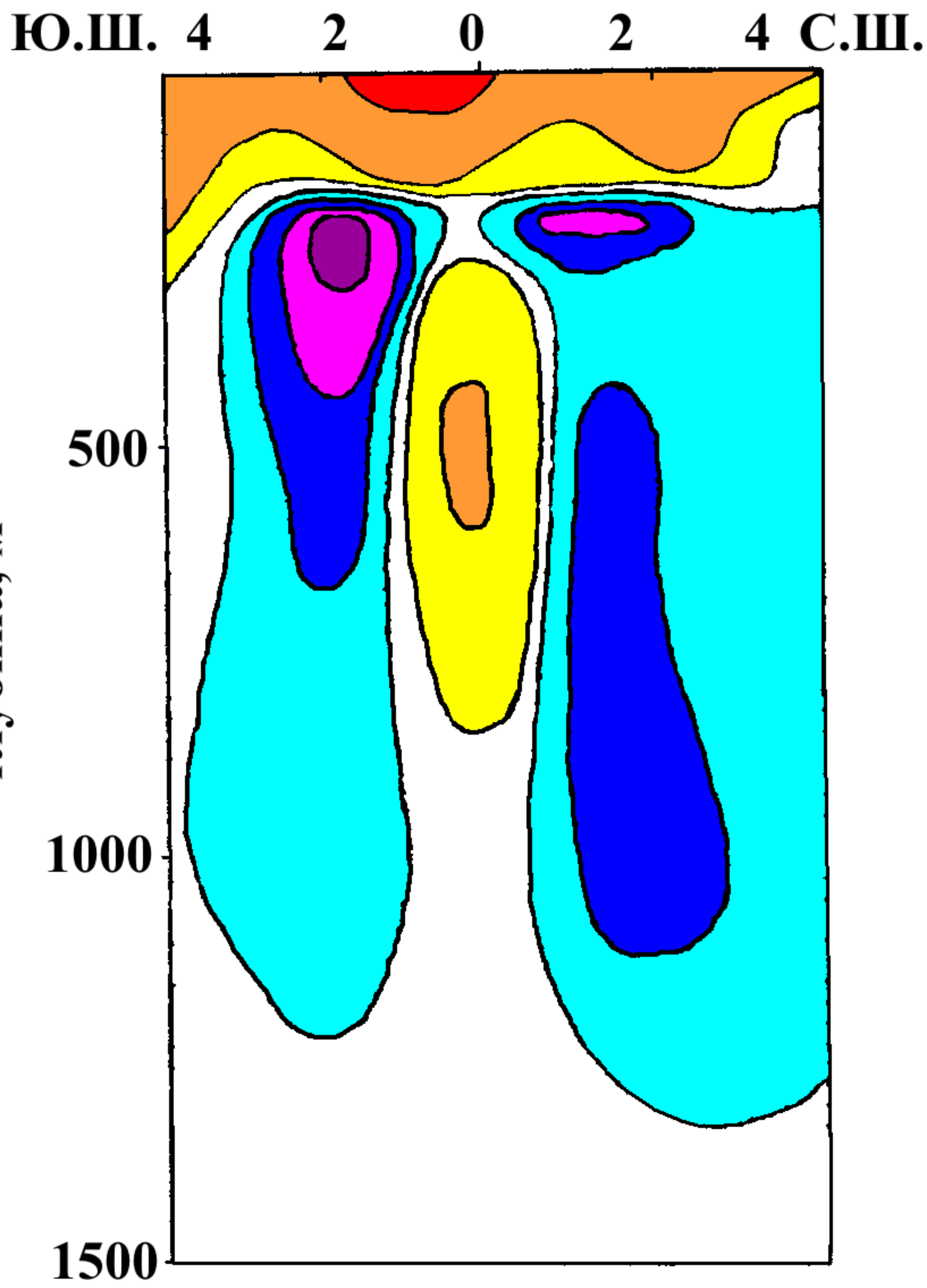
Глубинное течение обнаружено в 1951 г. рыбаками случайно (!)



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 1.5м/с»
- Вначале названо Экваториальным противотечением, после гибели Т.Кромвелла в 1958г. переименовано в течение Кромвелла
- В дальнейшем исследовано экспедицией на «Витязе»

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



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

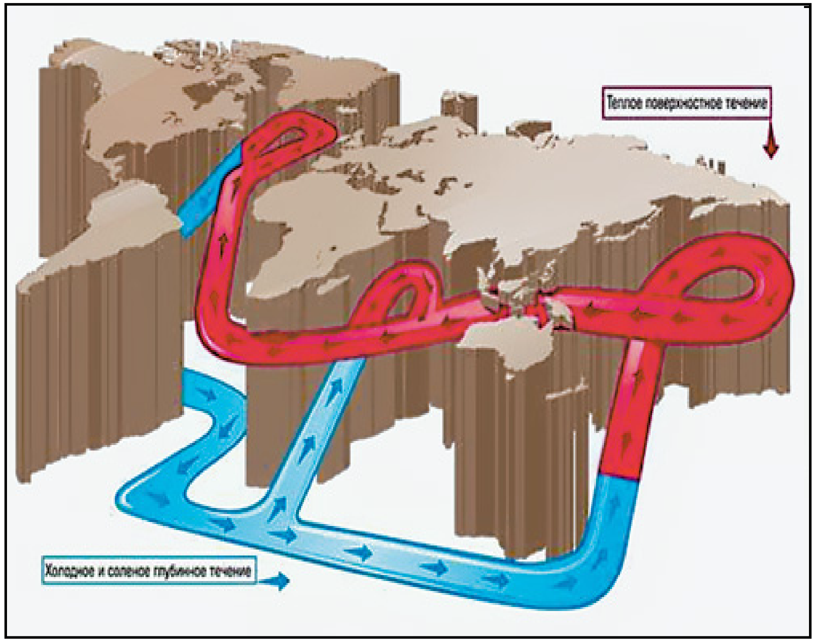
Глубины 75 – 400 м, скорости до 1.2 м/с, ширина 200-250 миль.

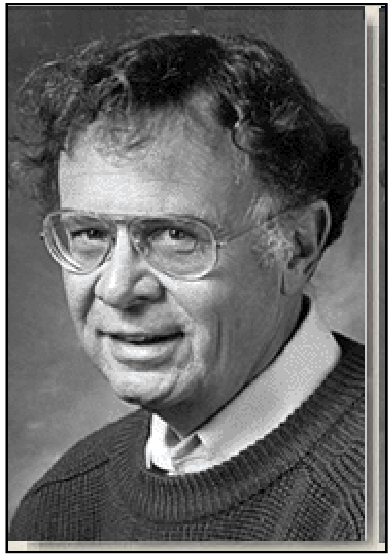
1959-1960 гг. с борта НИС «Витязь» обнаружено экваториальное подповерхностное противотечение в Индийском океане (течение Тареева)

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

Глобальная межокеанская циркуляция вод
(«глобальный тепловой конвейер»)

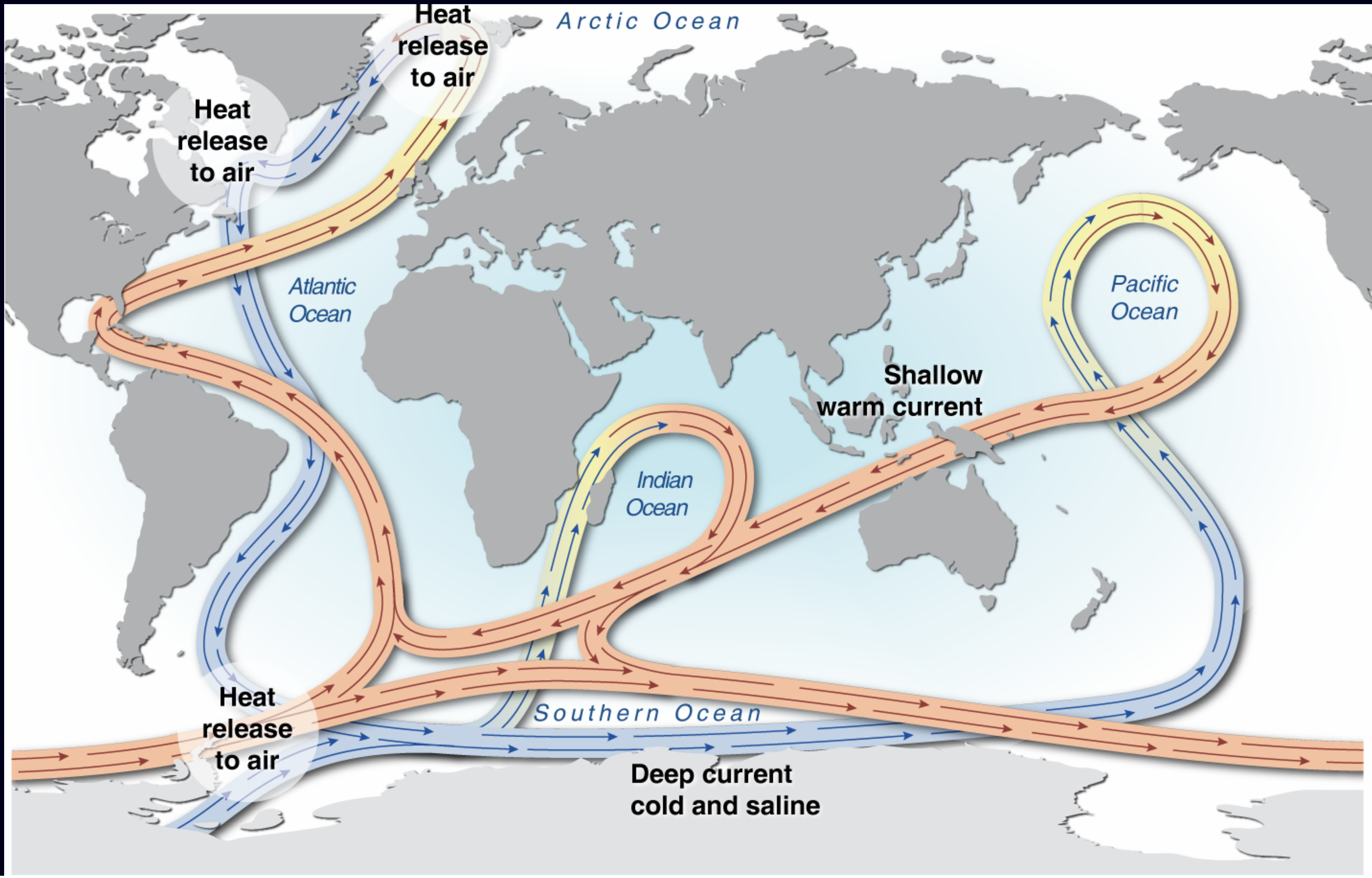
Сергей Сергеевич Лаппо
1938-2006
российский океанолог,
член-корр. РАН,
Директор Института
океанологии РАН
(1995—2006)



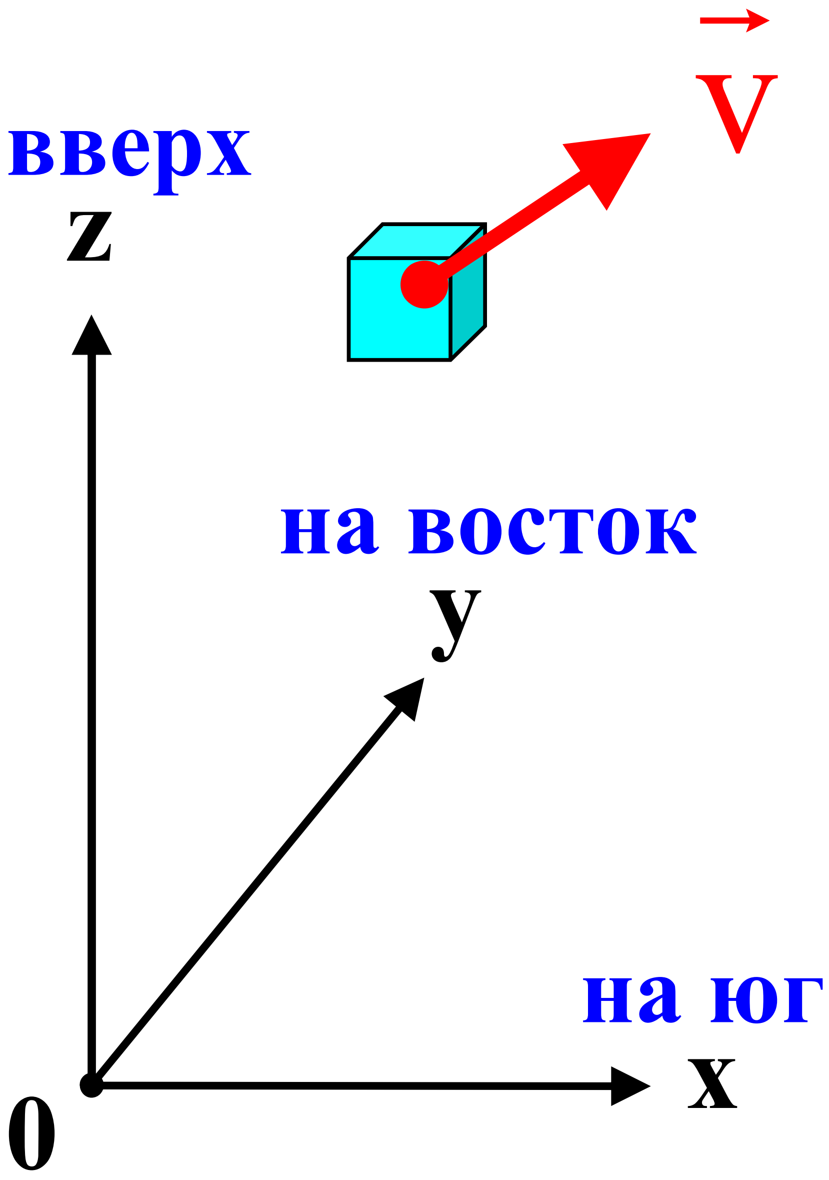


Wallace Smith Broecker
developed the idea of a
«global conveyor belt»

Глобальная межокеанская циркуляция вод («глобальный тепловой конвейер»)



Уравнения гидродинамики



$$\vec{v} = \left(u_x, u_y, u_z\right)$$

$$\vec{v} \equiv \left(u, v, w\right)$$

$$\boxed{\begin{aligned} \vec{v} &= \vec{v}(x, y, z, t) \\ p &= p(x, y, z, t) \\ \rho &= \rho(x, y, z, t) \end{aligned}}$$

$$T = T(x, y, z, t)$$

$$s = s(x, y, z, t)$$

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v}, \vec{\nabla}\right)\vec{v} =$$

уравнение Навье-Стокса

$$= \vec{g} + 2\left[\vec{v} \times \vec{\omega}\right] - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \nu \Delta \vec{v} + \left(\zeta + \frac{\nu}{3}\right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho \vec{v}\right) = 0$$

уравнение неразрывности

система уравнений замкнута!!!

$$\rho = \rho(p)$$

уравнение состояния

Система уравнений гидродинамики
+уравнения переноса тепла и соли

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \left(\vec{v}, \vec{\nabla}\right) T = \chi \Delta T$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} + \left(\vec{v}, \vec{\nabla}\right) s = \vartheta \Delta s$$

$$\rho = \rho(p, T, s)$$

система остается замкнутой!!!

Основные подходы к упрощению уравнений гидродинамики

Приближение №1:
«несжимаемая жидкость (газ)»

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\left(\vec{v},\vec{\nabla}\right)\vec{v}=$$

$$\boxed{\rho=\rho_0=\mathrm{const}}$$

$$=\vec{g}+2\left[\vec{v}\times\vec{\omega}\right]-\frac{\vec{\nabla}p}{\rho}+\nu\Delta\vec{v}+\cancel{\left(\zeta+\frac{\nu}{3}\right)\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\vec{v}}$$

$$\cancel{\frac{\partial\rho}{\partial t}}+\mathrm{div}\left(\rho\,\vec{v}\right)=0$$

$$\mathrm{div}\,\vec{v}=0$$

$$\rho=\rho(p)$$

$$\rho_0$$

Приближение №1:
«несжимаемая жидкость (газ)»

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

$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \sim \frac{u_{\text{гориз}}}{L}$$

$$\frac{\partial w}{\partial z} \sim \frac{w_{\text{верт}}}{H}$$

В крупномасштабных течениях атмосферы и океана H << L
$\Rightarrow$ $w_{\text{верт}} \ll u_{\text{гориз}}$

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{\partial w}{\partial z}$$

$$\boxed{\left|w_{\text{верт}}\right| \sim \frac{H}{L}\left|u_{\text{гориз}}\right|}$$

Приближение №2: «стационарное течение»

$$\cancel{\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}}+\left(\vec{v},\vec{\nabla}\right)\vec{v}=$$

$$=\vec{g}+2\left[\vec{v}\times\vec{\omega}\right]-\frac{\vec{\nabla}p}{\rho}+\nu\Delta\vec{v}+\left(\zeta+\frac{\nu}{3}\right)\mathrm{grad}\,\mathrm{div}\,\vec{v}$$

$$\cancel{\frac{\partial\rho}{\partial t}}+\mathrm{div}\left(\rho\,\vec{v}\right)=0$$

$$\rho=\rho(p)$$

Приближение №3: «идеальная (невязкая) жидкость»

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \left(\vec{v}, \vec{\nabla}\right)\vec{v} =$$

понижается порядок уравнения

$$= \vec{g} + 2\left[\vec{v} \times \vec{\omega}\right] - \frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \cancel{\nu \Delta \vec{v} + \left(\zeta + \frac{\nu}{3}\right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}\left(\rho \vec{v}\right) = 0$$

$$\rho = \rho(p)$$

изменение граничного условия

"прилипание" $\Rightarrow$ "непротекание"

Приближение №4:
«идеальная несжимаемая жидкость, линейное приближение»

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

$$\mathrm{div}\, \vec{v} = 0$$

$$\text{если } \left\{ \begin{matrix} \vec{v}_1, p_1 \\ \vec{v}_2, p_2 \end{matrix} \right\} - \text{решения системы, то} \Rightarrow$$

$$A\vec{v}_1 + B\vec{v}_2, Ap_1 + Bp_2 - \text{решения системы}$$

$$\text{где } A, B - \text{константы}$$

«Геофизические» приближения:

1. Гидростатическое приближение

2. Геострофическое приближение

strophe (греч.) – вращение, поворот

Крупномасштабные течения атмосферы и океана обычно происходят в условиях гидростатического (по вертикали) и геострофического (по горизонтали) баланса

$$z: -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + \vec{g} = 0 \qquad \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}: -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho} + 2\left[\vec{v} \times \vec{\omega}\right] = 0$$

«Геофизические» приближения:

1. Гидростатическое приближение

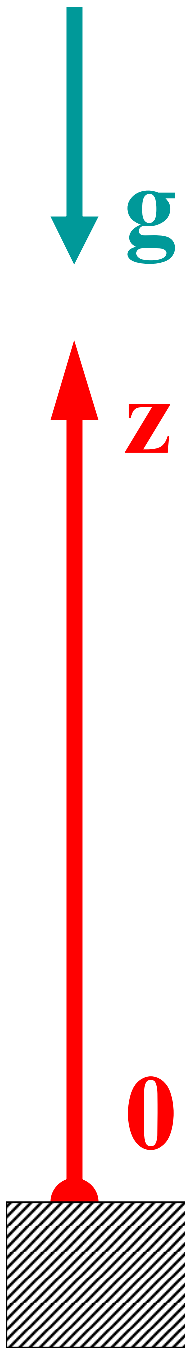
$$\cancel{\frac{dw}{dt}} = -\frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial z} - g$$

$$\left| w_{\text{верт}} \right| \sim \frac{H}{L}\left| u_{\text{гориз}} \right|$$

$$H << L$$

$$\frac{dp}{dz} = -\rho_0 g \Rightarrow p(z) = p_0 - \rho_0 g\, z$$

Барометрическая формула



$$\frac{dp}{dz} = -g\,\rho(z) \qquad \rho(z) = \frac{p(z)}{R_a T}$$

$$\frac{dp}{dz} = -g\frac{p}{R_a T} \quad \Rightarrow \frac{dp}{p} = -\frac{dz}{H}$$

$$\boxed{\{T, g, R_a\} \neq f(z)}$$

$$\boxed{H = \frac{R_a T}{g}}$$

Барометрическая формула

g

$$\frac{dp}{p} = -\frac{dz}{H}$$

$$\ln p\Big|_{p_0}^{p(z)} = -\frac{z}{H}\Big|_0^z$$

z

$$\ln p(z) - \ln p_0 = -\frac{z}{H}$$

$$\ln\frac{p(z)}{p_0} = -\frac{z}{H}$$

$$p(z) = p_0 e^{-z/H}$$

$$\boxed{H = \frac{R_a T}{g}}$$

0

H – высота однородной атмосферы

Высота однородной атмосферы

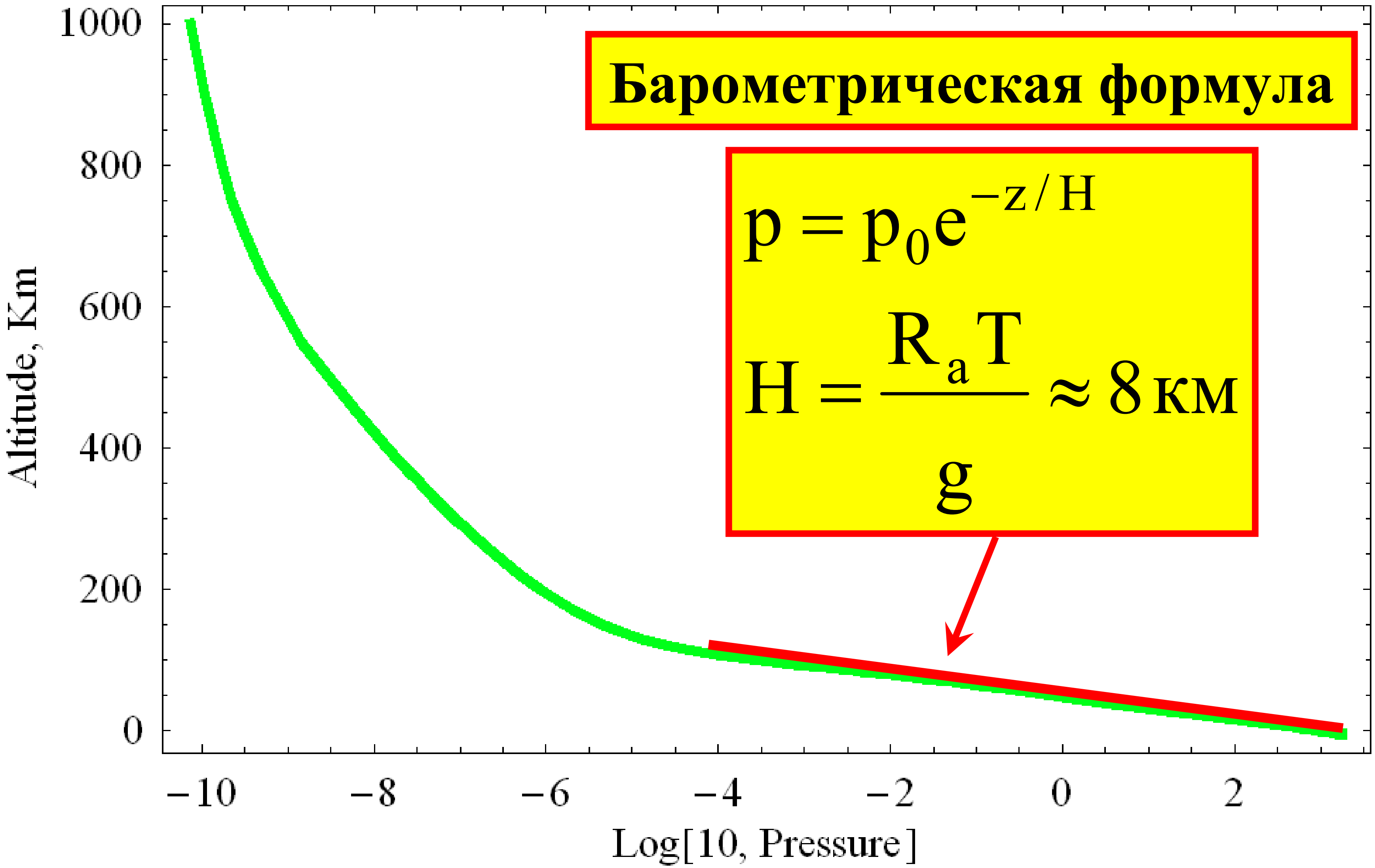
$$R_a = \frac{R}{\mu} = \frac{8.31\,[\text{Дж}/\text{моль}\cdot\text{К}]}{0.029\,[\text{кг}/\text{моль}]} \approx$$

$$\approx 287\,[\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}]$$

$$H = \frac{R_a T}{g} = \frac{287\,[\text{Дж}/\text{кг}\cdot\text{К}]\cdot 273\,[\text{К}]}{9.8\,[\text{м}/\text{с}^2]} \approx$$

$$\approx 8000\,[\text{м}]$$

Зависимость давления воздуха от высоты



«Геофизические» приближения:

2. Геострофическое приближение

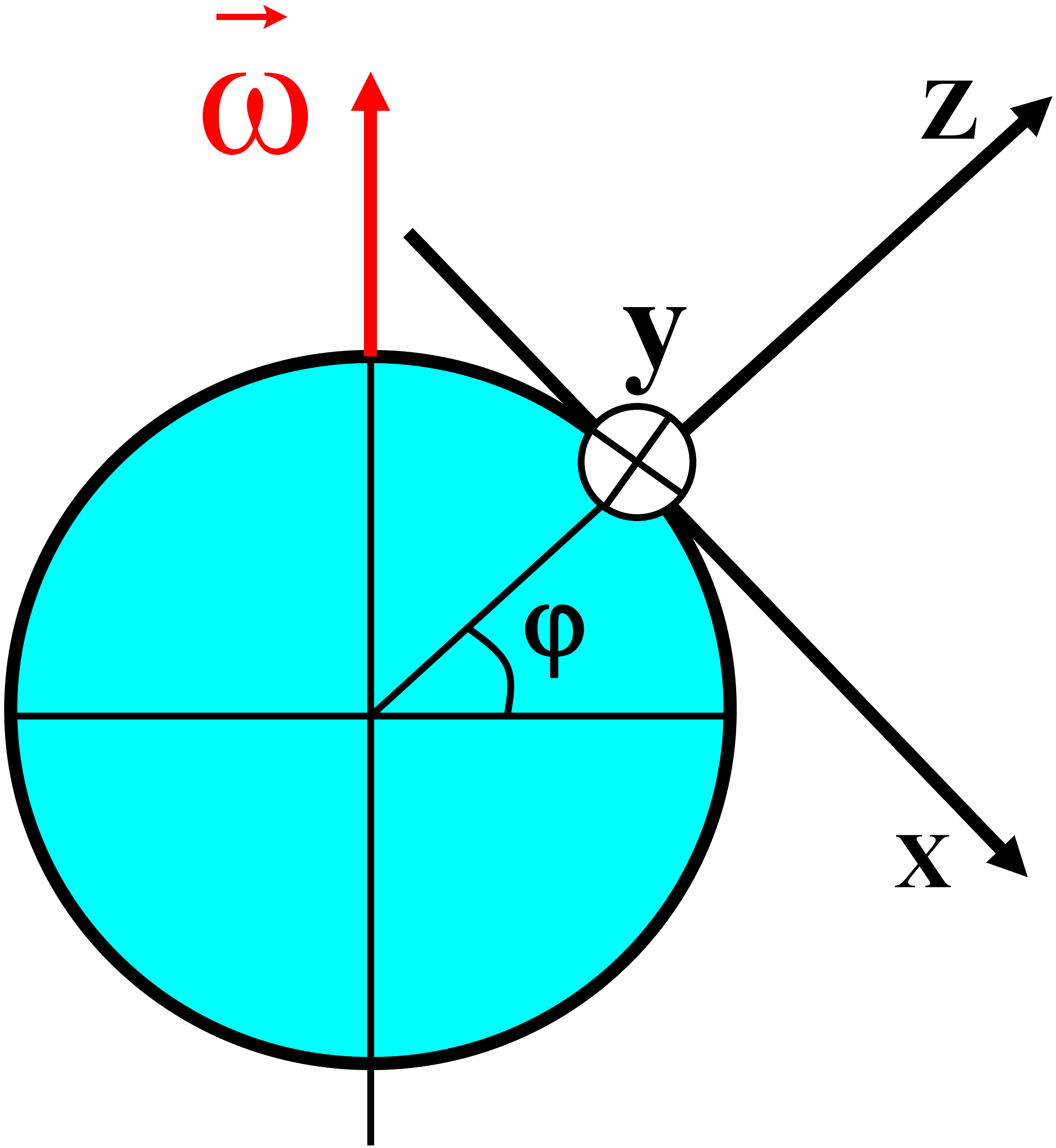
$$\cancel{\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}} + \cancel{\left(\vec{v},\vec{\nabla}\right)\vec{v}} = -\frac{\vec{\nabla}p}{\rho_0} + \cancel{\vec{g}} + 2\left[\vec{v}\times\vec{\omega}\right]$$

$$\operatorname{div}\left(\vec{v}\right) = 0$$

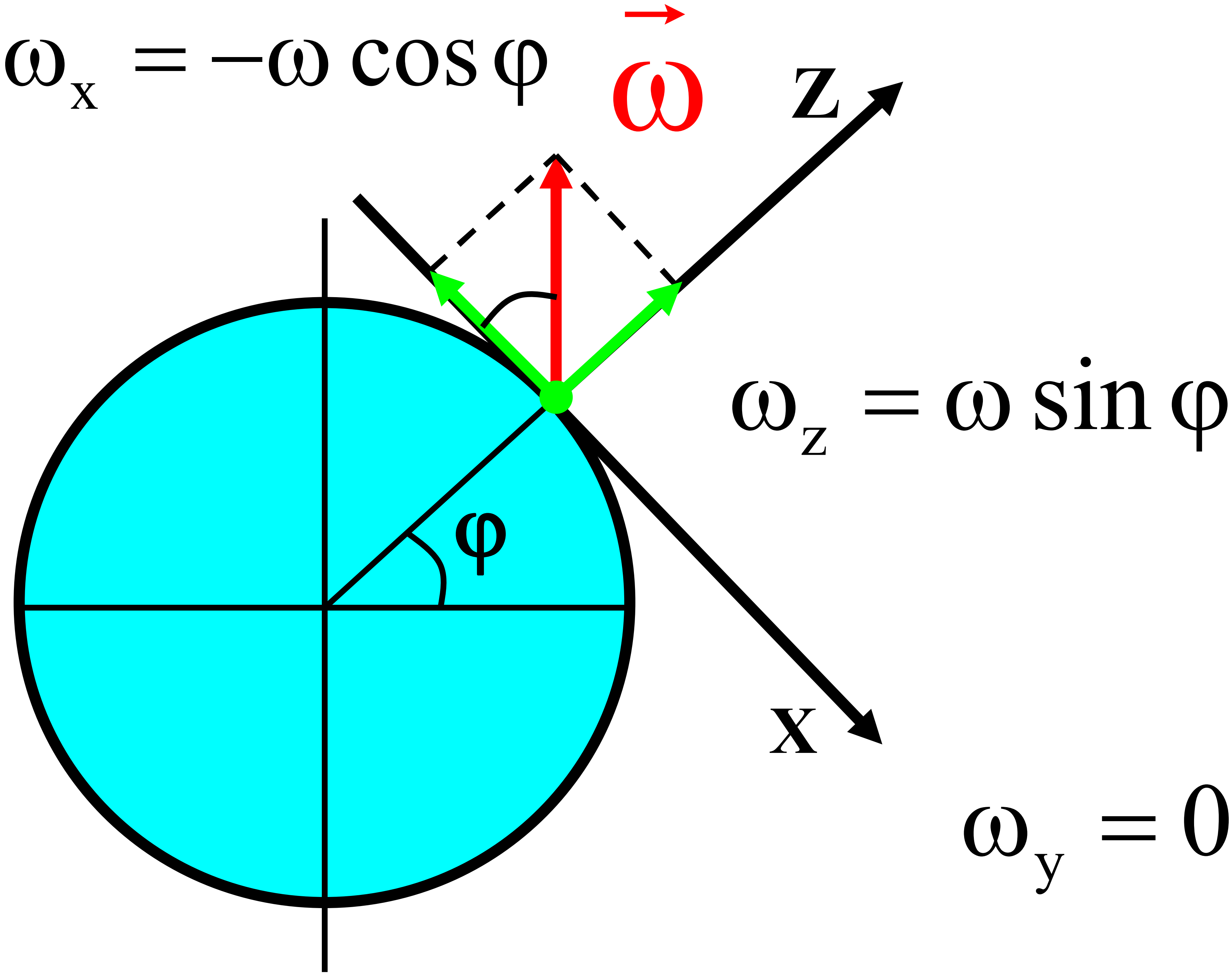
по
горизонтали
не действует!

Gaspard-Gustave de Coriolis
French, Mathematics, Physics
1792-1843

$$F_{\text{Кор}} = 2m\left[\vec{v} \times \vec{\omega}\right]$$



$\vec{\omega}$
z
y
φ
x



$\omega_x = -\omega\cos\varphi$
$\vec{\omega}$
z
$\omega_z = \omega\sin\varphi$
φ
x
$\omega_y = 0$

$$\vec{\omega} = (-\omega\cos\varphi,\ 0,\ \omega\sin\varphi)$$

$$\vec{v} = (u,\ v,\ w)$$

$$[\vec{v}\times\vec{\omega}] = \begin{vmatrix} i & j & k \\ u & v & w \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix} = \begin{pmatrix} i(v\omega_z - w\omega_y) \\ j(w\omega_x - u\omega_z) \\ k(u\omega_y - v\omega_x) \end{pmatrix} =$$

$$= \begin{pmatrix} i(\omega v\sin\varphi) \\ j(-\omega w\cos\varphi - \omega u\sin\varphi) \\ k(\omega v\cos\varphi) \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} i(\omega v\sin\varphi) \\ j(-\omega u\sin\varphi) \\ 0 \end{pmatrix}$$

традиционное приближение

$1.\ w << \{u, v\}$

$2.\ F_z^{Кор} = 0$

$$2[\vec{v} \times \vec{\omega}] \approx \begin{pmatrix} 2\omega v \sin\varphi \\ -2\omega u \sin\varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$2[\vec{v} \times \vec{\omega}] = \begin{pmatrix} f\,v \\ -f\,u \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$f = 2\omega \sin\varphi$$

параметр Кориолиса

Масштаб времени течения

$$t = \frac{L}{U}$$

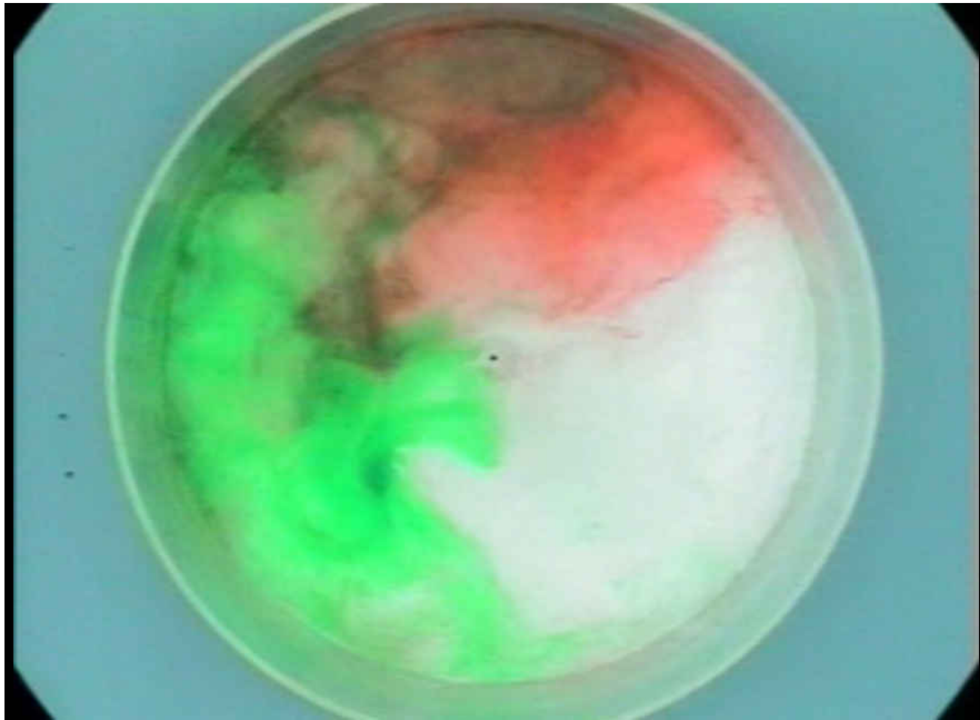
Период вращения

$$T$$

Carl-Gustaf Rossby
Swedish-US meteorologist
1898-1957

Число Россби

$$\frac{T}{t} = \frac{T \cdot U}{L}$$



$$R_o = \frac{T \cdot U}{L}$$

$$R_o = \frac{3[c] \times 0.01[м / c]}{0.3[м]} = 0.1$$

$$R_o = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60[c] \times 0.01[м / c]}{0.3[м]} \approx 3000$$

$$\frac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\left(\vec{v},\vec{\nabla}\right)\vec{v}=-\frac{\vec{\nabla}p}{\rho}+\vec{g}+2\left[\vec{v}\times\vec{\omega}\right]$$

$$\frac{U}{T}\sim\frac{UU}{L}$$

$$T\sim L/U$$

$$R_o<<1$$

$$U\cdot f$$

$$f=2\omega\sin\varphi$$

число Россби

$$R_o=\frac{\dfrac{\partial\vec{v}}{\partial t}+\left(\vec{v},\vec{\nabla}\right)\vec{v}}{2\left[\vec{v}\times\vec{\omega}\right]}\sim\frac{\dfrac{UU}{L}}{U\cdot f}=\frac{U}{L\cdot f}$$

Типичные значения числа Россби для атмосферы и океана

$$R_o = \frac{T \cdot U}{L}$$

$$\boxed{R_o = \frac{U}{L \cdot f},\ f = 2\omega \sin\varphi}$$

атмосфера

$$R_o = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60[\text{с}] \times 10[\text{м}/\text{с}]}{10^6[\text{м}]}$$

океан

$$R_o = \frac{24 \cdot 60 \cdot 60[\text{с}] \times 1[\text{м}/\text{с}]}{10^6[\text{м}]}$$

2. Геострофическое приближение

$$-\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + 2\left[\vec{v} \times \vec{\omega}\right] = 0$$

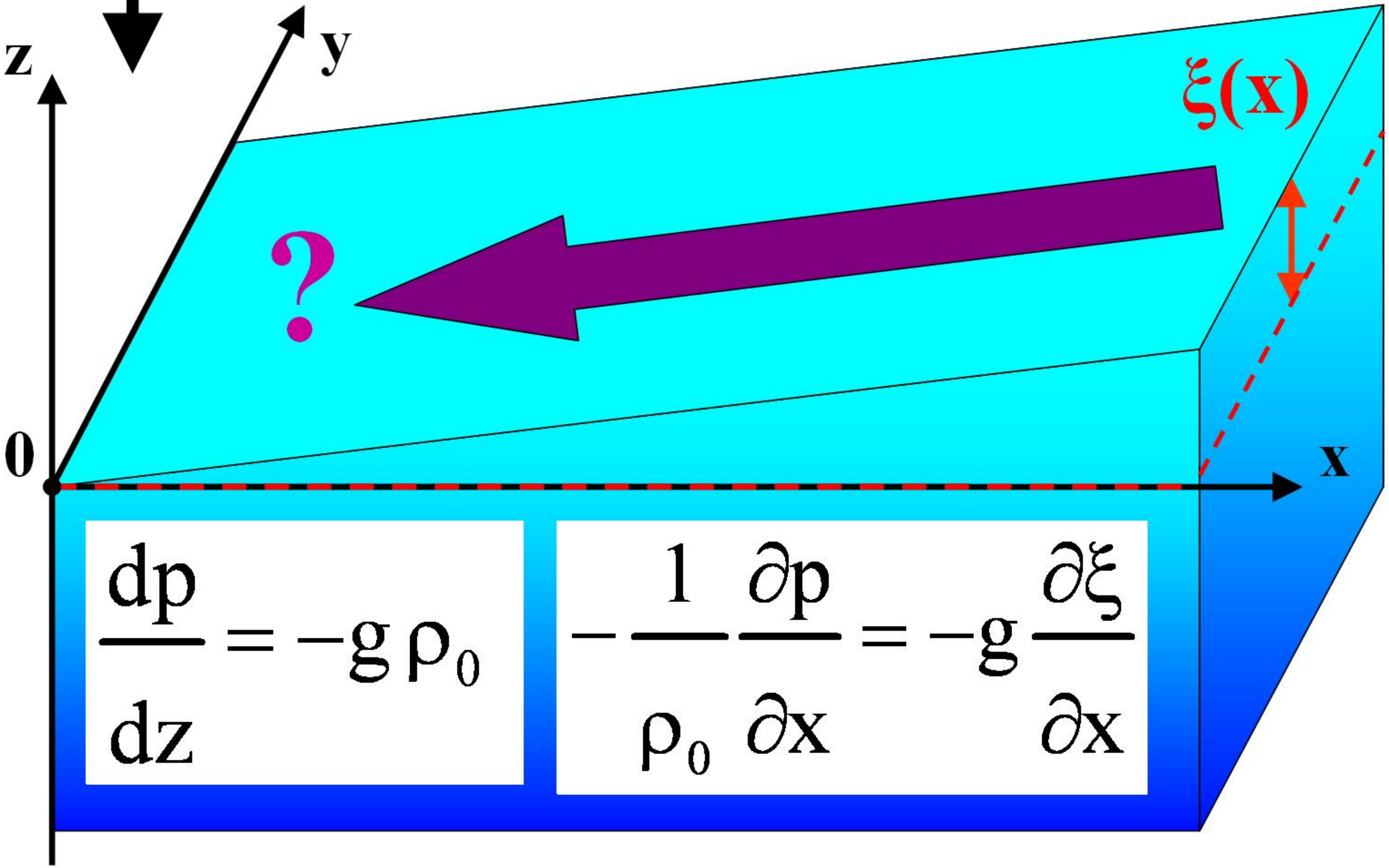
$$\operatorname{div} \vec{v} = 0$$

2. Геострофическое приближение

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x}+2\omega v\sin\varphi=0$$

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial y}-2\omega u\sin\varphi=0$$

g $p(x, y, z) = p_{атм} + \rho_0 g[\xi(x, y) - z]$



$$\frac{dp}{dz} = -g\,\rho_0$$

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} = -g\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

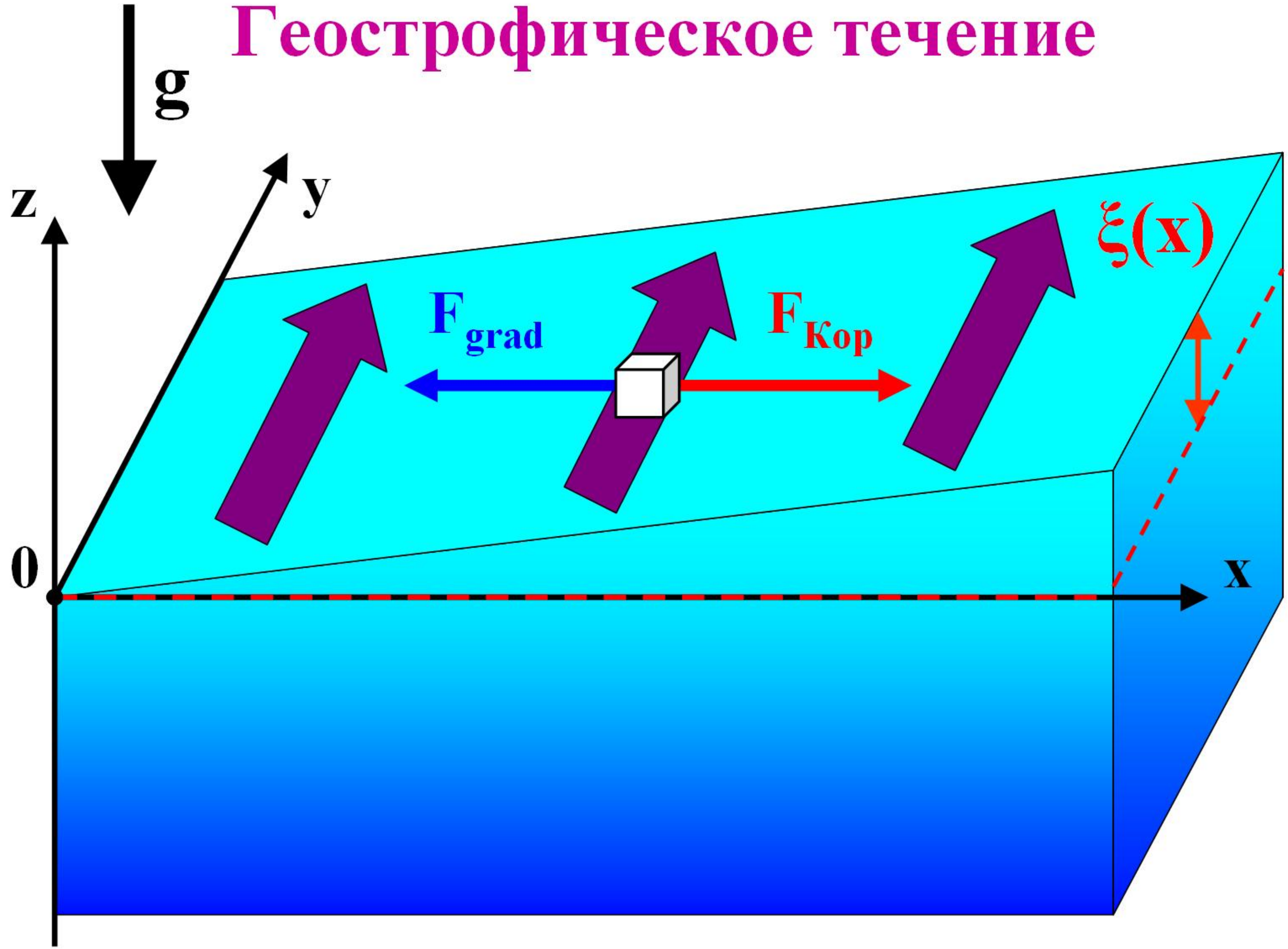
$$\begin{cases} -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial x} + 2\omega v \sin\varphi = 0 \\ -\dfrac{1}{\rho_0}\dfrac{\partial p}{\partial y} - 2\omega u \sin\varphi = 0 \end{cases}$$

$$-\frac{1}{\rho_0}\frac{\partial p}{\partial x} = -g\frac{\partial \xi}{\partial x}$$

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

$$\boxed{\begin{aligned} u &= 0 \\ v &= \frac{g}{2\omega \sin\varphi}\frac{\partial \xi}{\partial x} \end{aligned}}$$

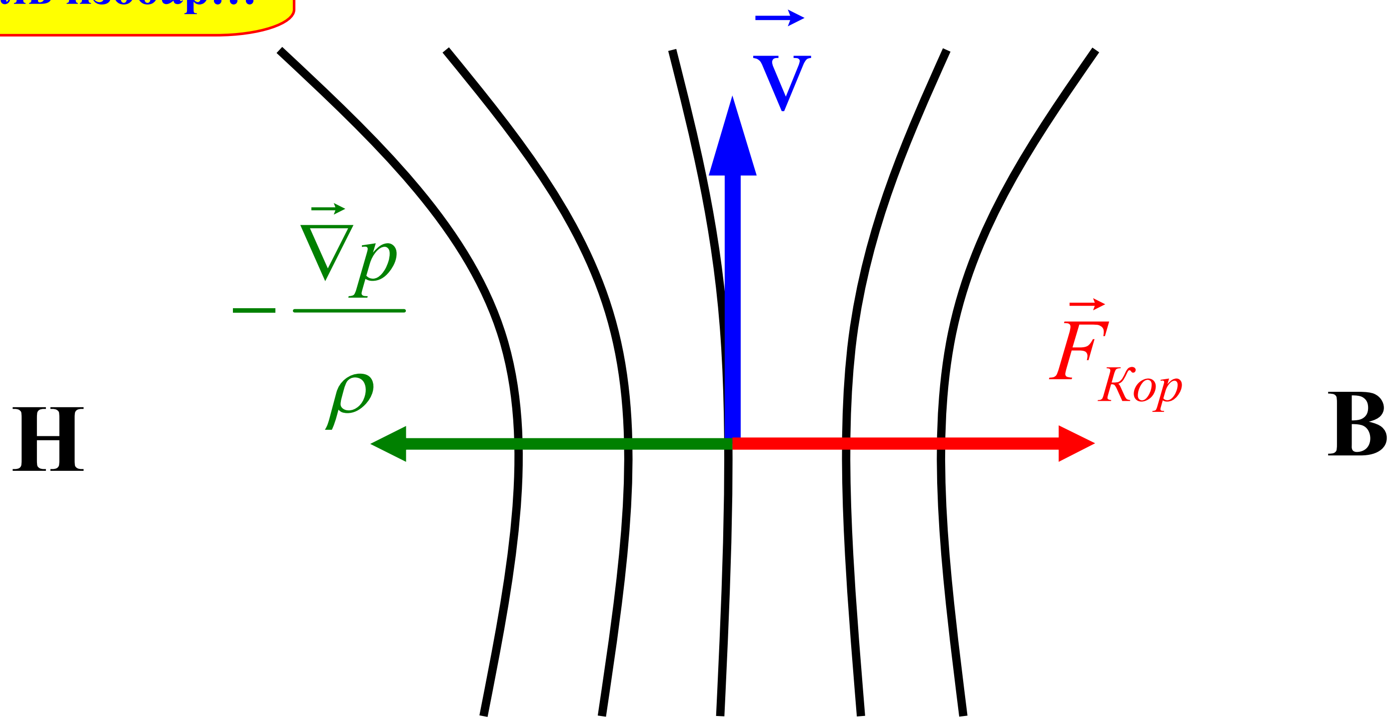
Геострофическое течение



Геостроофический ветер

Движение строго вдоль изобар!!!

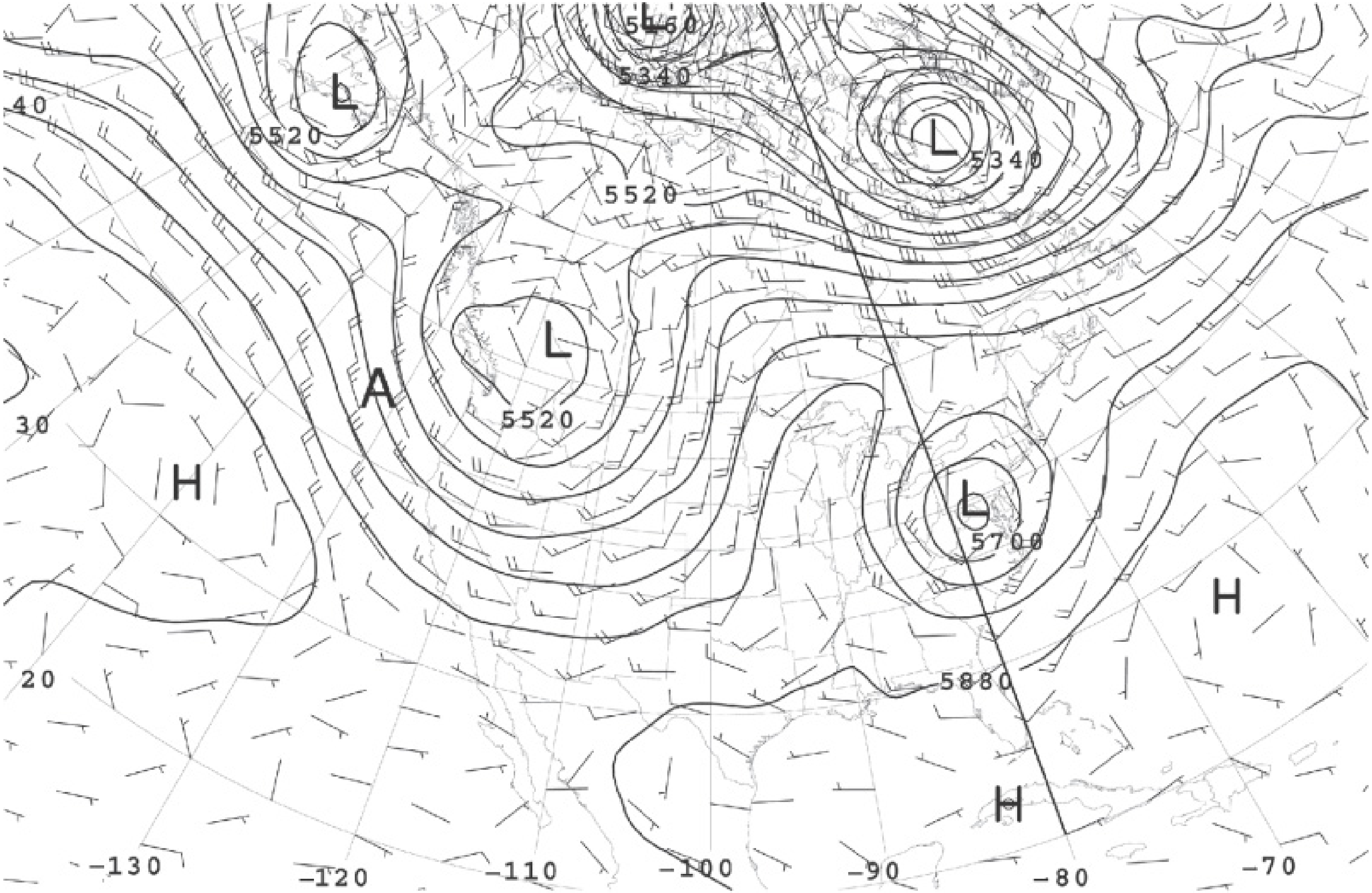
(Сев. полушарие)



Правило Бейс-Балло (голандский физик XVIII века):

«Если в северном полушарии вы встанете спиной к ветру, зона депрессии будет слева от вас, а в южном полушарии – наоборот»

Поля атмосферного давления (изолинии) и скорости ветра на высоте 500 мбар



«Геофизические» приближения:

3. Циклострофическое приближение

$$\frac{v^2}{r} - \frac{1}{\rho}\frac{\partial p}{\partial r} = 0$$