

Геофизика



2026 Лекция №7

Носов Михаил Александрович

отделение геофизики, физический факультет МГУ

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

Уравнения гидродинамики

Уравнение состояния

парциальное давление
водяного пара

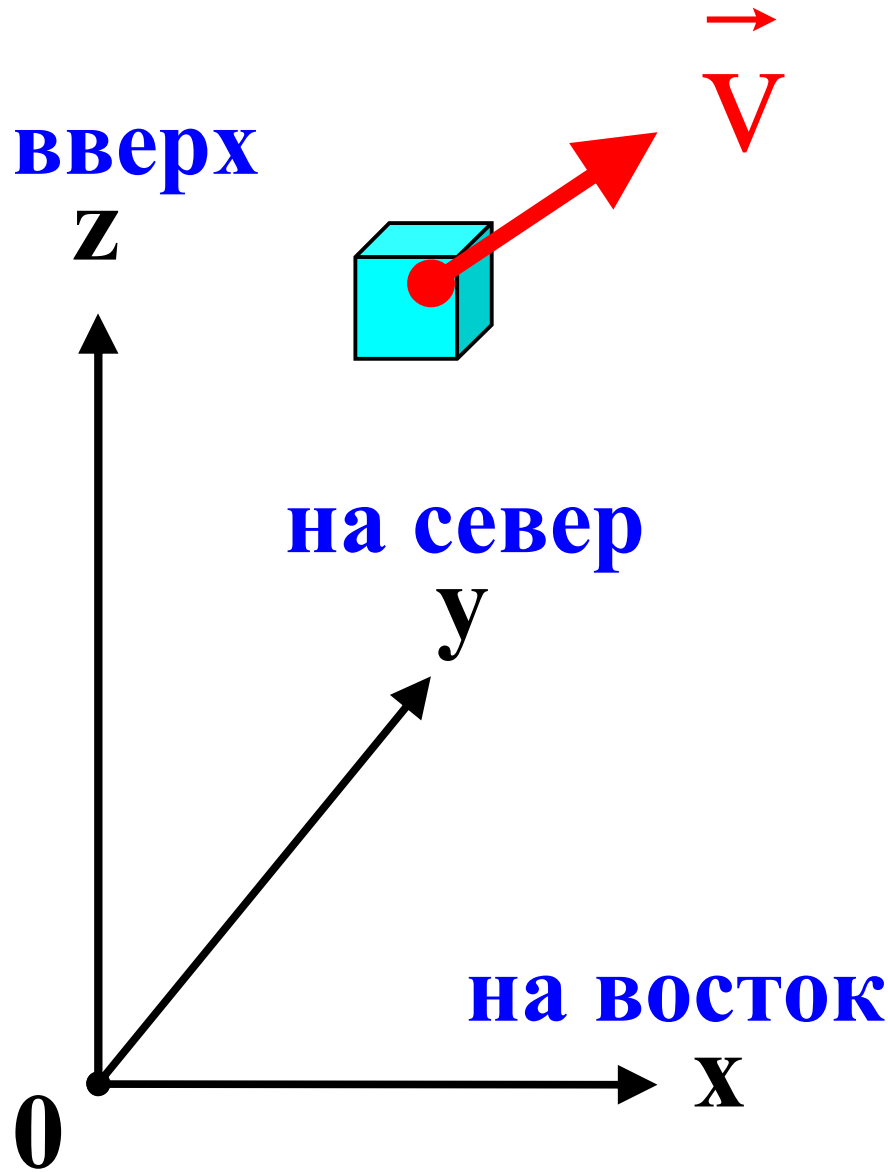
воздух

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

вода

соленость

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



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

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

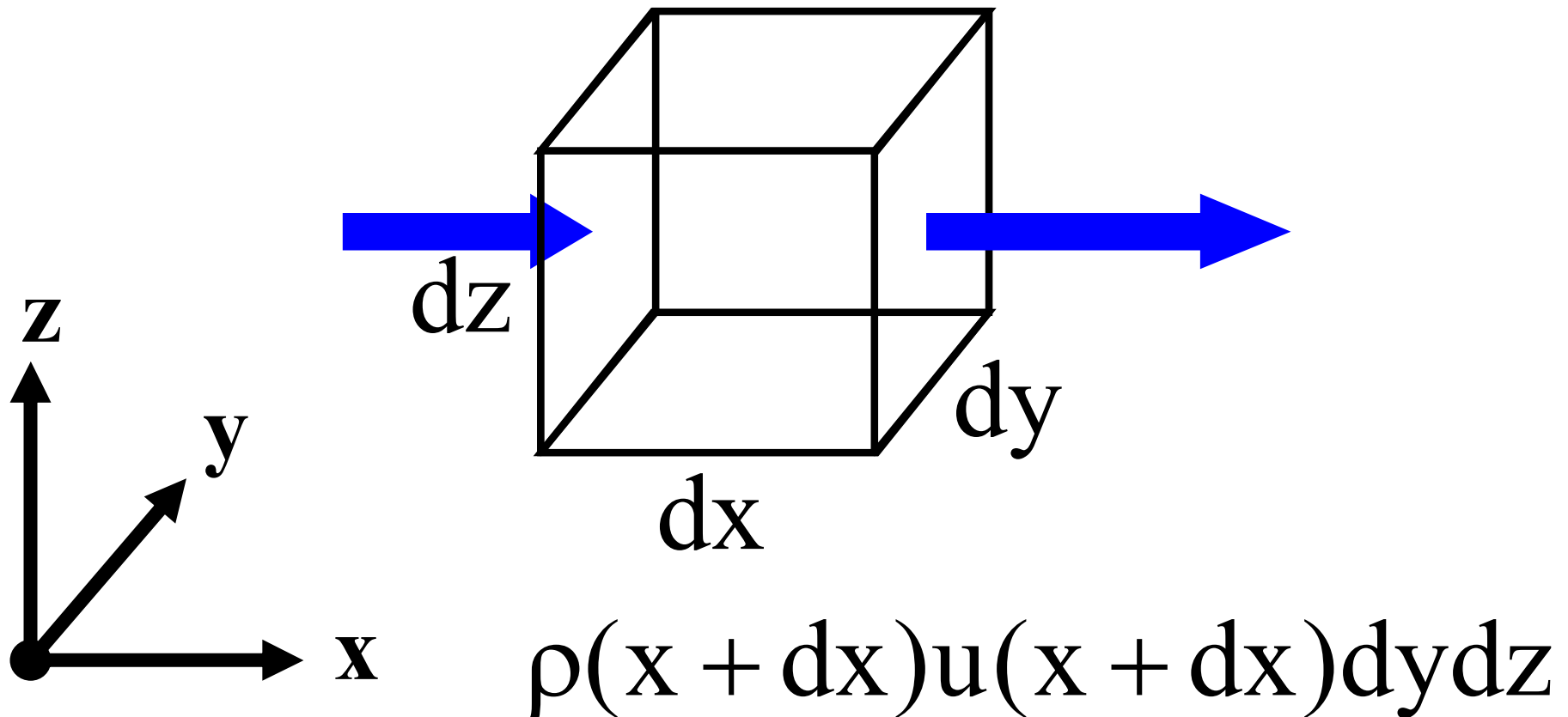
$$\vec{v} = \vec{v}(x, y, z, t)$$

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

$$\rho = \rho(x, y, z, t)$$

Уравнение неразрывности (закон сохранения массы)

$$\rho(x)u(x)dydz$$



$$\frac{\partial m}{\partial t} = dx dy dz \frac{\partial \rho}{\partial t} =$$

$$= -[\rho(x + dx)u(x + dx) - \rho(x)u(x)] dy dz$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \frac{\partial[\rho u]}{\partial x} - \frac{\partial[\rho v]}{\partial y} - \frac{\partial[\rho w]}{\partial z}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}[\rho \vec{v}] = 0$$

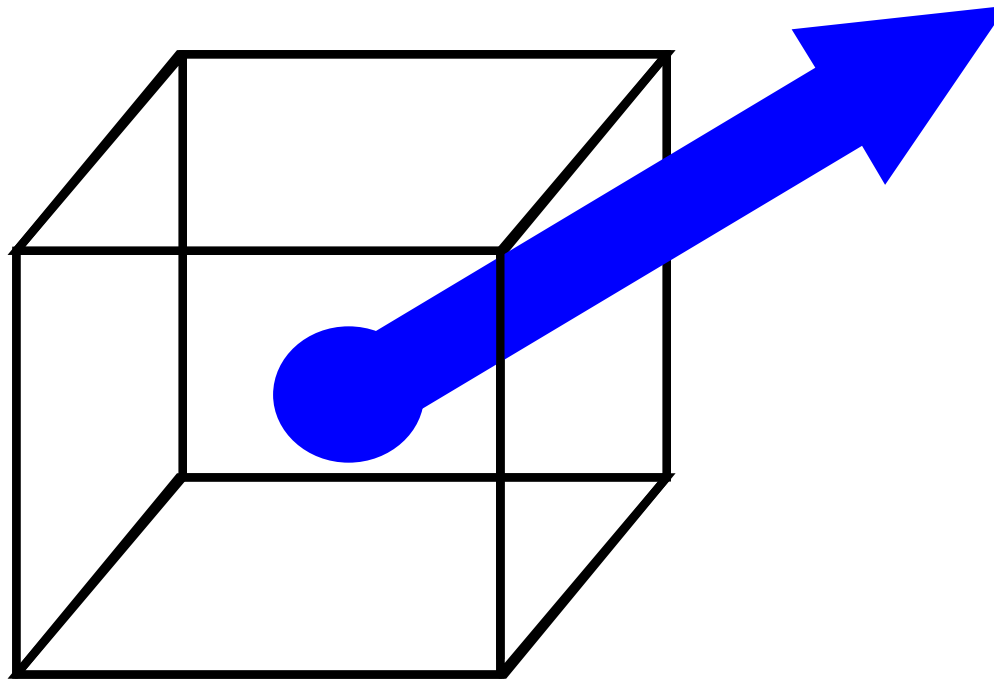
**уравнение
неразрывности**

2-й закон Ньютона для сплошной среды

$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{масс}} + \sum \vec{F}_{\text{поверхн}}$$

Массовые силы

$$F_{\text{масс}} \sim dm = dx dy dz \rho$$

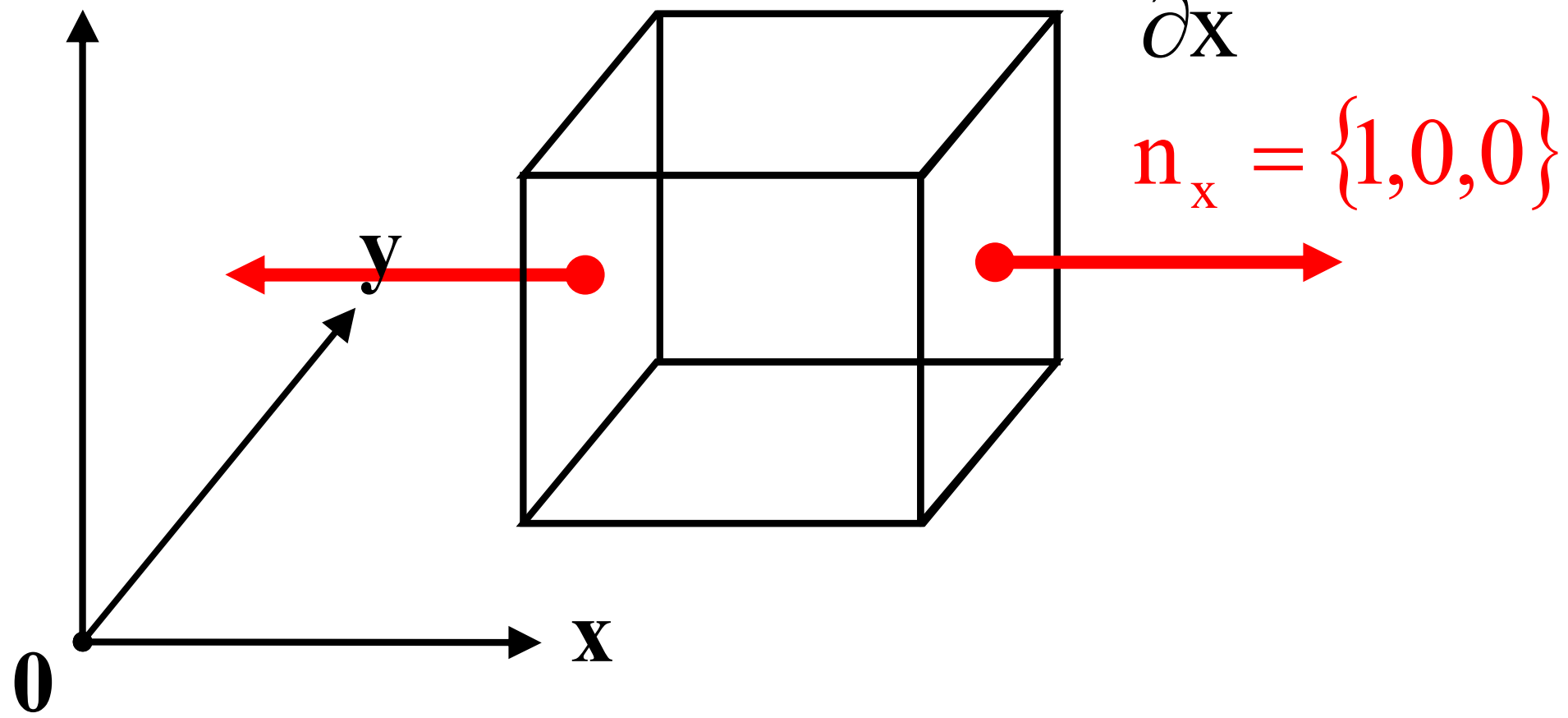


- сила притяжения (Земля, Луна, Солнце, ...)
- силы инерции (Кориолиса, центробежная)

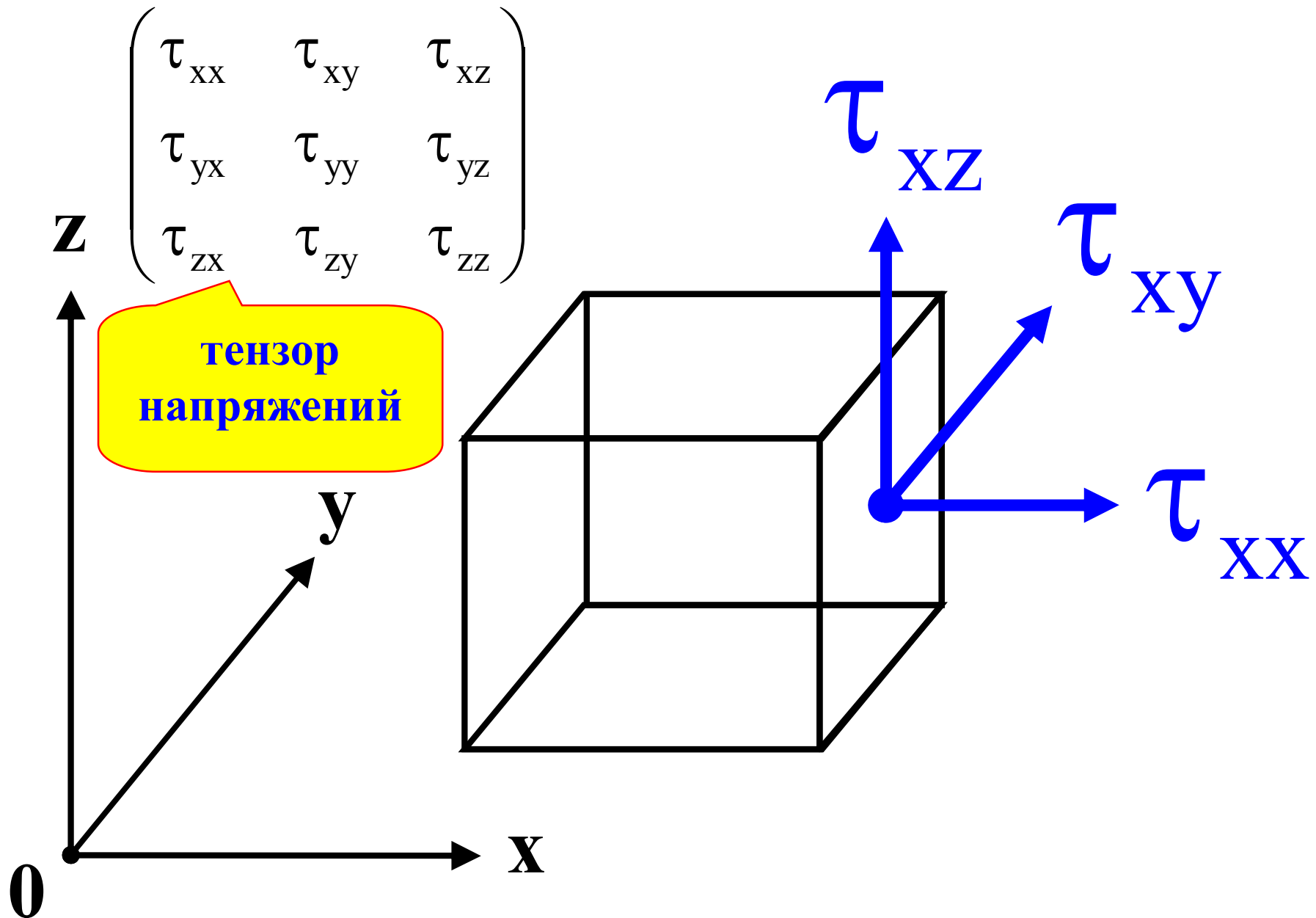
«Поверхностные» силы

$$F_{\text{поверхн}} = [\tau(x + dx) - \tau(x)] dydz$$

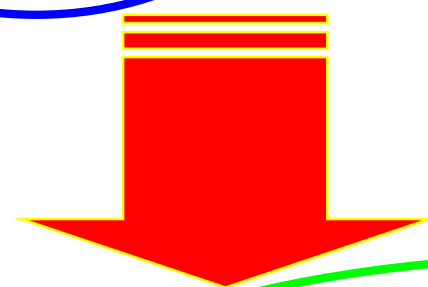
$$n_x' = \{-1, 0, 0\} \quad F_{\text{поверхн}} = \frac{\partial \tau}{\partial x} dx dy dz$$



«Поверхностные» силы



$$m\vec{a} = \sum \vec{F}_{\text{масс}} + \sum \vec{F}_{\text{поверхни}}$$



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

**сила
тяжести**

**сила
Кориолиса**

**сила
градиента
давления**

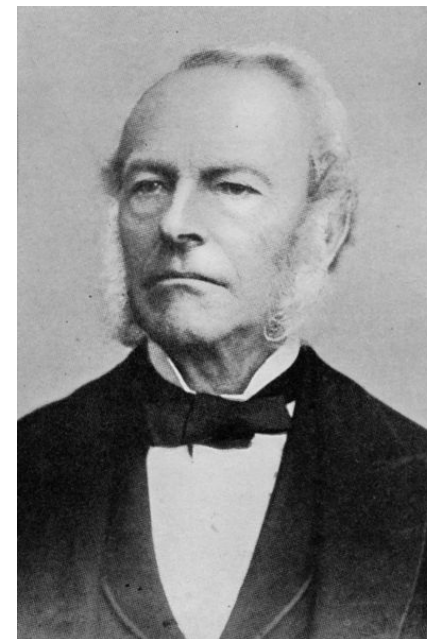
**сила
вязкого
трения**

Уравнение Навье-Стокса

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



Анри Навье
1785-1836
французский
механик и инженер

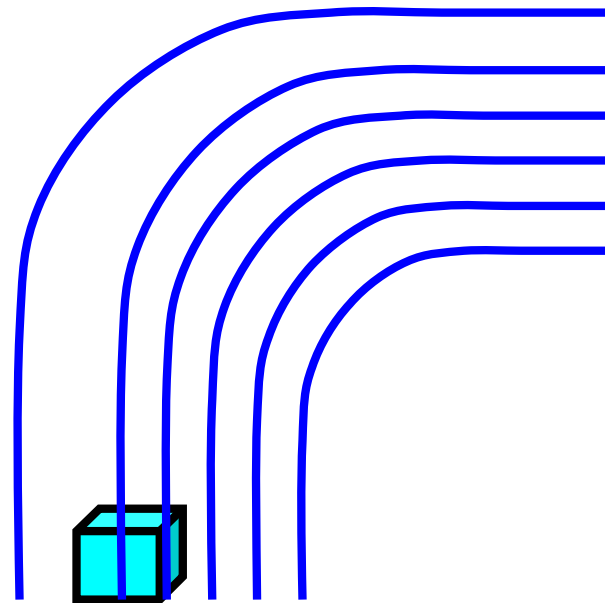


Джордж Стокс
1819-1903
английский физик и
математик

$$\vec{v} = \vec{v}(x(t), y(t), z(t), t)$$

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

**полная
производная**



Система уравнений гидродинамики (аэрогидромеханики)

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

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

закон сохранения
массы

2-й закон
Ньютона

уравнение
Навье-Стокса

уравнение
неразрывности

баротропность

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

уравнение
состояния

бароклинность?

Система уравнений гидродинамики

+уравнение переноса температуры

+уравнение переноса соли/водяного пара

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

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

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

**система
остается
замкнутой!!!**

Граничные условия на поверхностях, ограничивающих область решения задачи

условие прилипания

$$\vec{V} = 0 \text{ или } \vec{V} = \vec{V}_0$$

заданный поток тепла

$$-C_p \chi \frac{\partial T}{\partial z} = Q$$

заданное напряжение
(поток импульса)

$$\eta \frac{\partial u}{\partial z} = \tau$$

заданная температура

$$T = T_0$$

заданное давление

$$p = p_0$$

Граничные условия на поверхностях, ограничивающих область решения задачи

Поверхности могут быть подвижными и неизвестными, т.е. их положение определяется из решения задачи

Примеры:

- волны на поверхности воды
- течения с возможностью фазовых переходов (лед-вода, мантия-ядро Земли)
- размыв или выветривание
- etc.

Начальные условия (при $t=0$)

$$\vec{v} = \vec{v}_0(x, y, z)$$

$$p = p_0(x, y, z)$$

$$\rho = \rho_0(x, y, z)$$

$$T = T_0(x, y, z)$$

$$s = s_0(x, y, z)$$

$$\rho_0 = \rho(p_0, T_0, s_0)$$

$$\text{при } \vec{v}_0 = 0$$

$$-\frac{1}{\rho_0} \vec{\nabla} p_0 + \vec{g} = 0$$

геофизическая практика

**Проблема усвоения данных
наблюдений в численные модели**

**Основные
подходы к
упрощению
уравнений
гидродинамики**

Приближение №1:

«среда с постоянной плотностью

$\rho = \rho_0 = \text{const}$ (в.т.ч. несжимаемая)»

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

~~$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) = 0$~~ ~~$+ \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \text{grad div } \vec{v}$~~

$\rho = \rho(p)$

ρ_0

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

Приближение №1:

«среда с постоянной плотностью»

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} +$$

В крупномасштабных течениях
атмосферы и океана $H \ll L$

$$\Rightarrow w_{\text{верт}} \ll u_{\text{гориз}}$$

$\Delta \vec{v}$

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

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


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

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

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

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

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


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

Приближение №2: «стационарное течение»

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

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

$$+ \left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}$$

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

Прибли

понижается порядок уравнения

«идеальная (невязкая) жидкость»

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

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

$$+ \cancel{\left(\zeta + \frac{\nu}{3} \right) \operatorname{grad} \operatorname{div} \vec{v}}$$

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

Изменение граничного условия:

«прилипание» → «непротекание»

$$\{v_{\tau}=0, v_n=0\} \rightarrow \{v_n=0\}$$

Приближение №4:

«идеальная жидкость постоянной плотности, линейное приближение»

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

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

если $\left\{ \begin{array}{l} \vec{v}_1, p_1 \\ \vec{v}_2, p_2 \end{array} \right\}$ – решения системы, то \Rightarrow

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

где A, B – 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

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

«Геофизические» приближения:

1. Гидростатическое приближение

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

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

$$H \ll L$$

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

«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

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

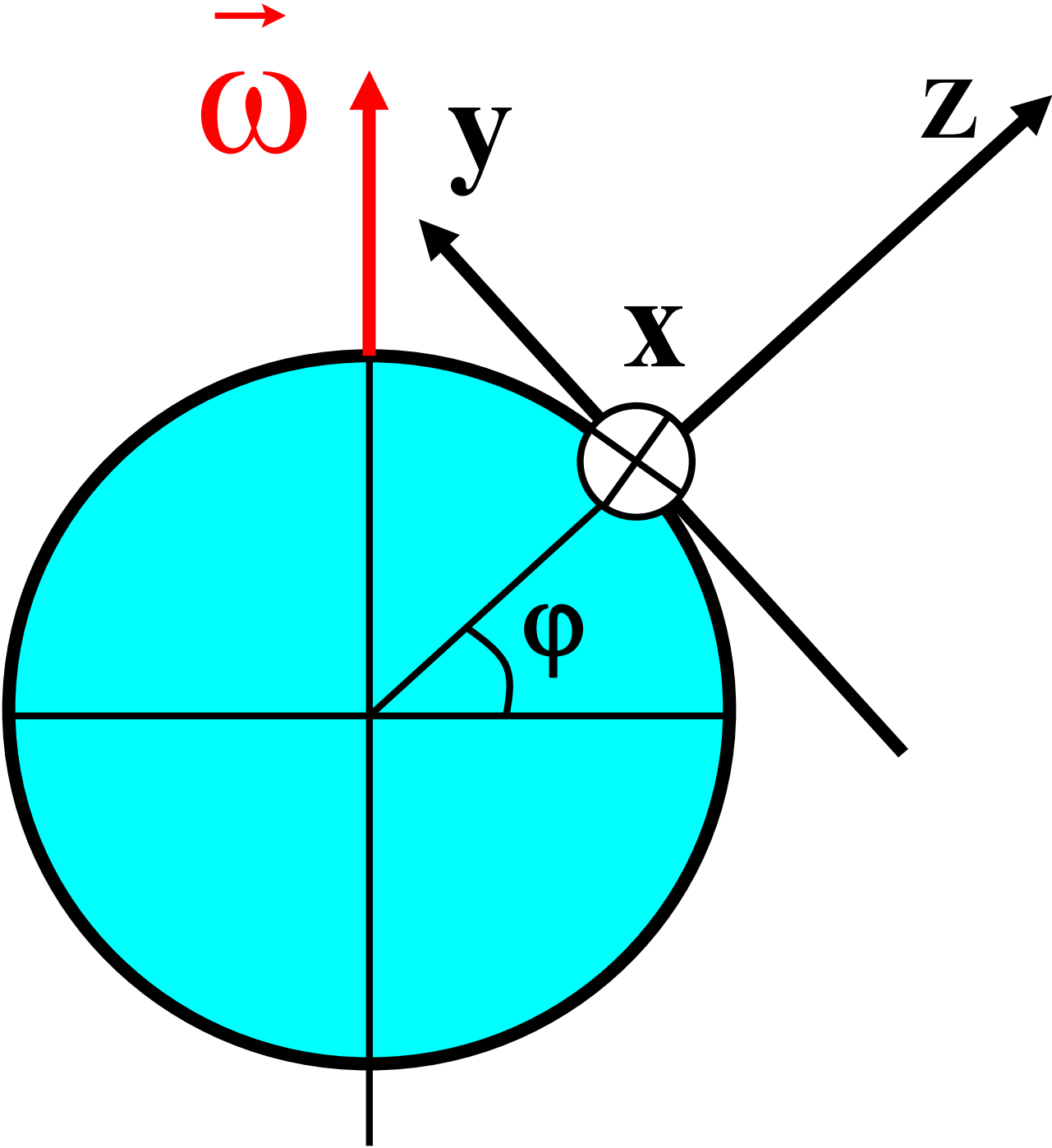
«Геофизические» приближения:

2. Геострофическое приближение

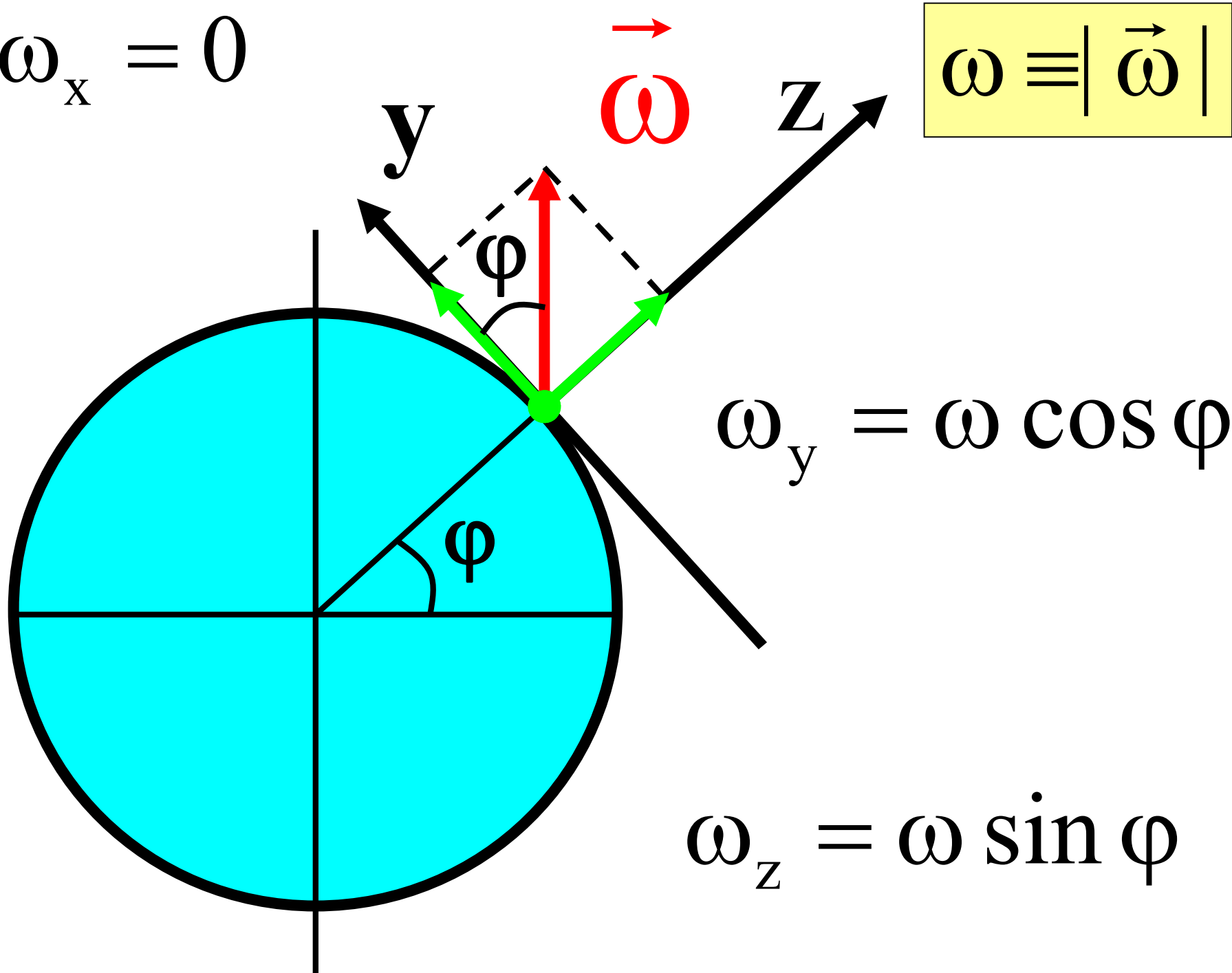
$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + (\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v} = -\frac{\vec{\nabla} p}{\rho_0} + \vec{g} + 2[\vec{v} \times \vec{\omega}]$$

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

по
горизонтали
не действует!



$$\omega_x = 0$$



$$\omega \equiv |\vec{\omega}|$$

$$\omega_y = \omega \cos \varphi$$

$$\omega_z = \omega \sin \varphi$$

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

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

$$2[\vec{v} \times \vec{\omega}] = 2 \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ u & v & w \\ \omega_x & \omega_y & \omega_z \end{vmatrix} = 2 \begin{pmatrix} v\omega_z - w\omega_y \\ w\omega_x - u\omega_z \\ u\omega_y - v\omega_x \end{pmatrix} =$$

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

традиционное приближение

2. $F_z^{\text{Кор}} = 0$

$$= 2 \begin{pmatrix} v\omega \sin \varphi - w\omega \cos \varphi \\ -u\omega \sin \varphi \\ u\omega \cos \varphi \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 2v\omega \sin \varphi \\ -2u\omega \sin \varphi \\ 0 \end{pmatrix}$$

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

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

**параметр
Кориолиса**

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

$$\sim U^2 / L$$

геострофическое
приближение
работает при

$$U \cdot f$$

на экваторе
 $Ro \rightarrow \infty$

$$Ro \ll 1$$

число
Кибеля-
Росби

$$Ro = \frac{|(\vec{v}, \vec{\nabla}) \vec{v}|}{|2[\vec{v} \times \vec{\omega}]|} \sim \frac{U^2 / L}{U \cdot f} = \frac{U}{L \cdot f}$$



Copyright © 2008, Elsevier Inc. All rights reserved.

**Carl-Gustaf
Rossby**
Swedish-US
meteorologist
1898-1957

**Число
Россби
(Кибеля-
Россби)**



**Кибель Илья
Афанасьевич**
советский
математик
гидромеханик и
метеоролог
1904-1970

$$Ro = \frac{U}{L \cdot f}$$

Оценка числа Россби для природных условий

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

$$f = 2\omega \sin \varphi = \frac{4\pi}{T} \sin \varphi \sim 10^{-4} \text{ c}^{-1}$$

геострофическое
приближение

сидерический
период
вращения Земли
23 ч 56 мин
4.0905 с

$$f_{\text{max}} \approx 1.458 \cdot 10^{-4} \text{ c}^{-1}$$

хорошо работает

$$R_o = \frac{1[\text{м/с}]}{10^6[\text{м}] \times 10^{-4}[\text{c}^{-1}]} \approx 0.01$$

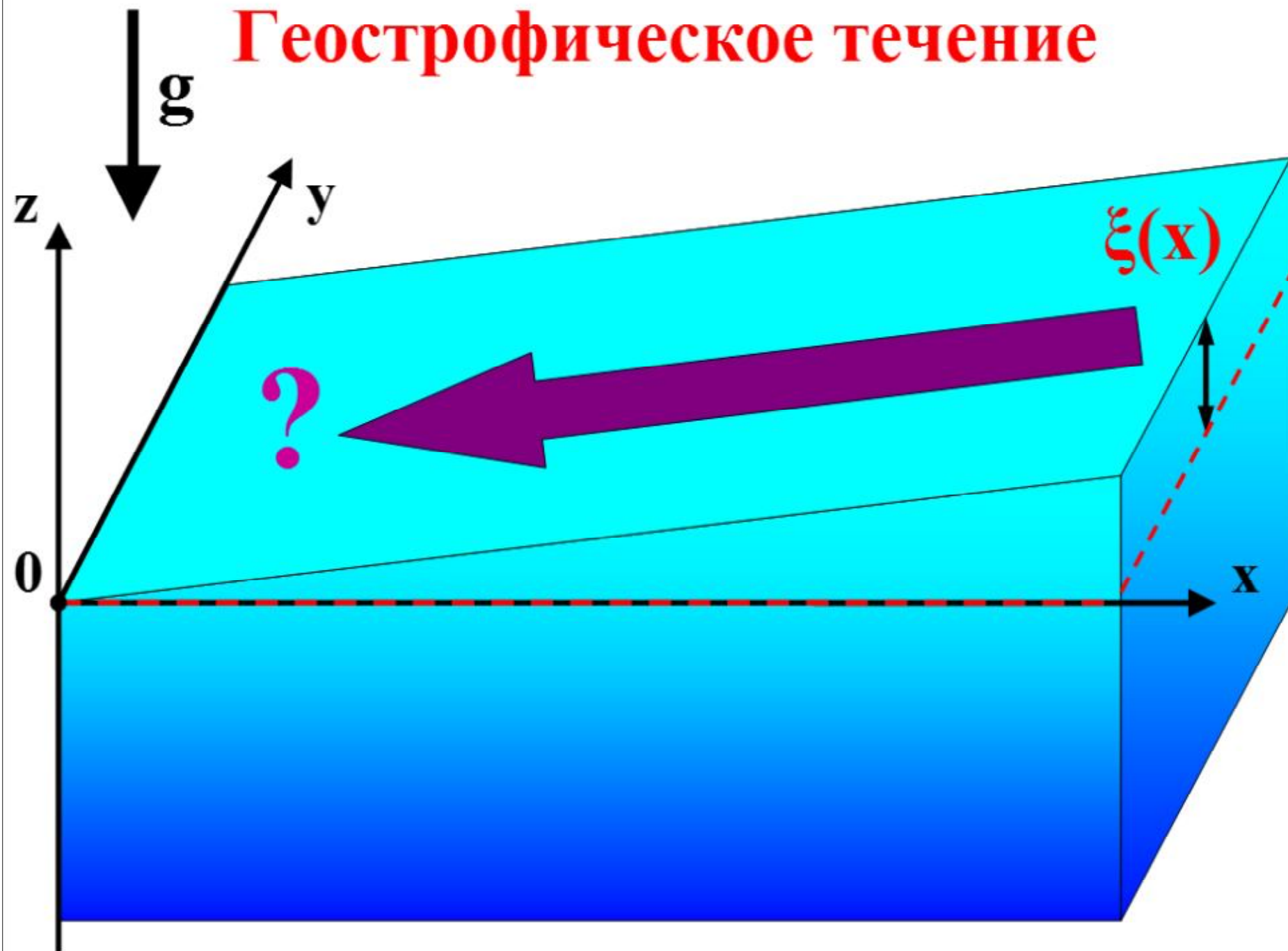
работает

$$R_o = \frac{1[\text{м/с}]}{10^5[\text{м}] \times 10^{-4}[\text{c}^{-1}]} \approx 0.1$$

плохо работает

$$R_o = \frac{1[\text{м/с}]}{10^4[\text{м}] \times 10^{-4}[\text{c}^{-1}]} \approx 1$$

Геострофическое течение



Геострофическое и гидростатическое приближения

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

$$y: \quad -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - f u = 0 \quad \vec{v} = (u, v)$$

$$p = p_{\text{атм}} + \rho_0 g (\xi - z)$$

$$z: \quad -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial z} - g = 0$$

$$\int_z^{\xi} dz$$

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

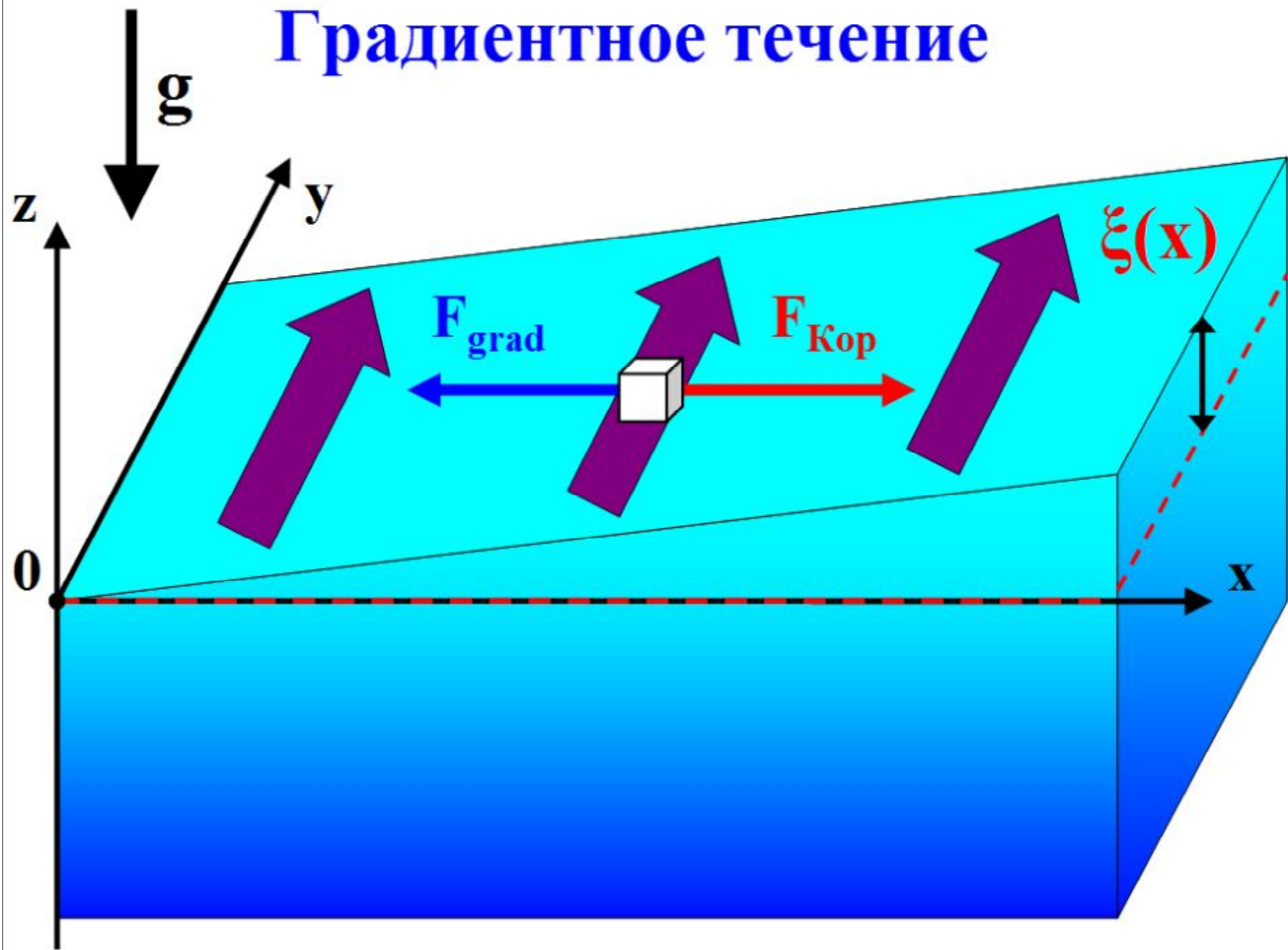
$$\zeta = \xi(\mathbf{x})$$

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

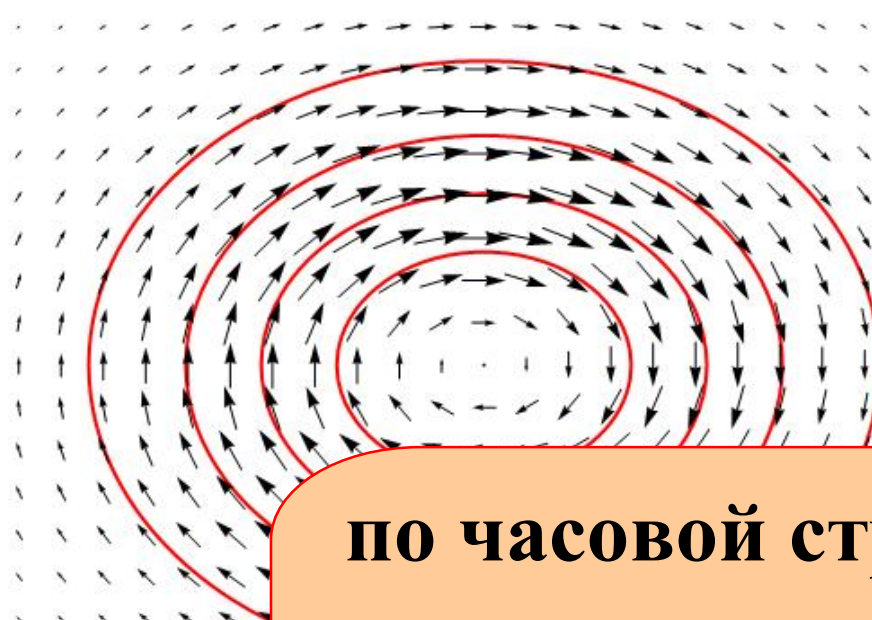
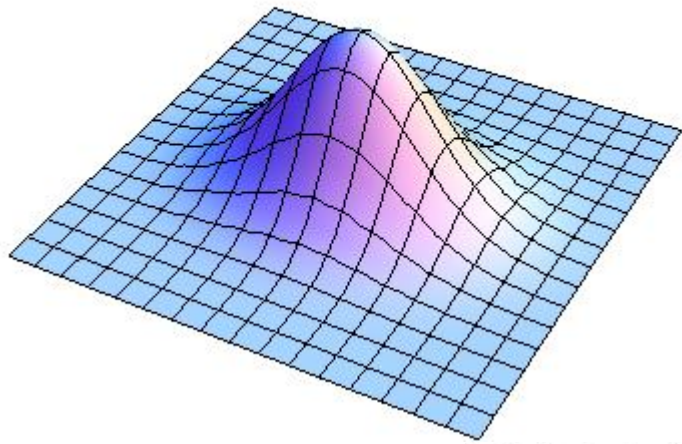
$$x : u = 0$$

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

Градиентное течение



Геострофическое течение вблизи области **поднятия** уровня (Сев.полушарие)



**антициклонический
геострофический
вихрь**

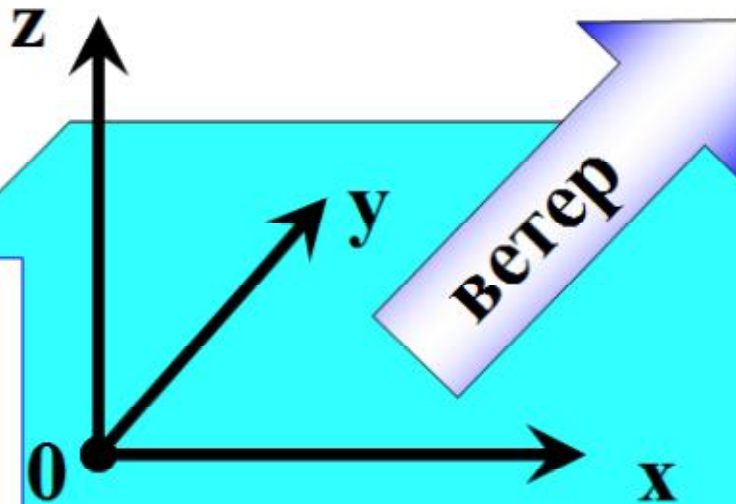
**по часовой стрелке
в сев.полушарии, в
южном полушании
– в обратном
направлении**

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:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\left\{ \begin{array}{l} 2v\omega \sin \varphi + v \left(\frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = 0 \\ -2u\omega \sin \varphi + v \left(\frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = 0 \end{array} \right.$$

для дальнейшего решения не требуется

$$\begin{cases} f v + v \frac{d^2 u}{dz^2} = 0 \\ -f u + v \frac{d^2 v}{dz^2} = 0 \end{cases}$$

Система
обыкновенных
дифференциальных
уравнений

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

Граничные условия

Поверхность воды:

Поведение решения
на глубине:

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

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

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

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

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 ($z = -\infty$)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Решение задачи Экмана:

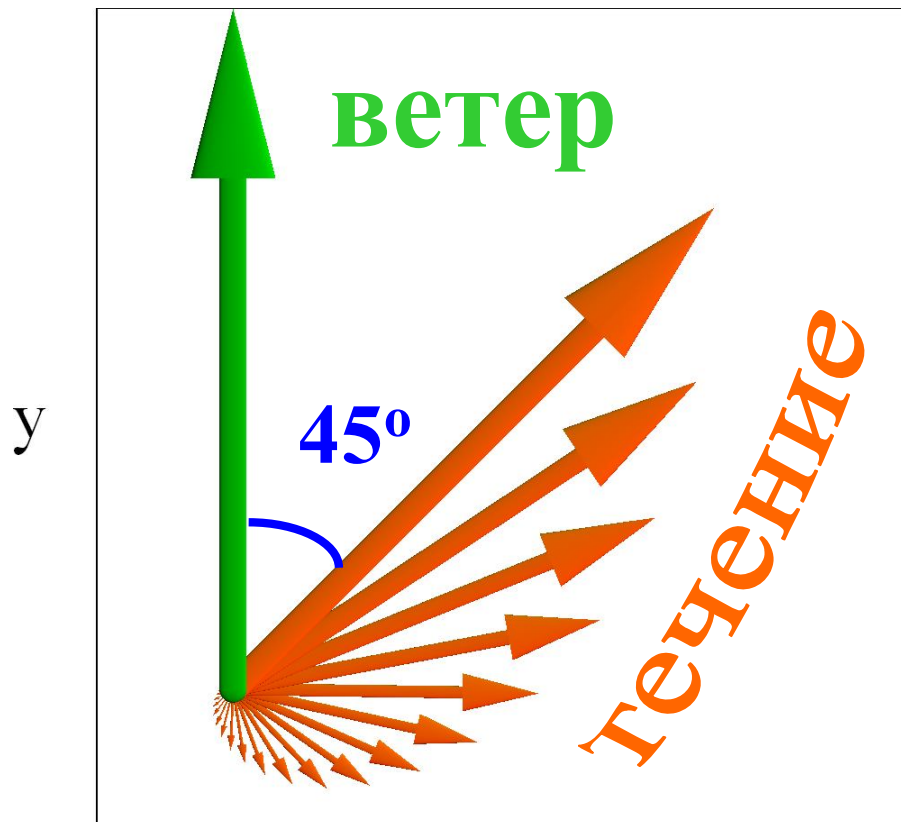
$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

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

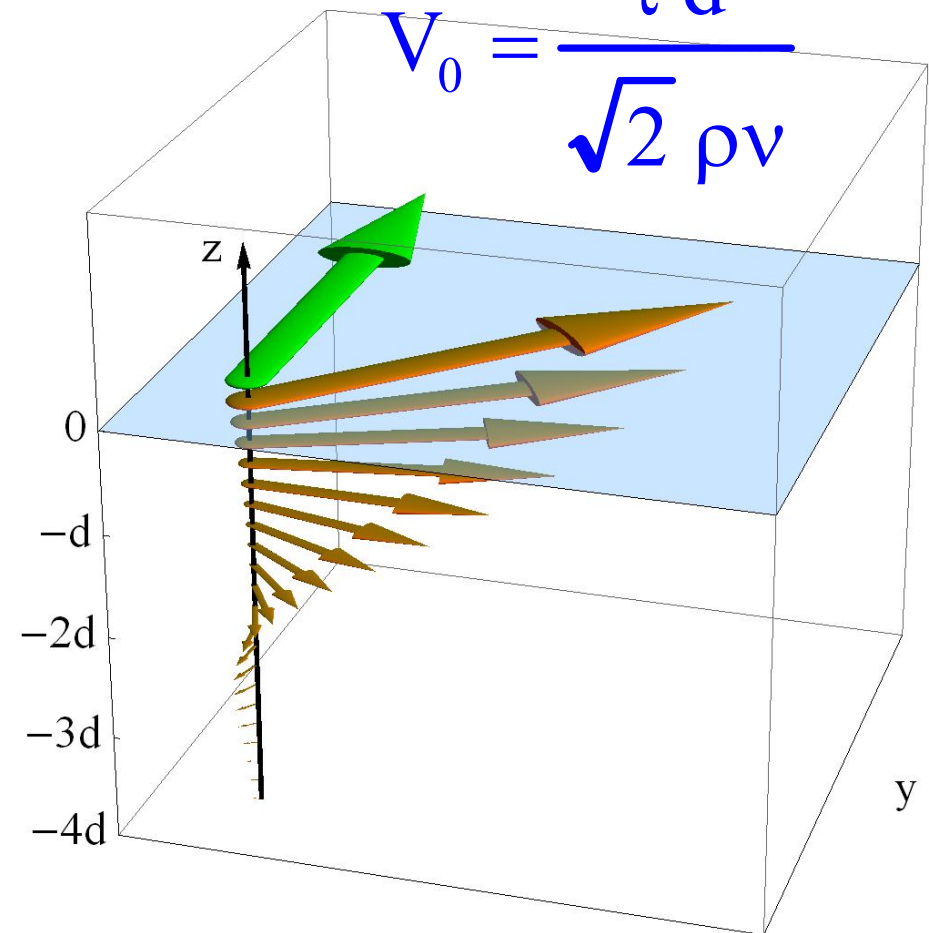
глубина Экмана

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

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



x



x

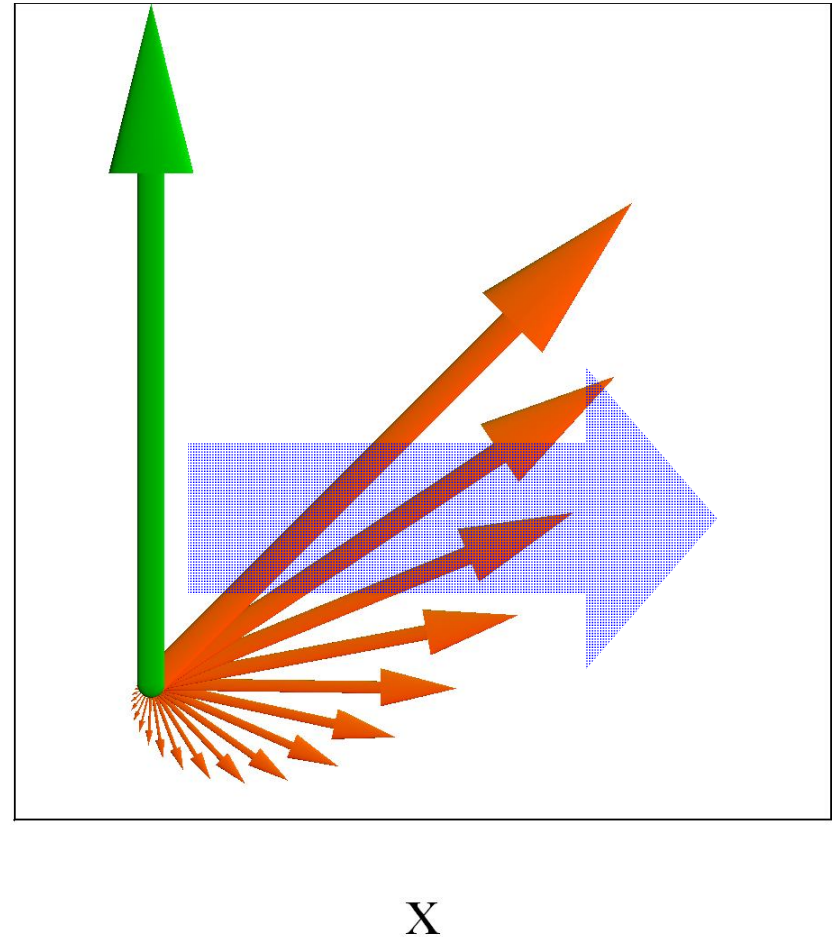
Направление интегрального переноса вод

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

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

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

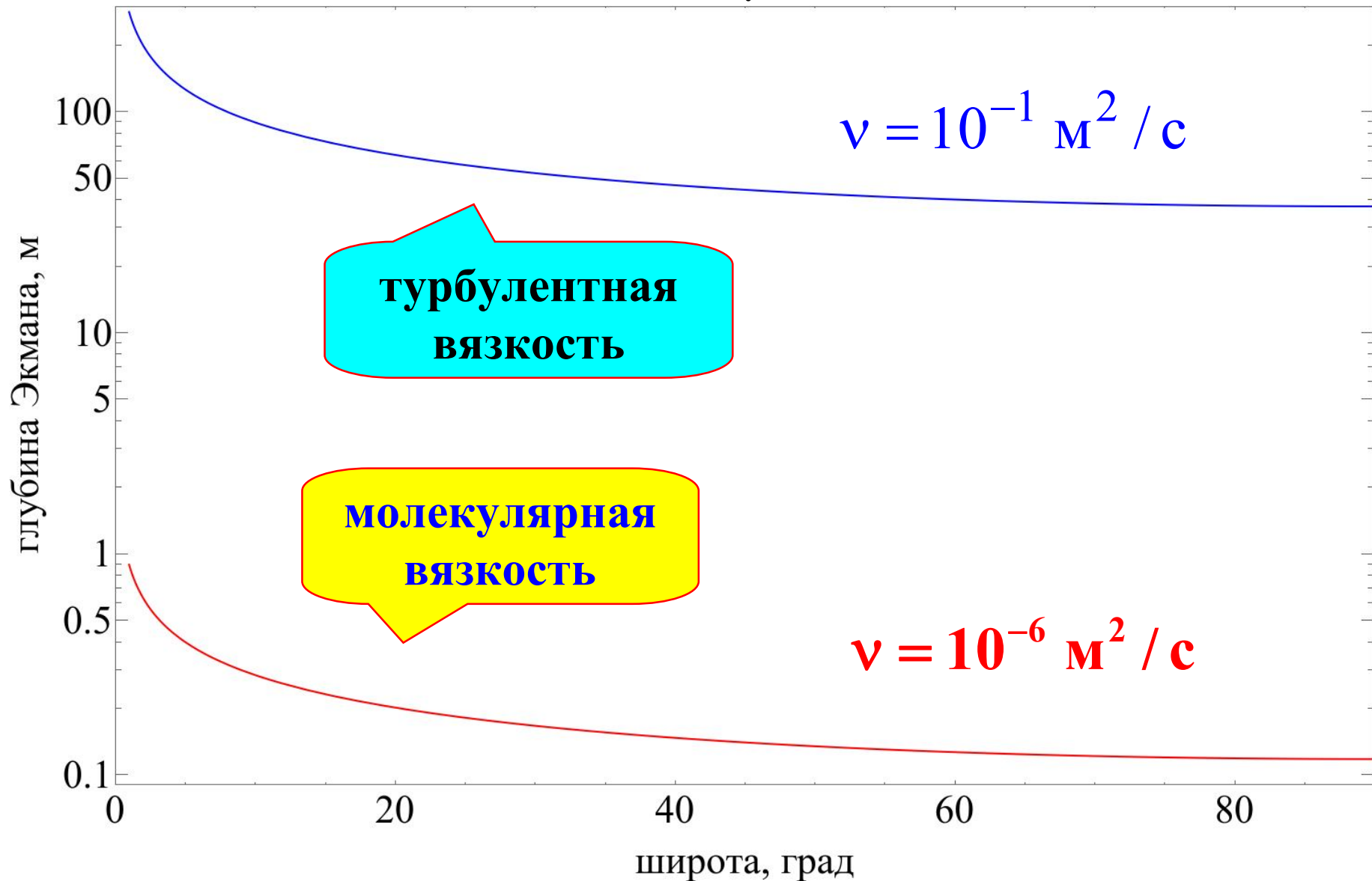
$$\int_{-\infty}^0 v(z) dz = 0$$



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

Глубина Экмана

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



Задача Экмана для океана

конечной глубины

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

Граничные условия:

поверхность ($z = 0$)

$$u' = 0$$

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

дно ($z = -H$)

$$u(-H) = 0$$

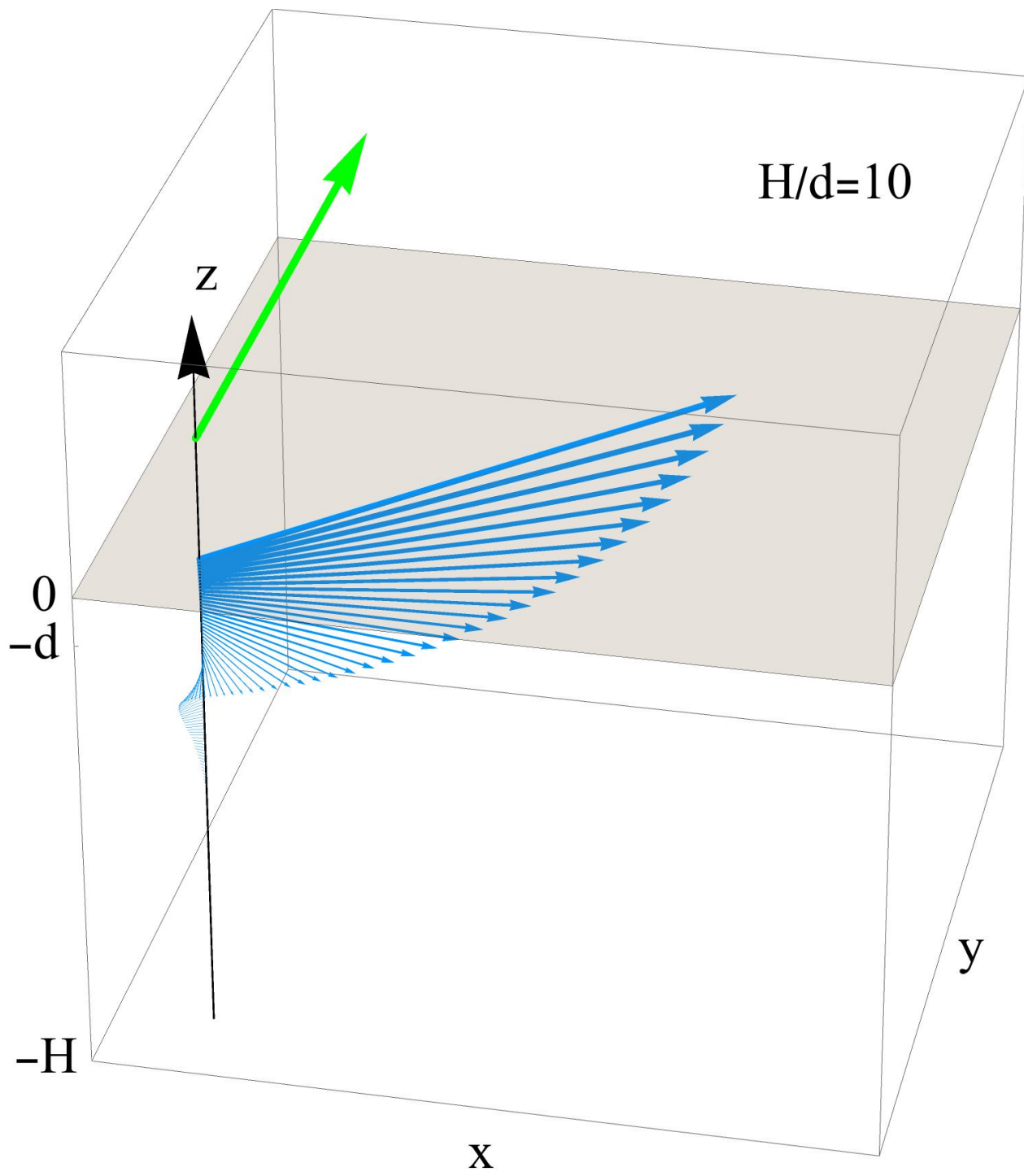
$$v(-H) = 0$$

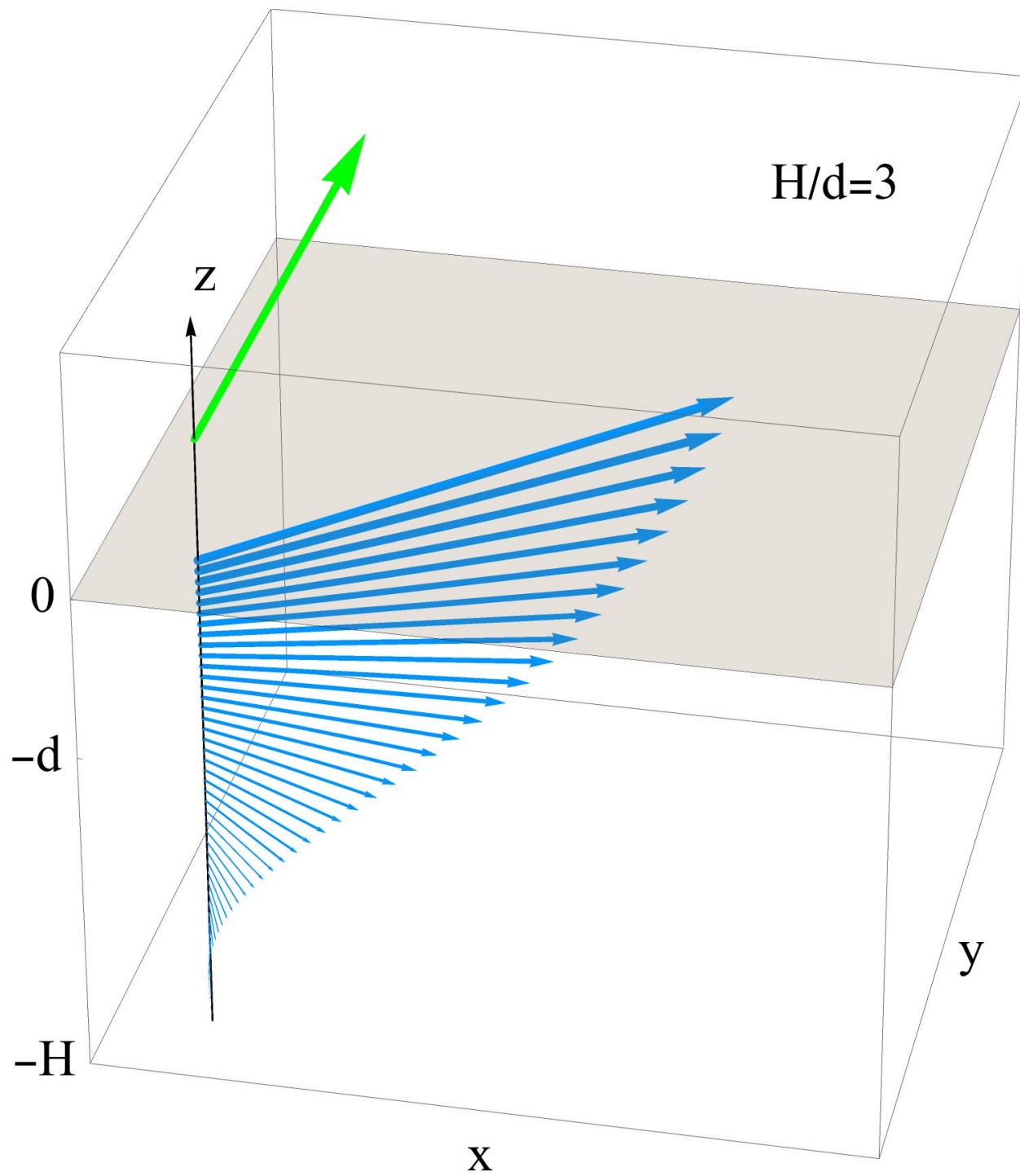
условие
прилипания

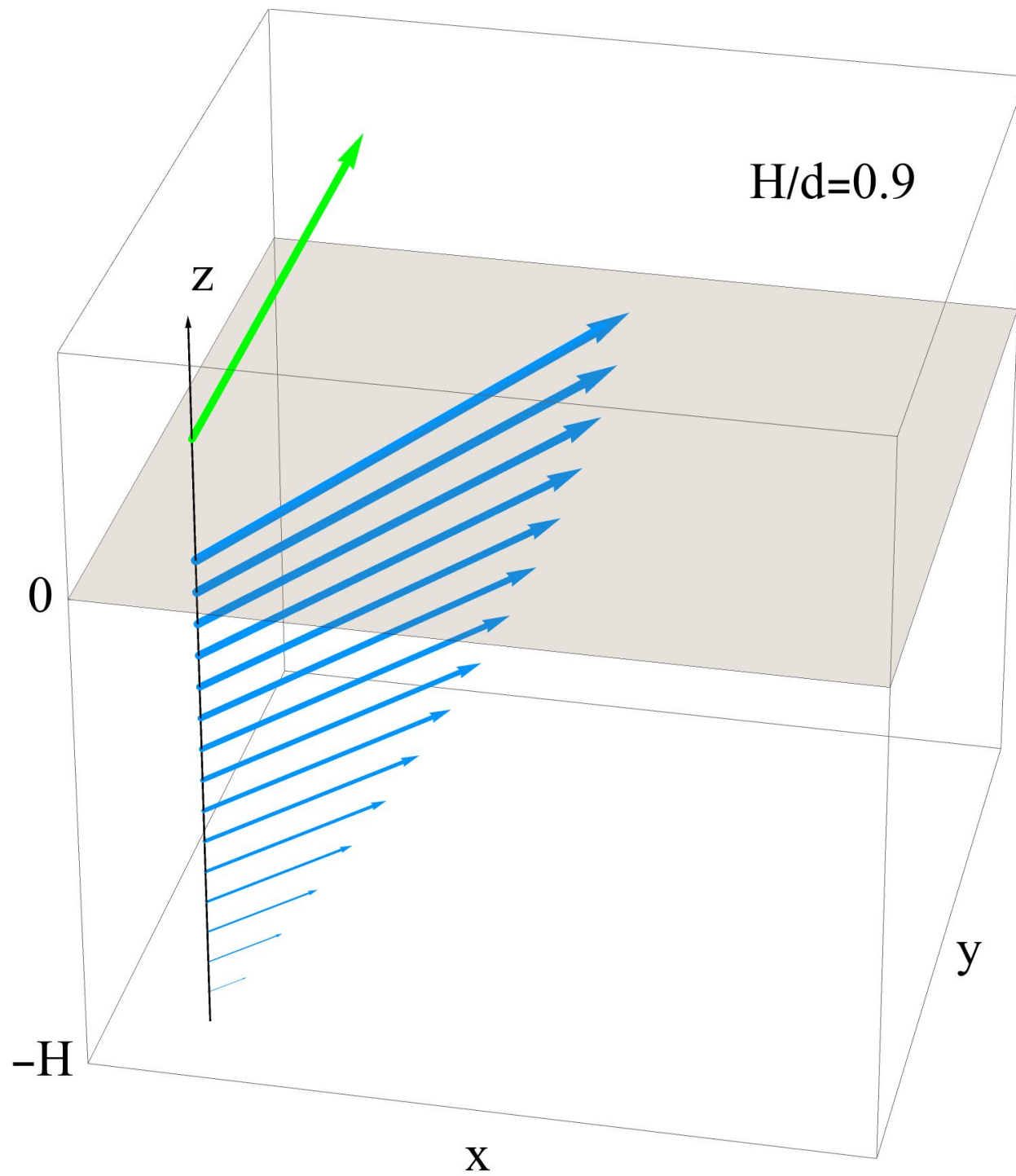
$$Z'' - \alpha^2 Z = 0, \quad \text{где} \quad \alpha = \sqrt{i \cdot f / v}$$

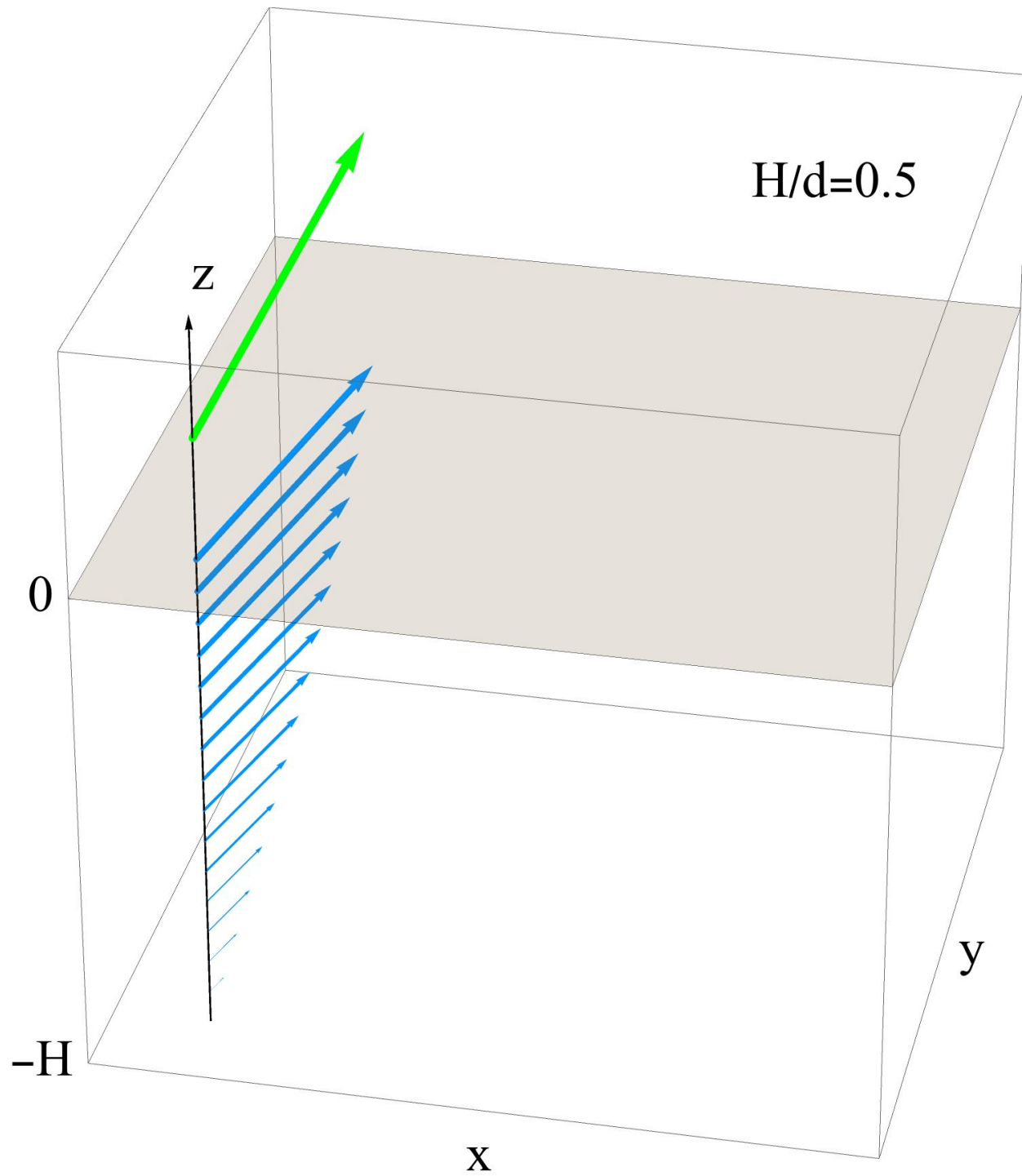
$$Z = A e^{\alpha z} + B e^{-\alpha z}$$

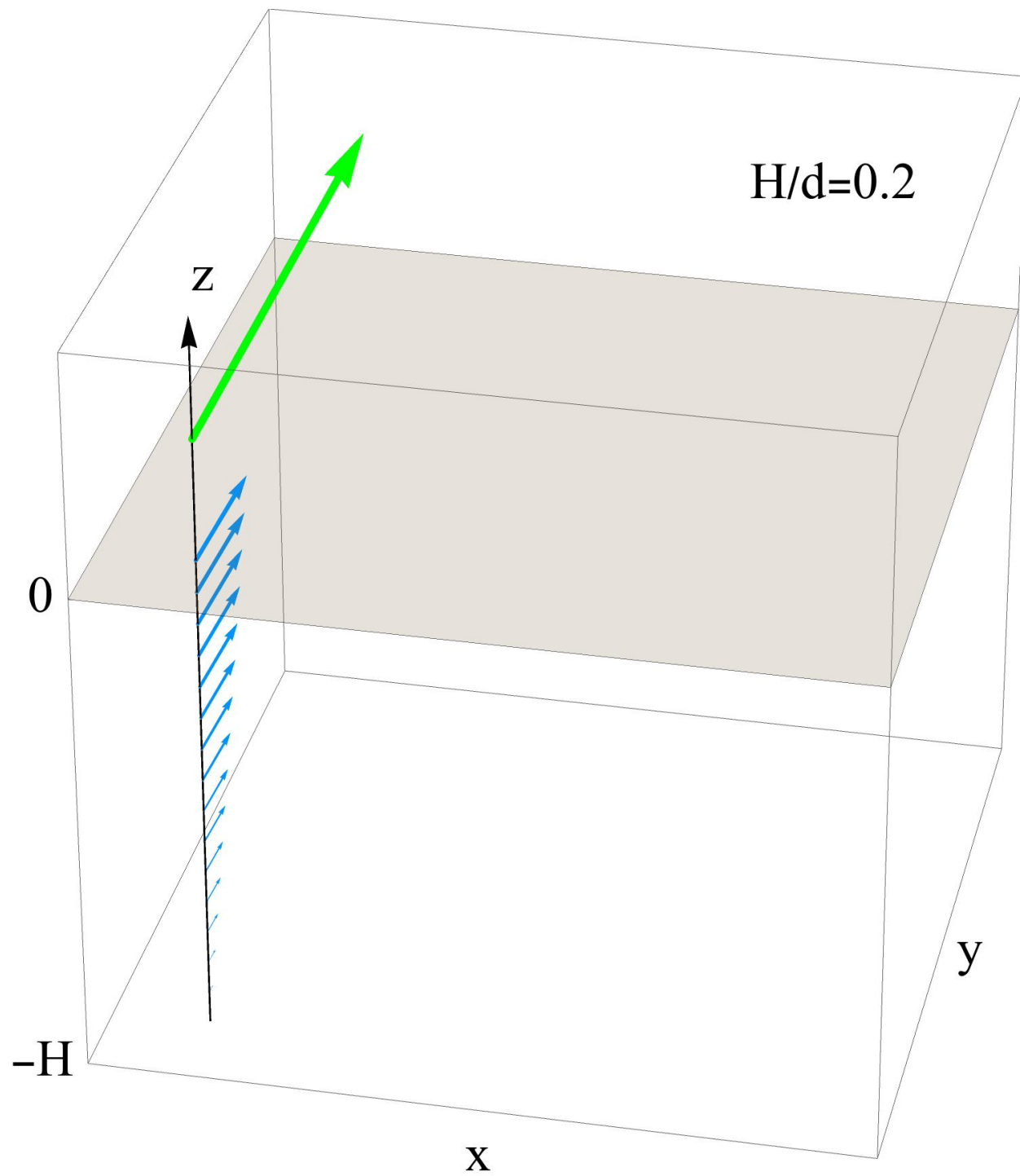
$$A \neq 0 \quad B \neq 0$$



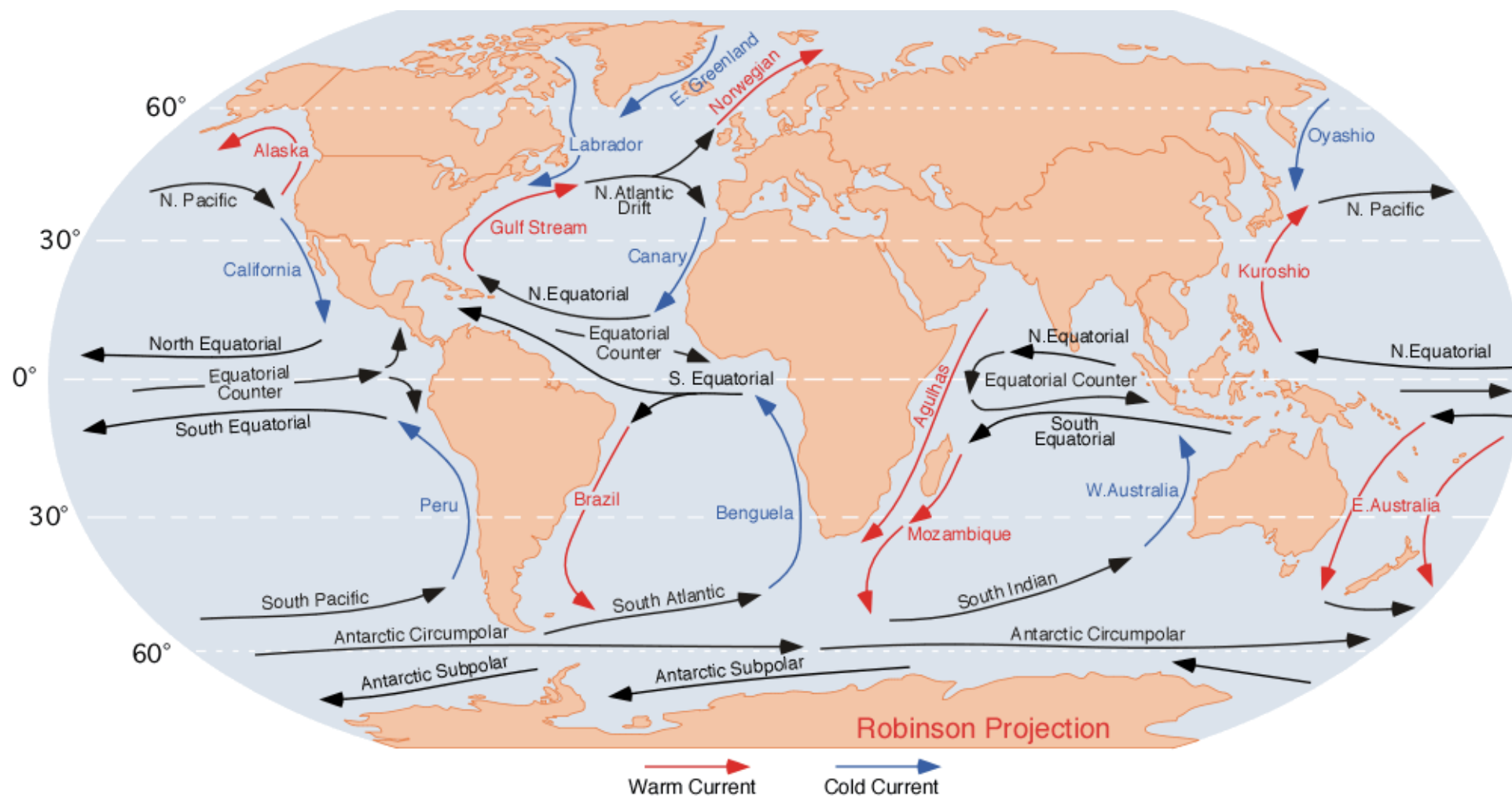




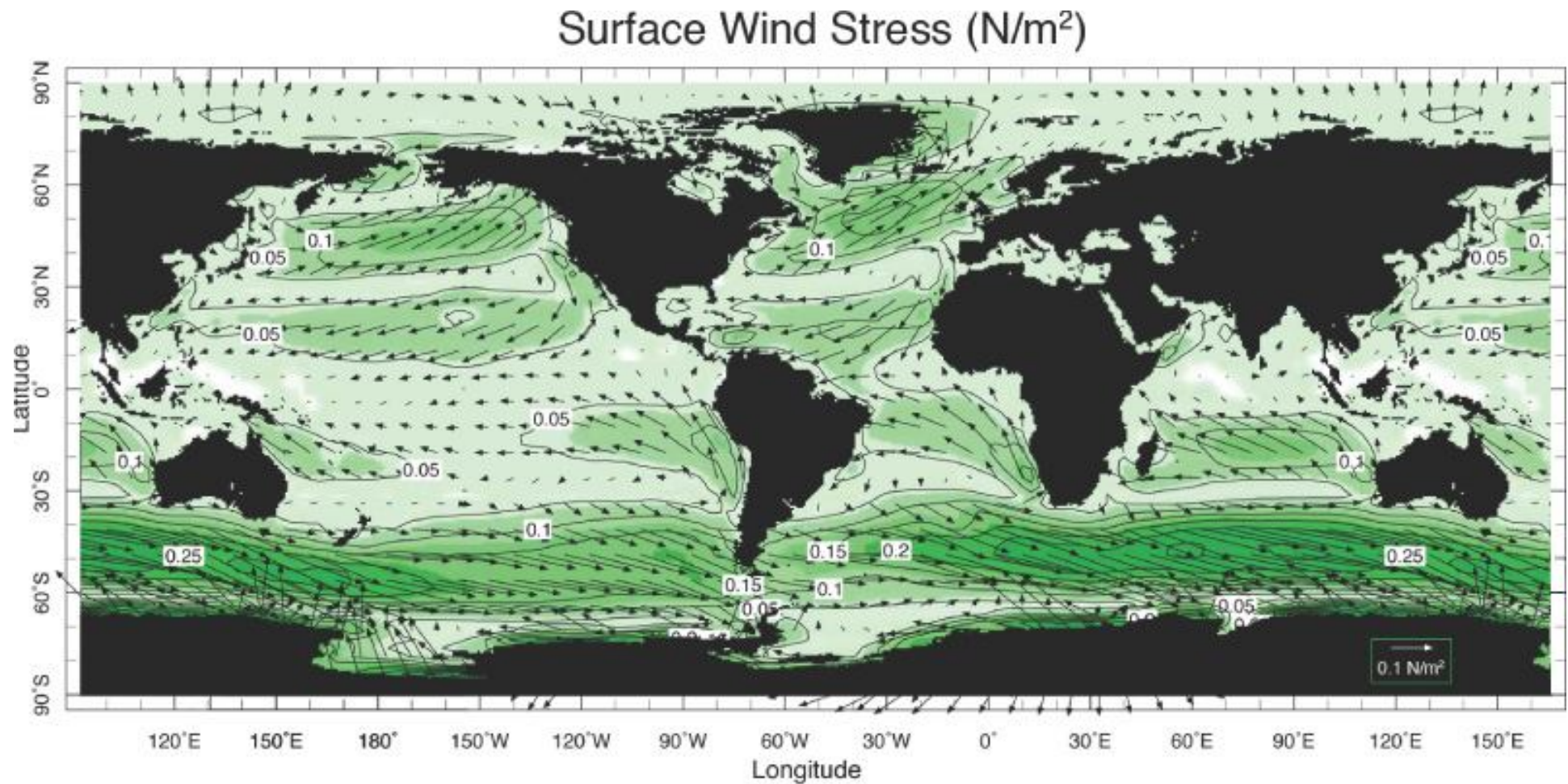




Течения на поверхности Мирового океана

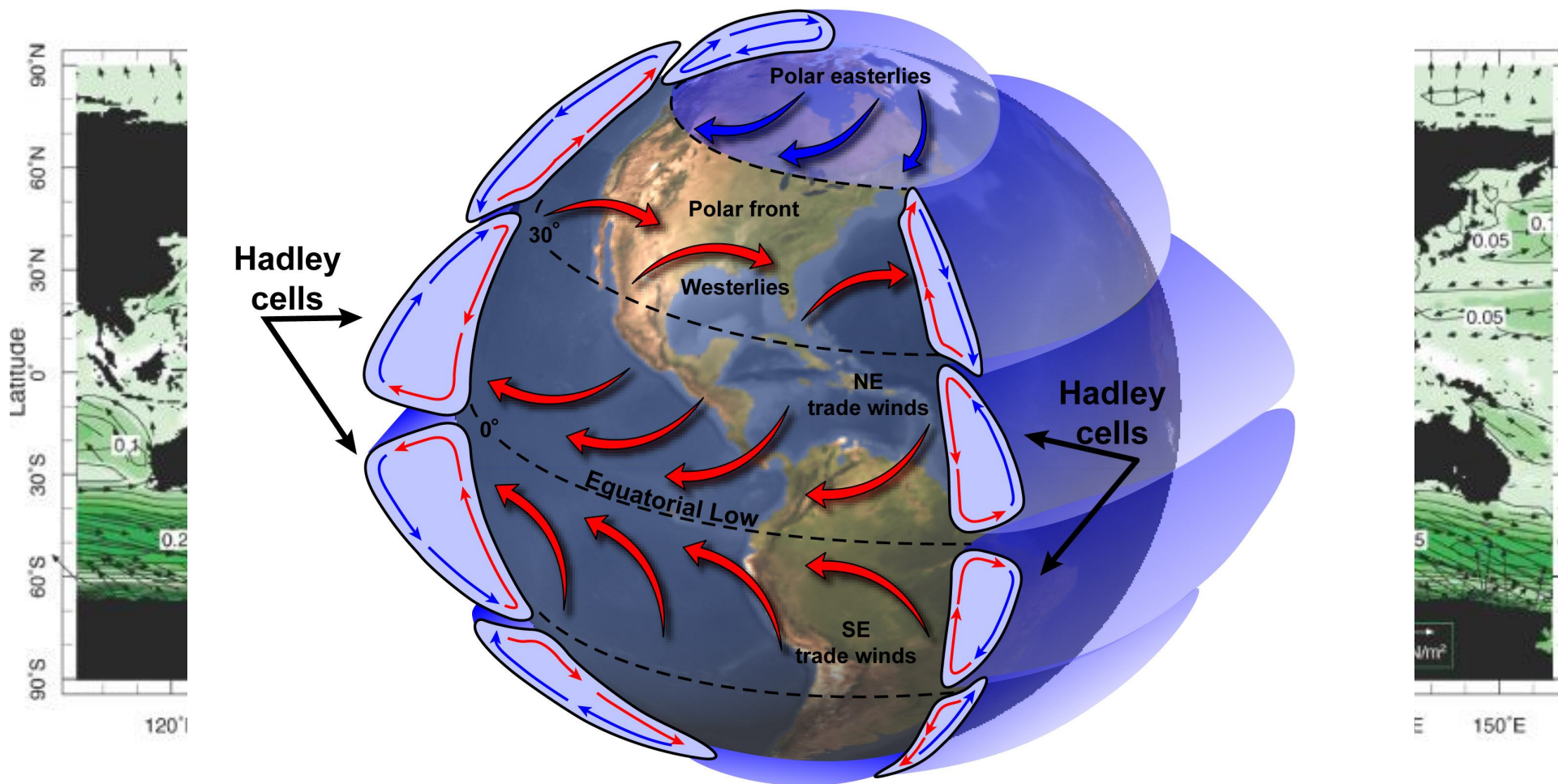


Среднегодовое напряжение трения ветра на поверхности океана

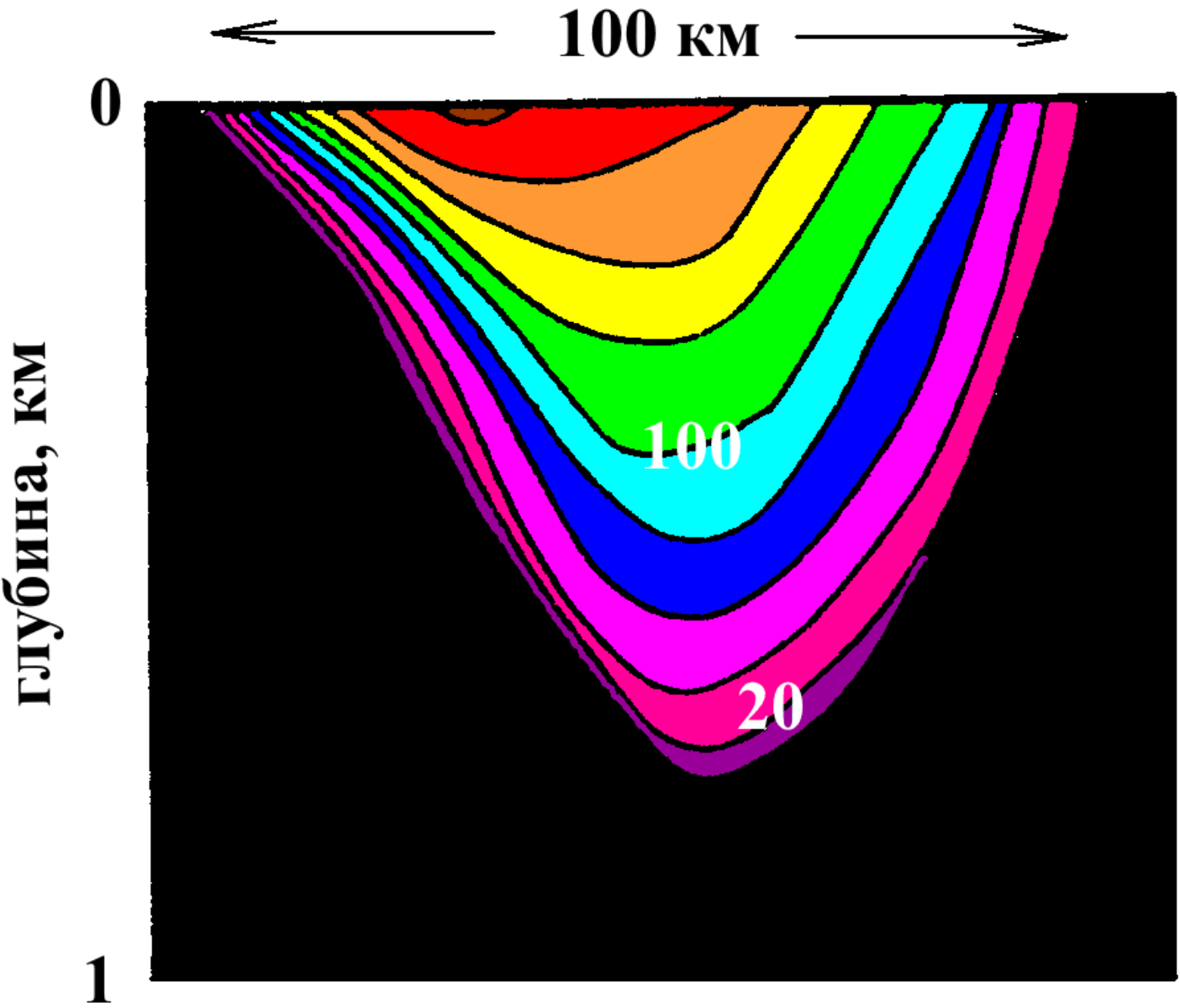


Copyright © 2008, Elsevier Inc. All rights reserved.

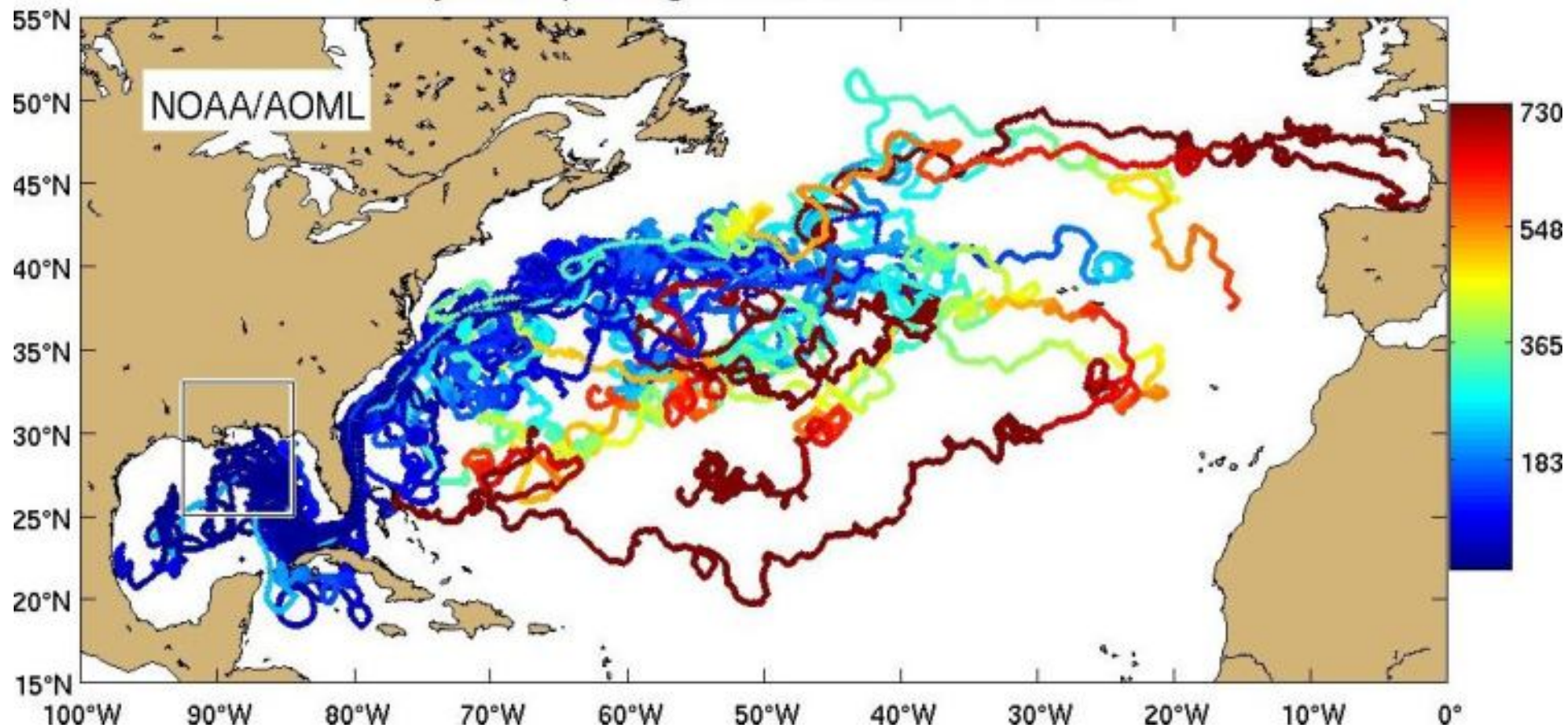
Среднегодовое напряжение трения ветра на поверхности океана



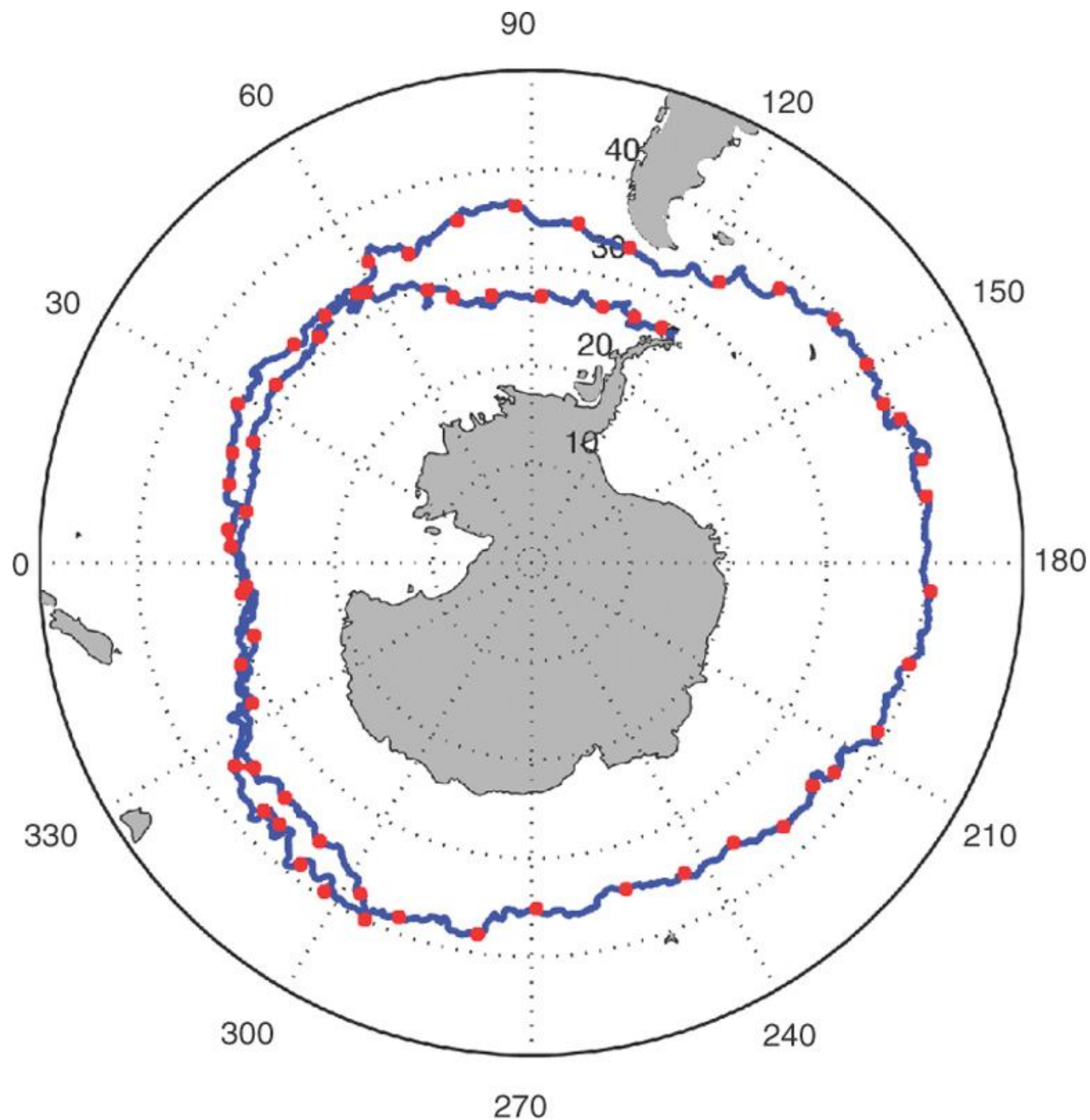
Вертикальная структура течения Гольфстрим



Days after passing closest to center of Gulf box



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



(Courtesy of Nikolai Maximenko.)

Течения на поверхности Мирового океана

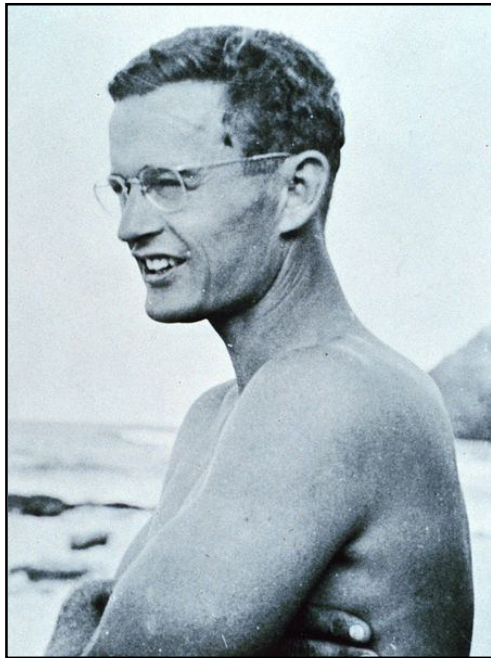
Структура поверхностных течений была описана в основном к середине XX века. Но было ясно, что целостная картина движения вод в толще океана является более сложной.



Существуют ли
глубинные
течения?

Можно ли устраивать
свалки токсичных или
радиоактивных отходов
на больших глубинах?

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



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

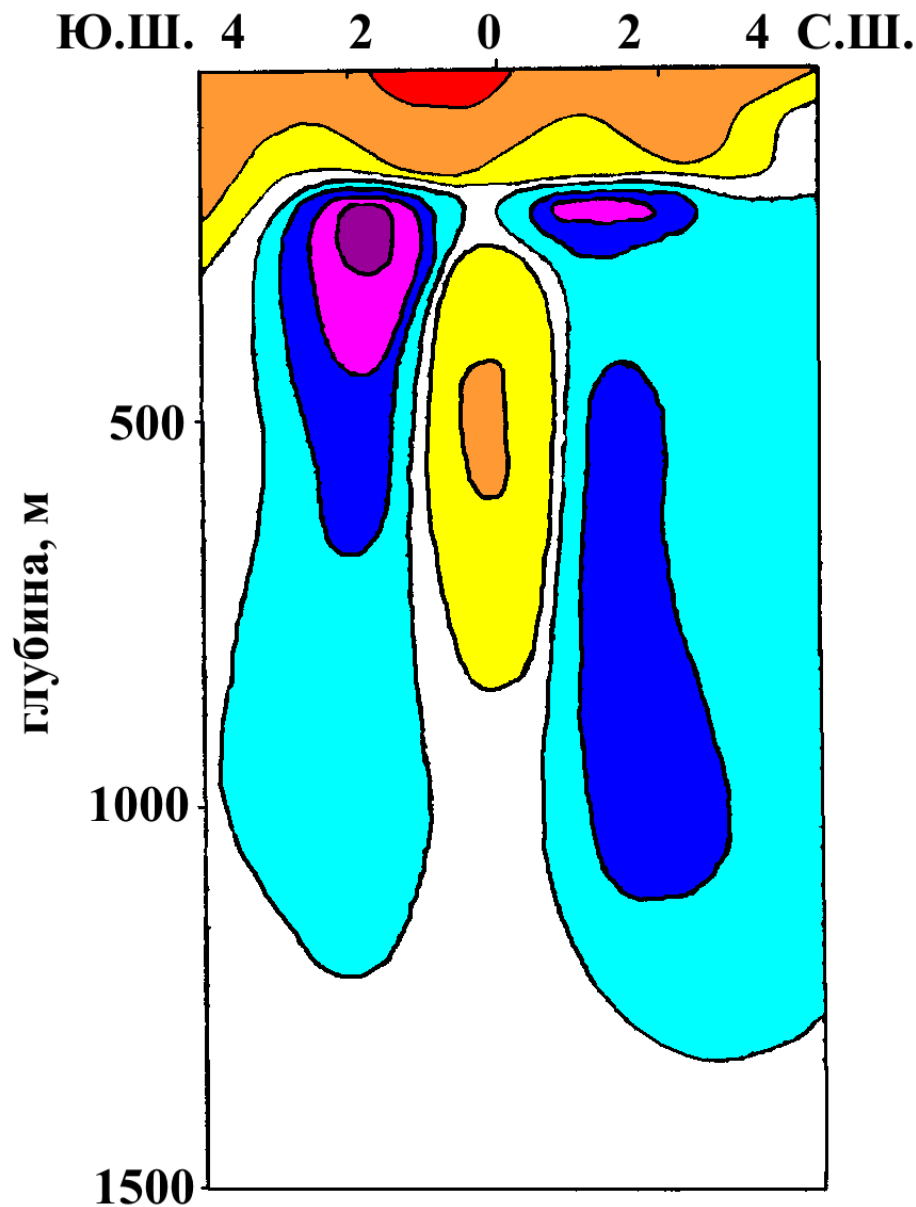
- ❑ *Таунсенд Кромвелл:*
«...подводная река вдоль
Экватора от Соломоновых
до Галапагосских о-вов
(8000 миль), ширина 150-200
миль, скорость до 1.5 м/с»**
- ❑ Вначале названо
Экваториальным
противотечением, после
гибели Т.Кромвелла в 1958г.
в авиакатастрофе
переименовано в течение
Кромвелла**
- ❑ В дальнейшем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

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



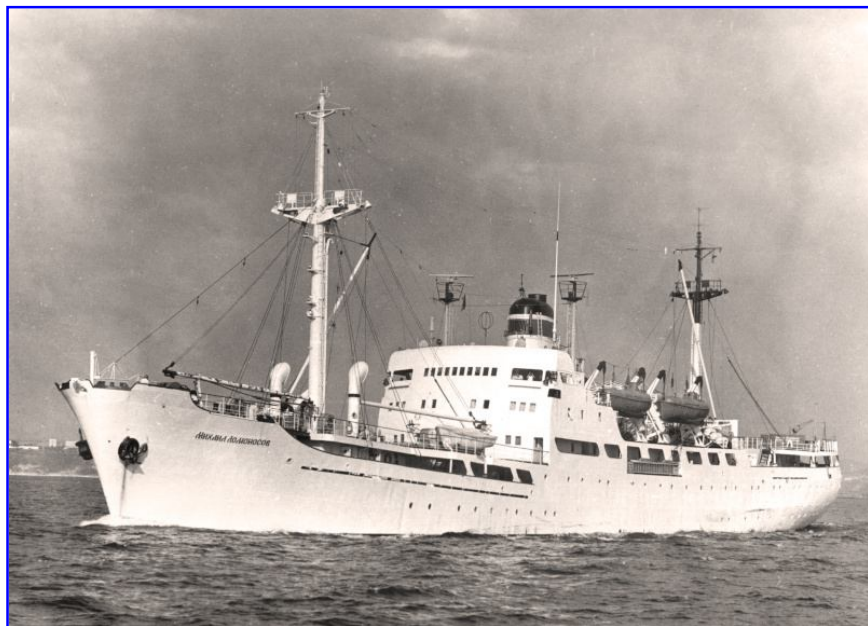
Особенности:

- 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.

