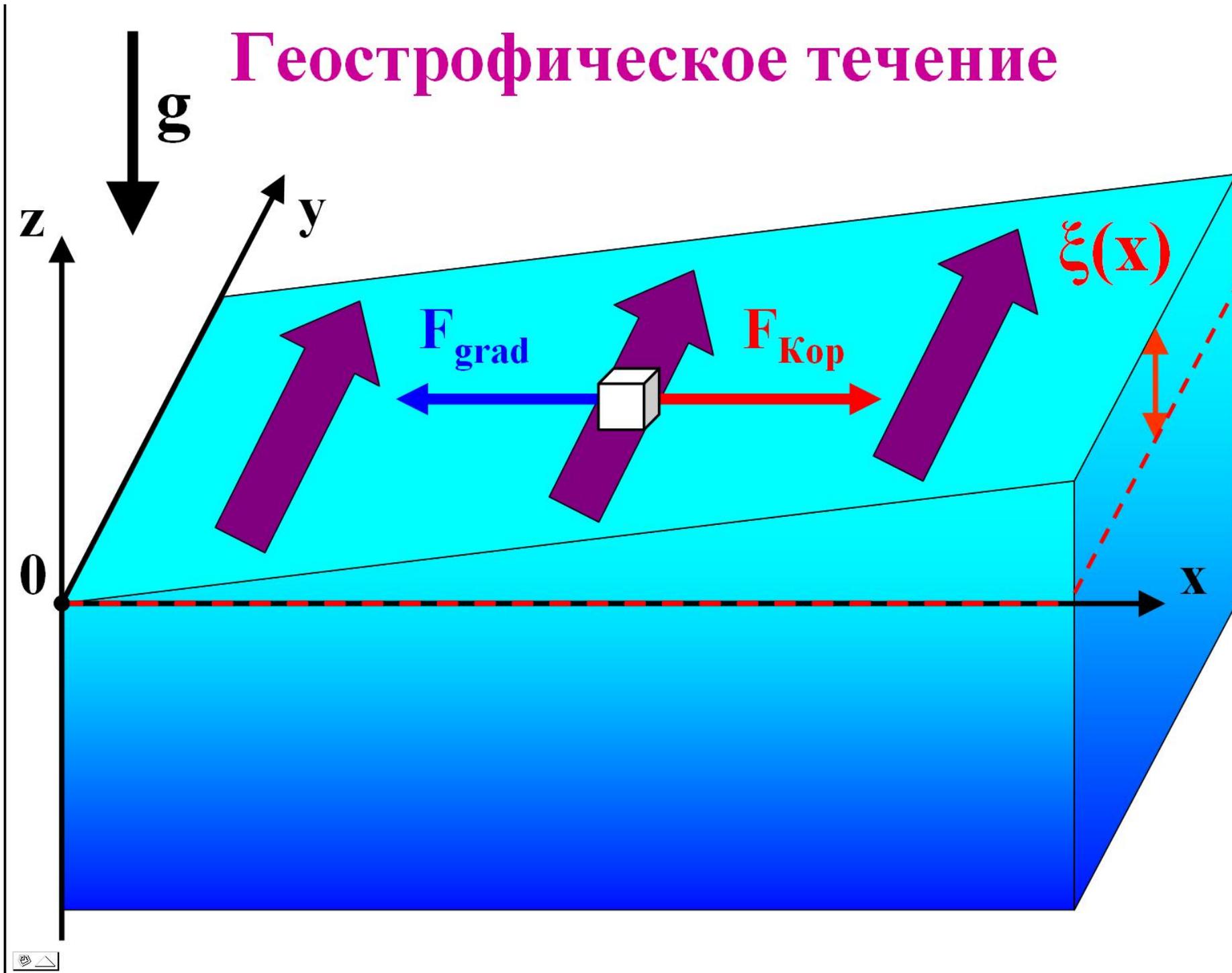


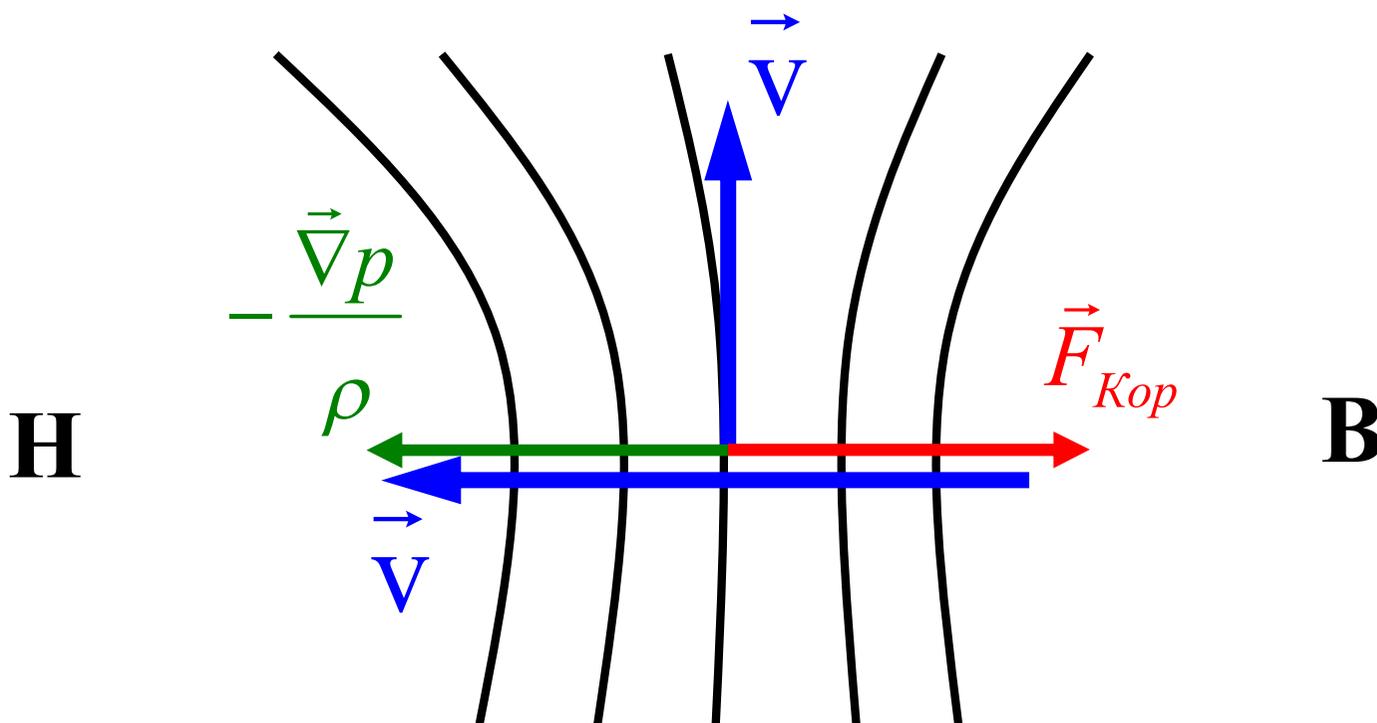
**Элементы
геофизической
гидродинамики**

Геострофическое течение



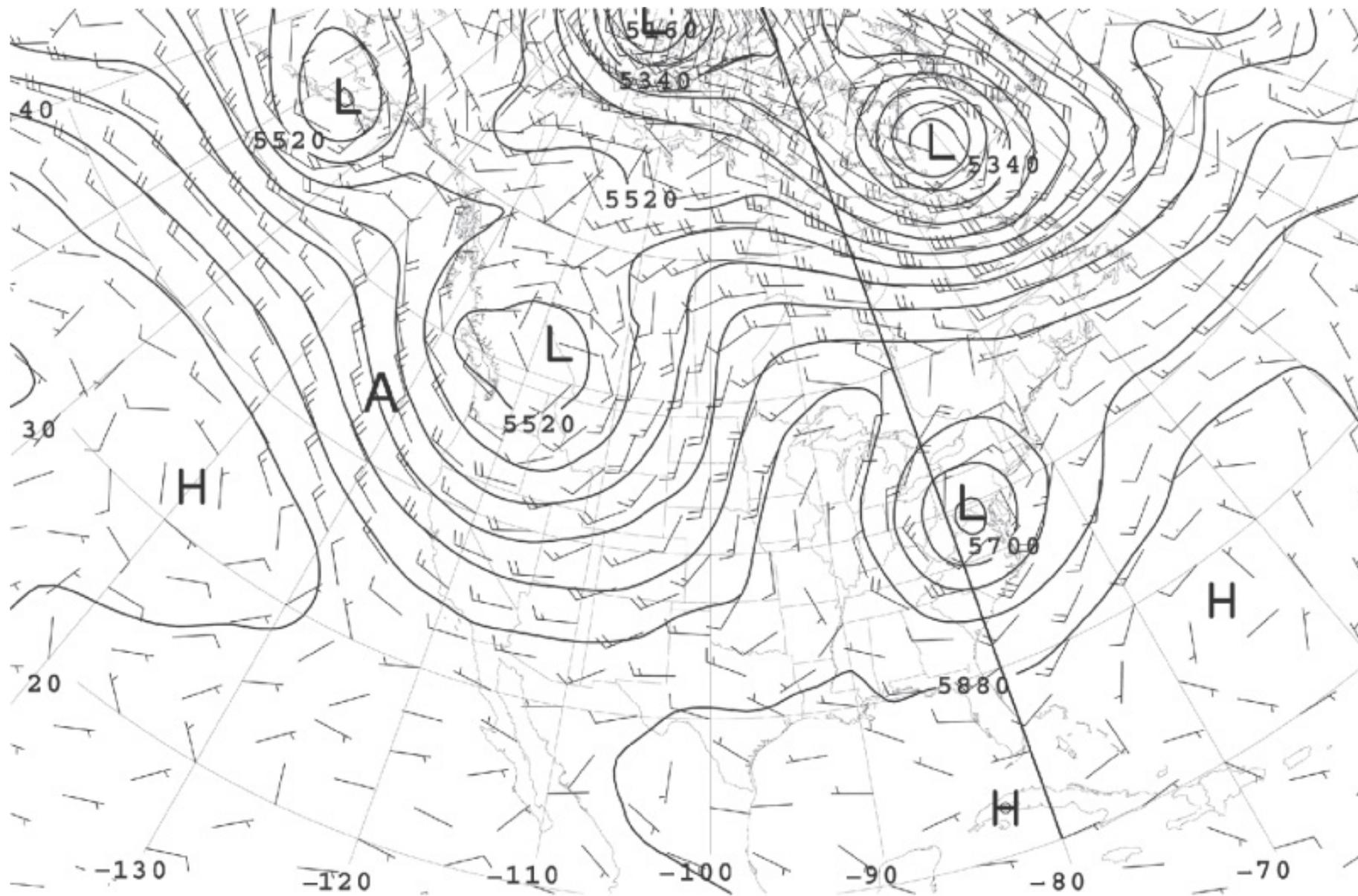
Геострофический ветер

(Сев. полушарие)



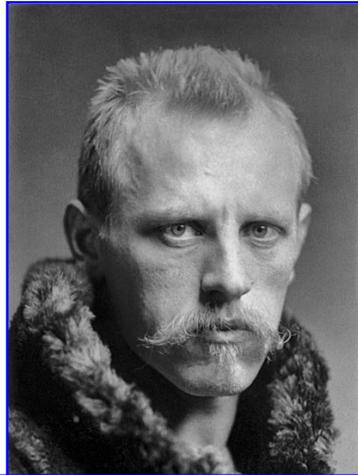
Движение строго
вдоль изобар!!!

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

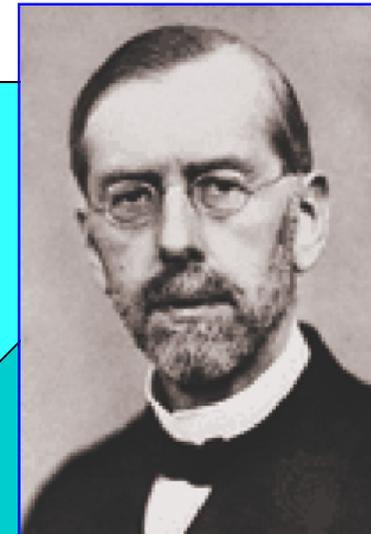
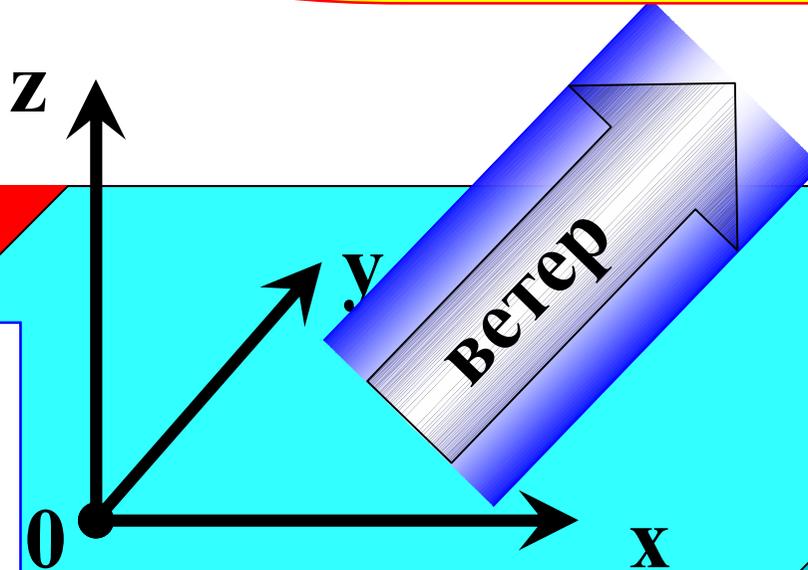


Задача Экмана о дрейфовом течении

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:

• стационарно $\frac{\partial}{\partial t} = 0$

• однородно и безгранично

по горизонтали $\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial y} = 0$

• $\rho = \text{const}$

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

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

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

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

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

Решение (спираль Экмана)

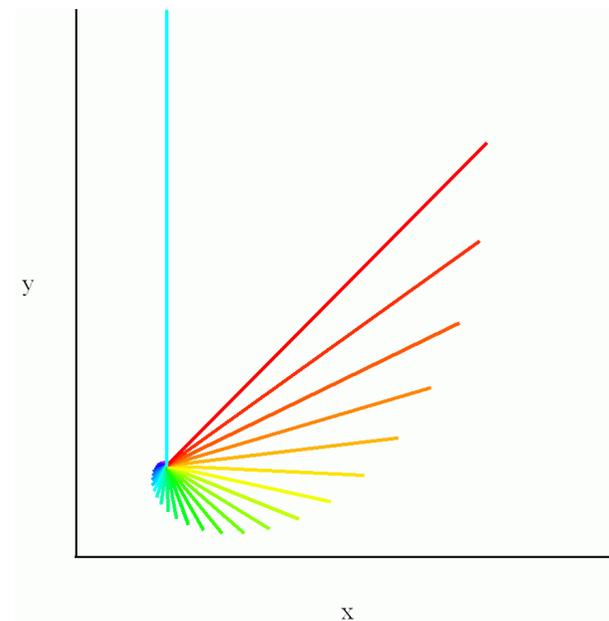
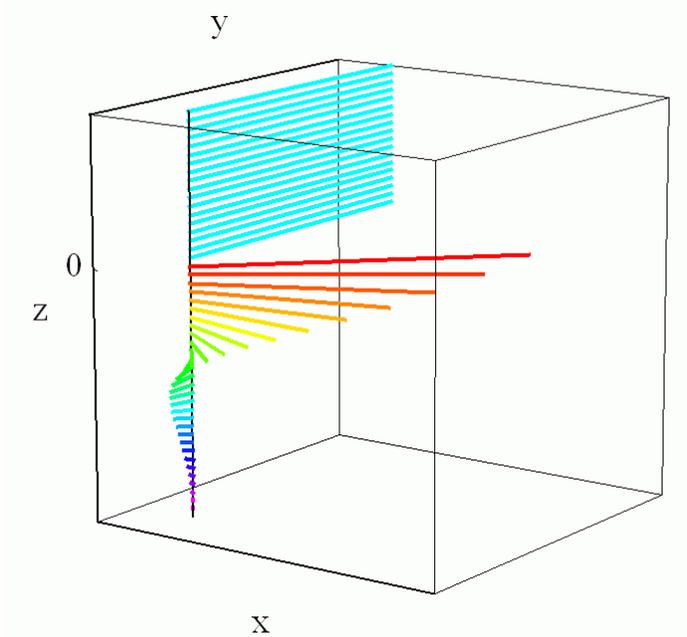
$$u(z) = V_0 e^{z/d} \cos(z/d + \pi/4)$$

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

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

$$d = \sqrt{\frac{2\nu}{f}} = \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin \varphi}}$$

глубина
Экмана или
глубина
трения



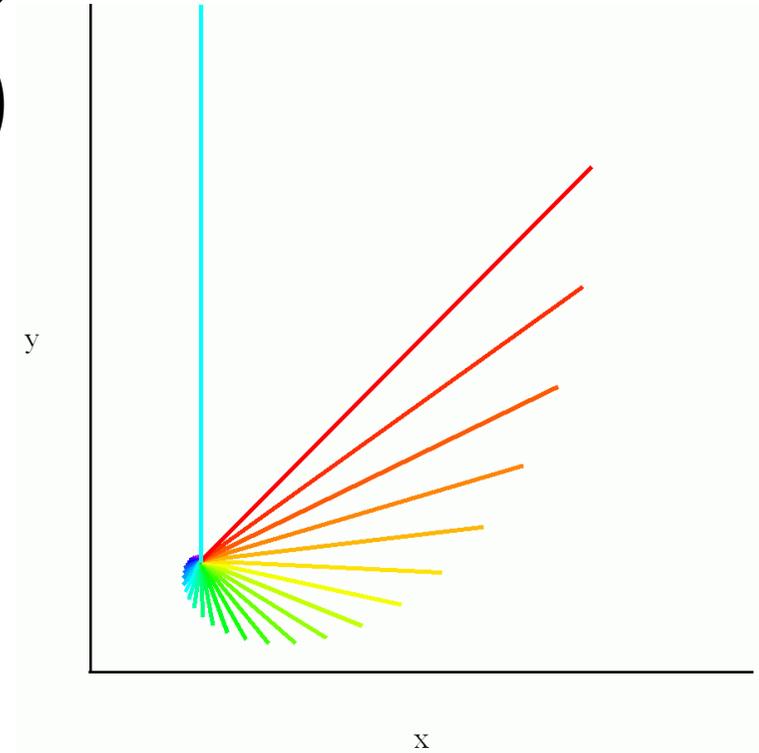
Направление интегрального переноса вод

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

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

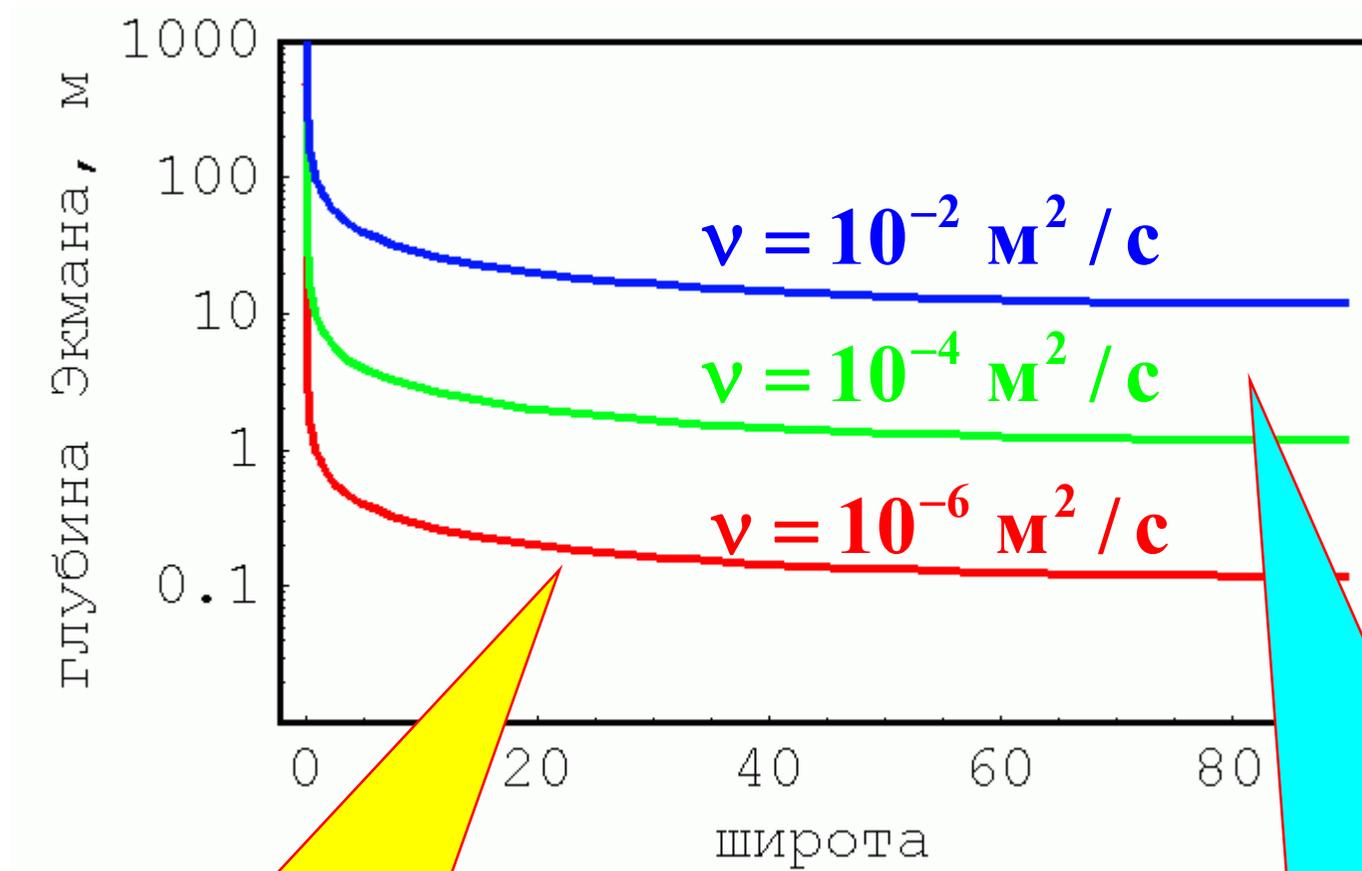
$$\int_{-\infty}^0 u(z) dz = \frac{V_0 d}{\sqrt{2}} > 0$$

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



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

Глубина Экмана $d = \sqrt{\frac{\nu}{\omega \sin \varphi}}$



молекулярная вязкость

турбулентная вязкость

Влияние глубины океана на течение Экмана

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

Граничные условия:

поверхность

$$\rho \nu \left. \frac{du}{dz} \right|_{z=0} = 0$$

$$\rho \nu \left. \frac{dv}{dz} \right|_{z=0} = \tau$$

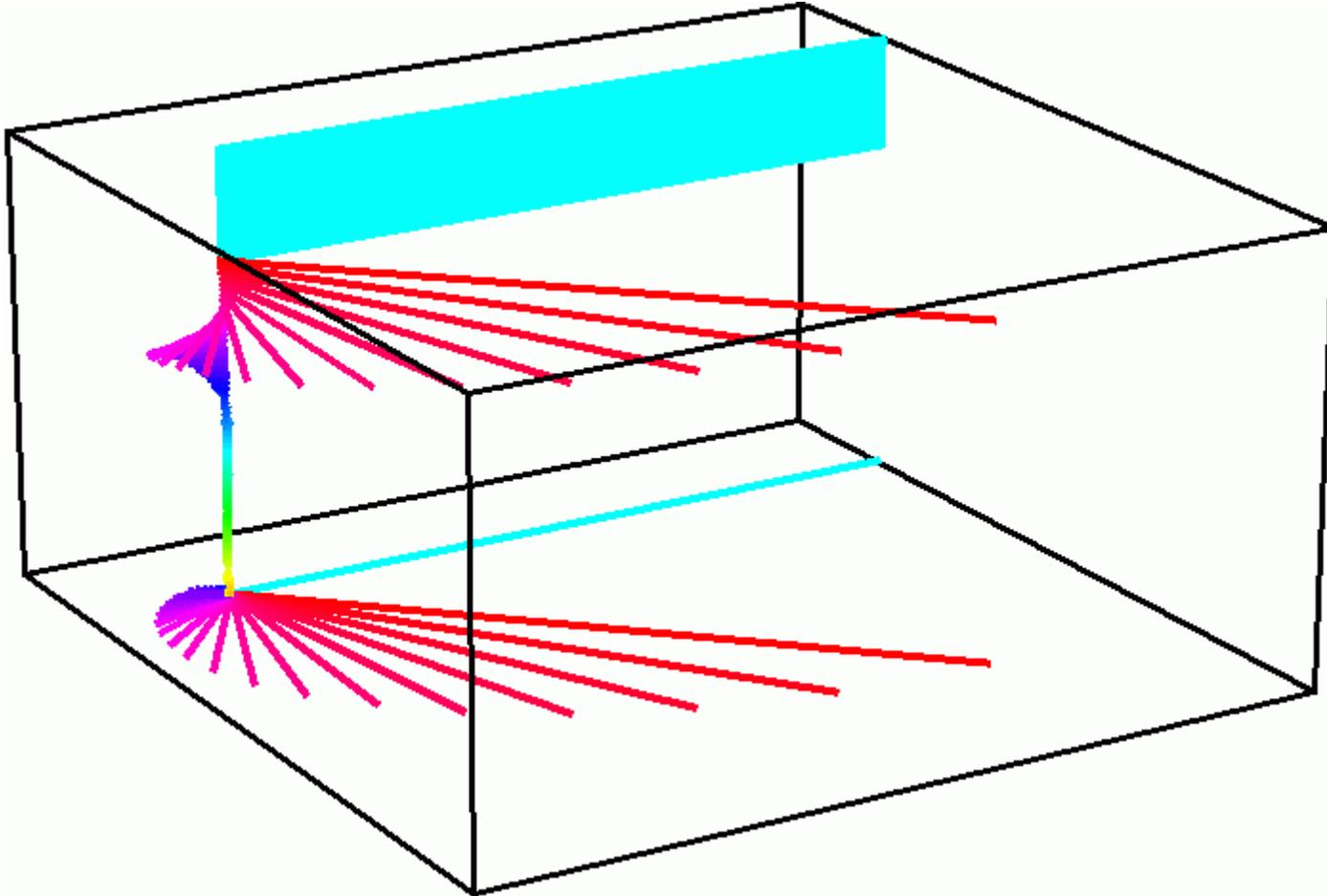
дно

$$u(-H) = 0$$

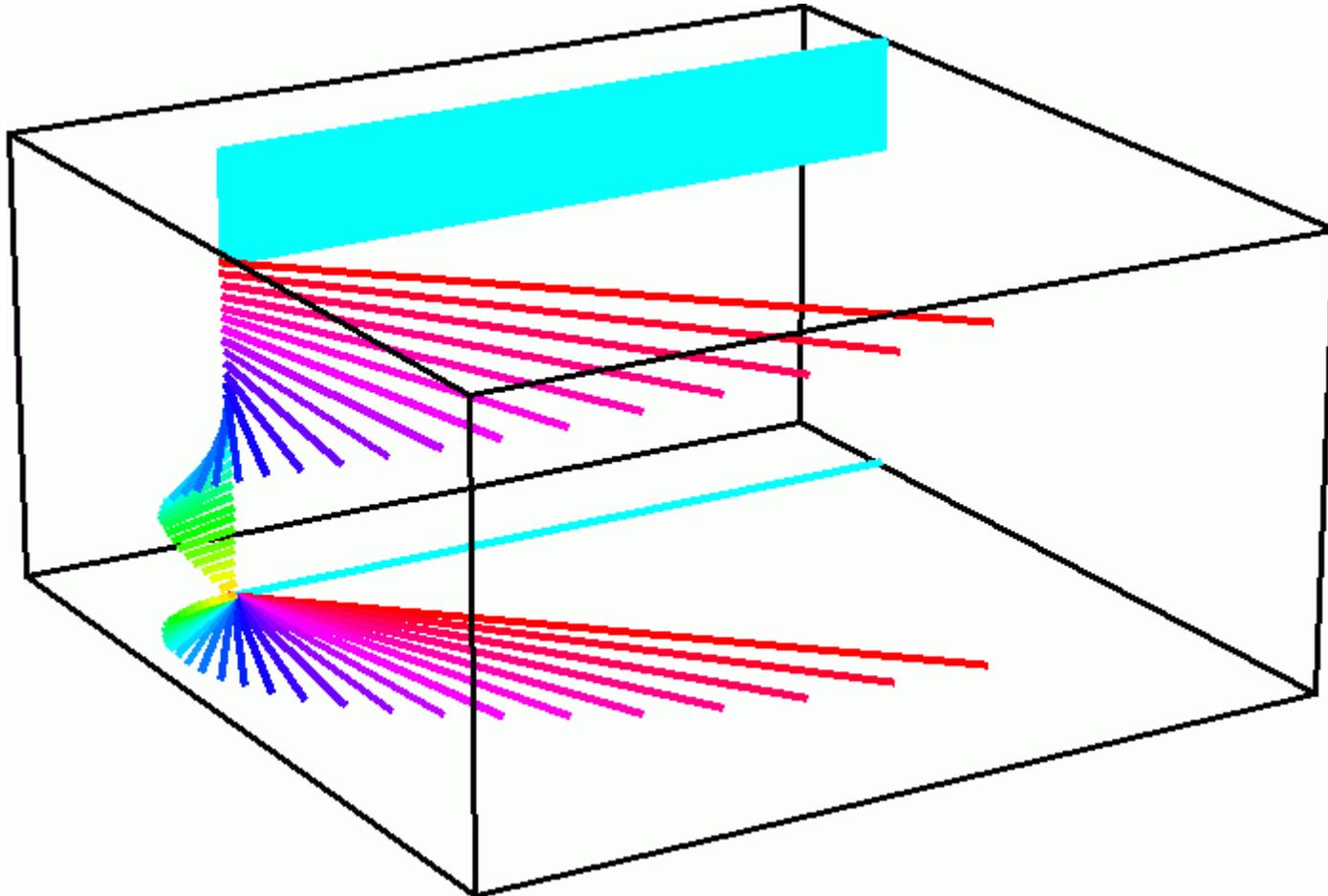
$$v(-H) = 0$$

условие прилипания

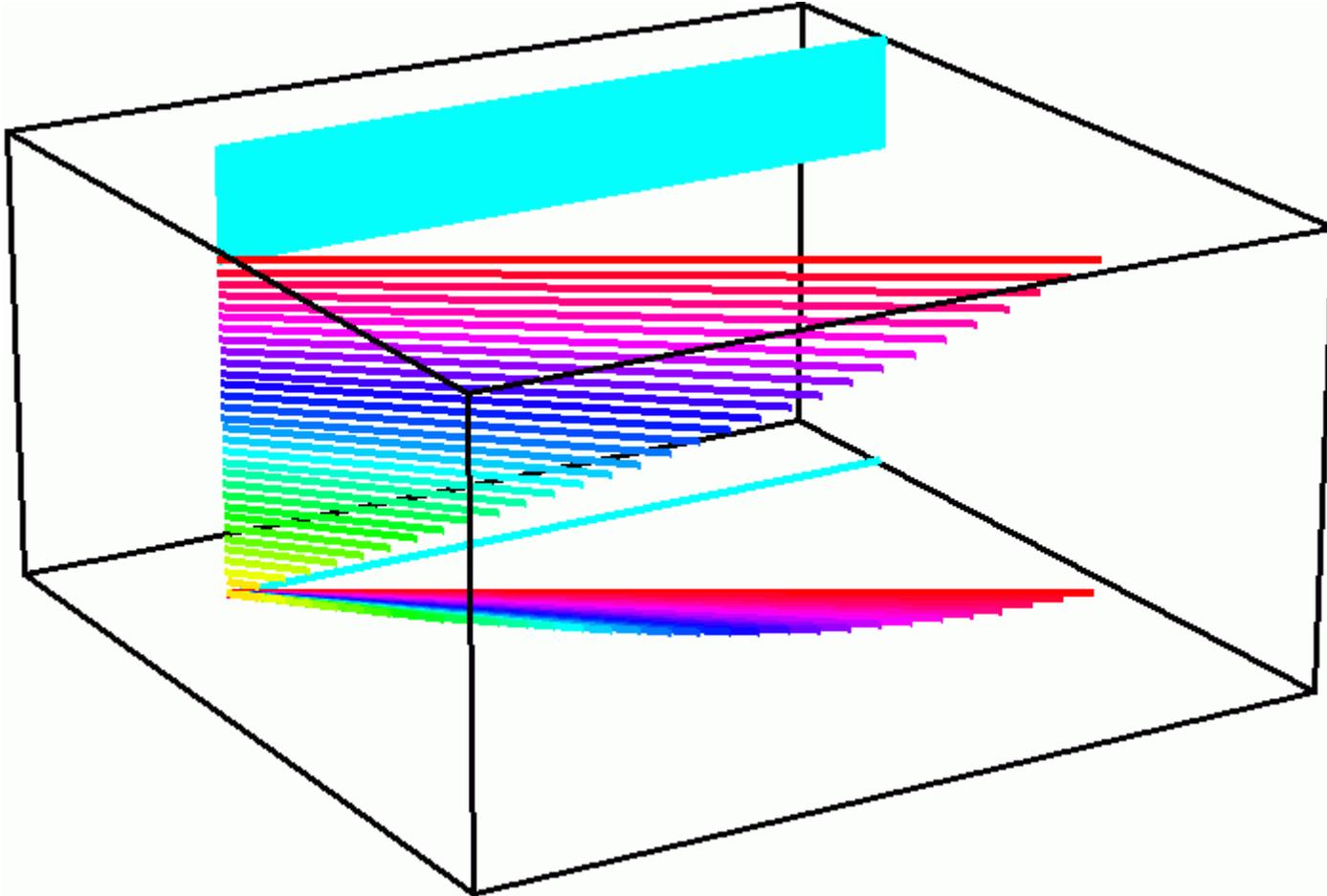
H=10d



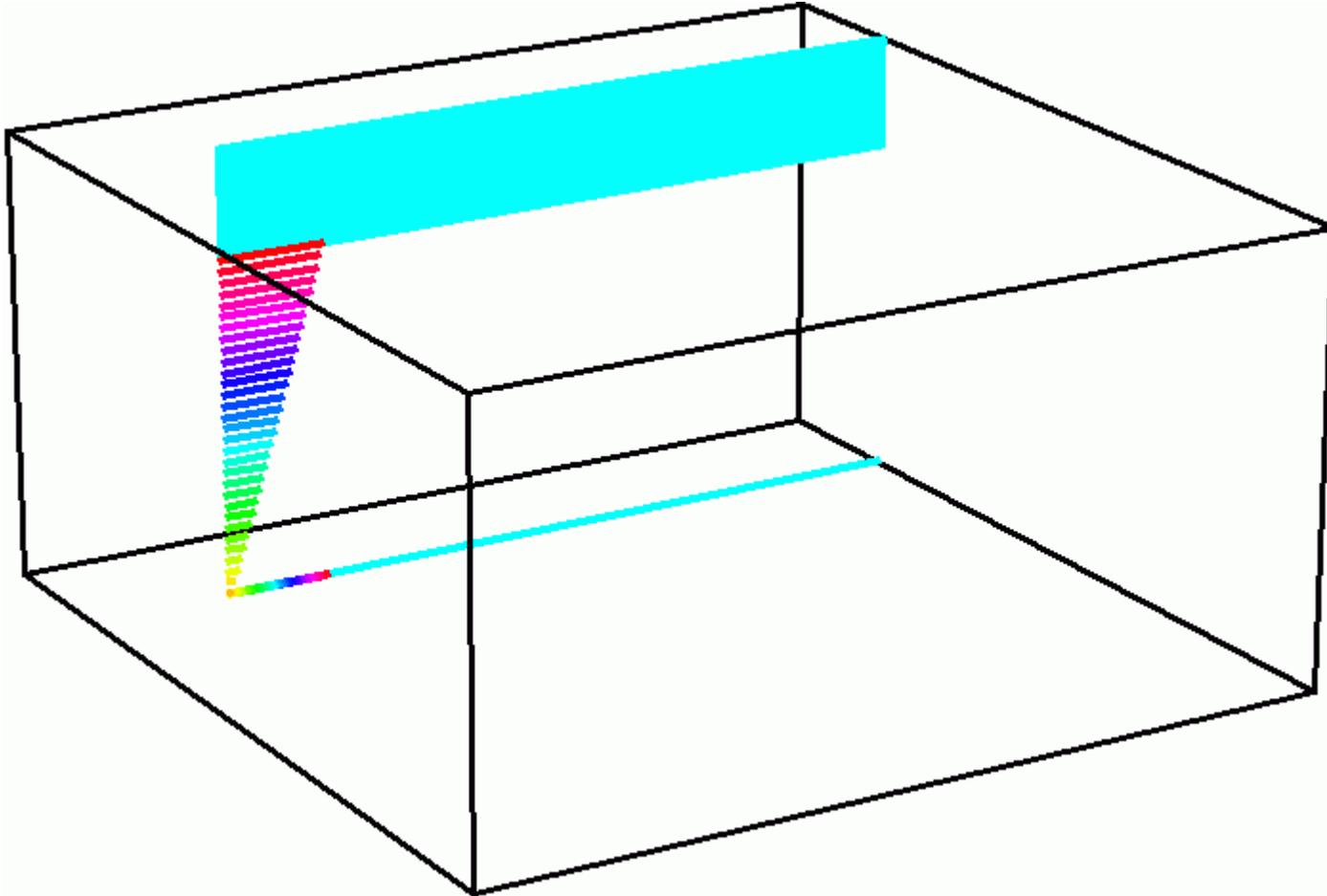
H=3d



$$H=d$$

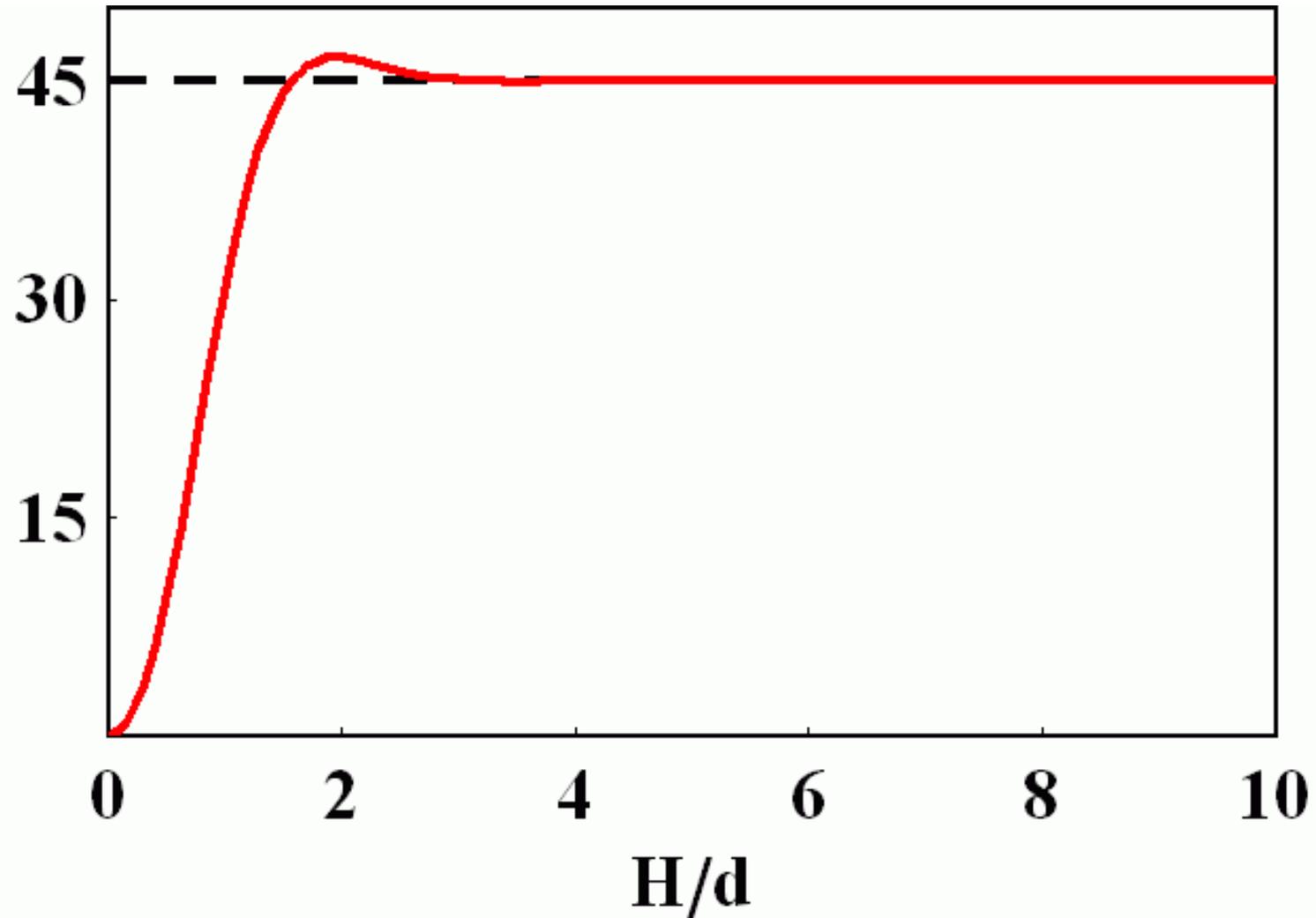


$$H=d/10$$

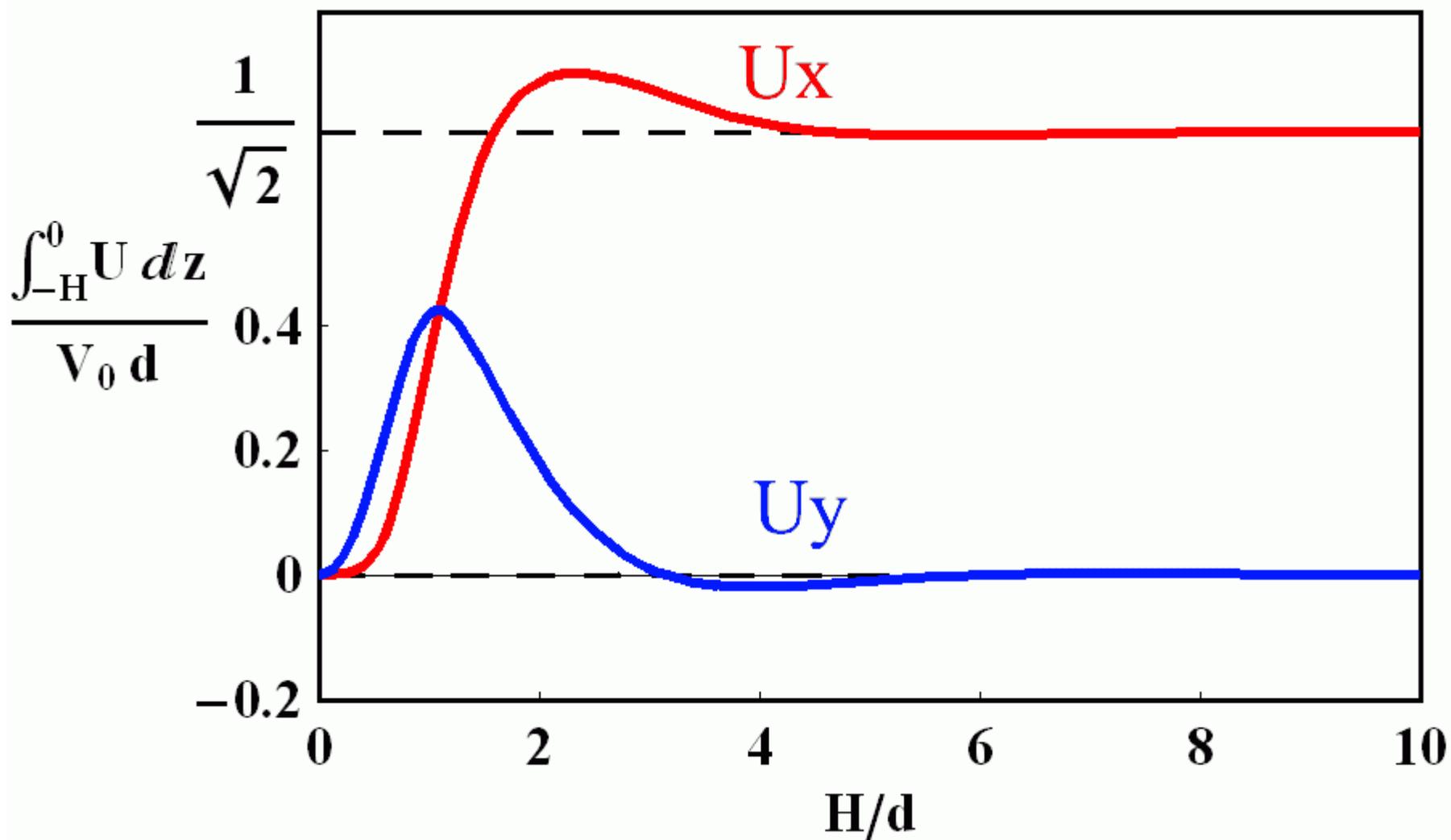


Течение на поверхности

УГОЛ «течение-ветер»



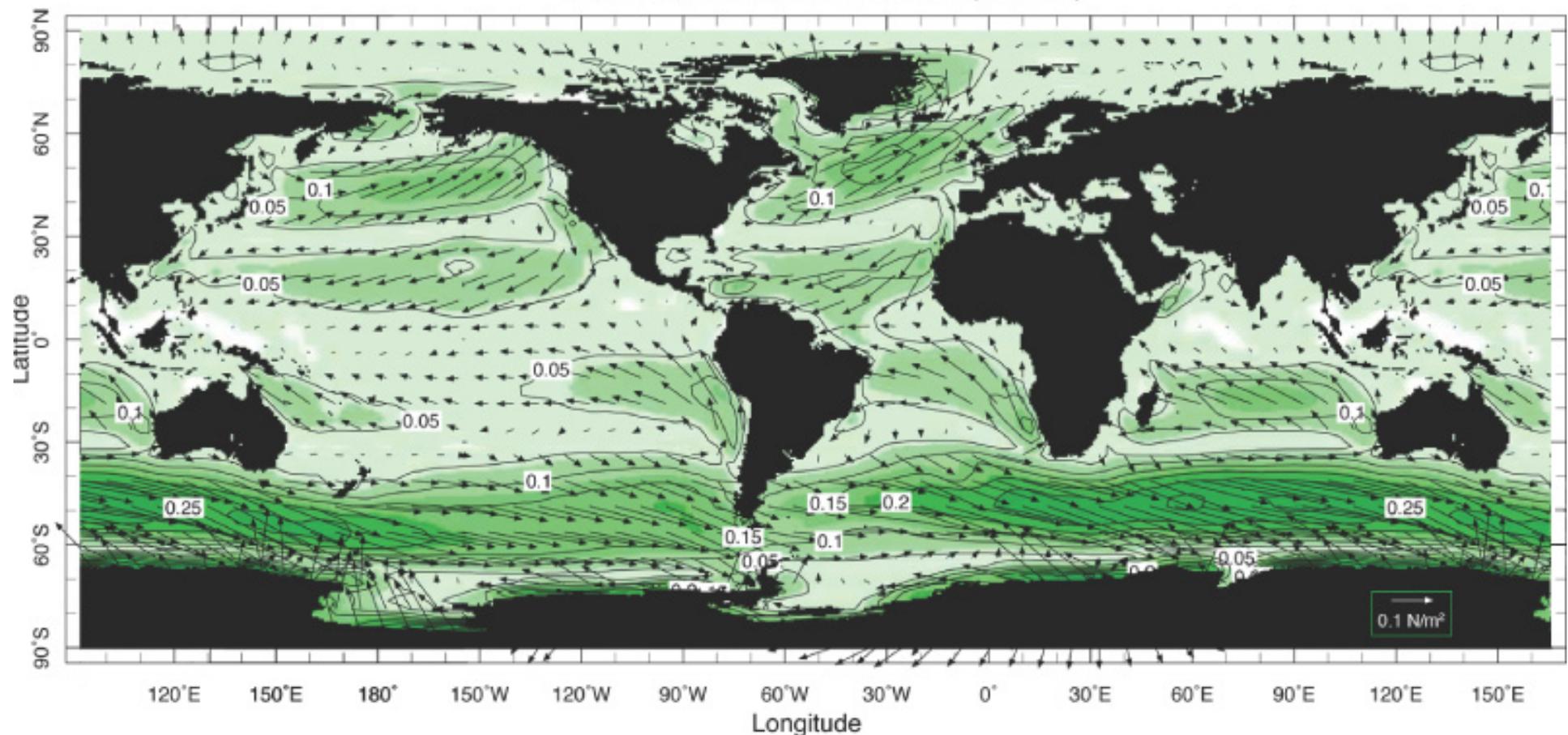
Влияние глубины океана на интегральный перенос



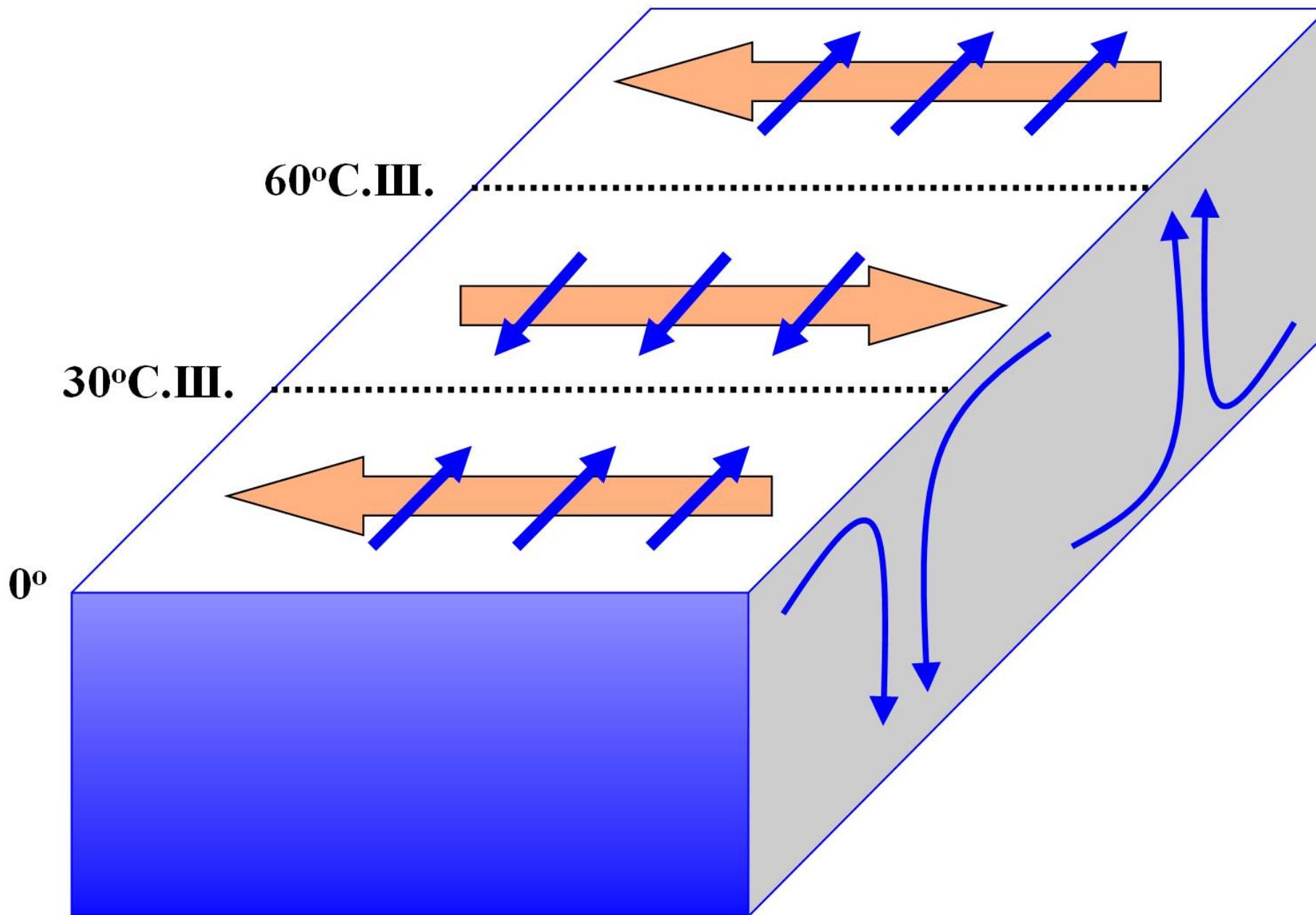
Среднегодовое напряжение трения ветра на поверхности океана

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

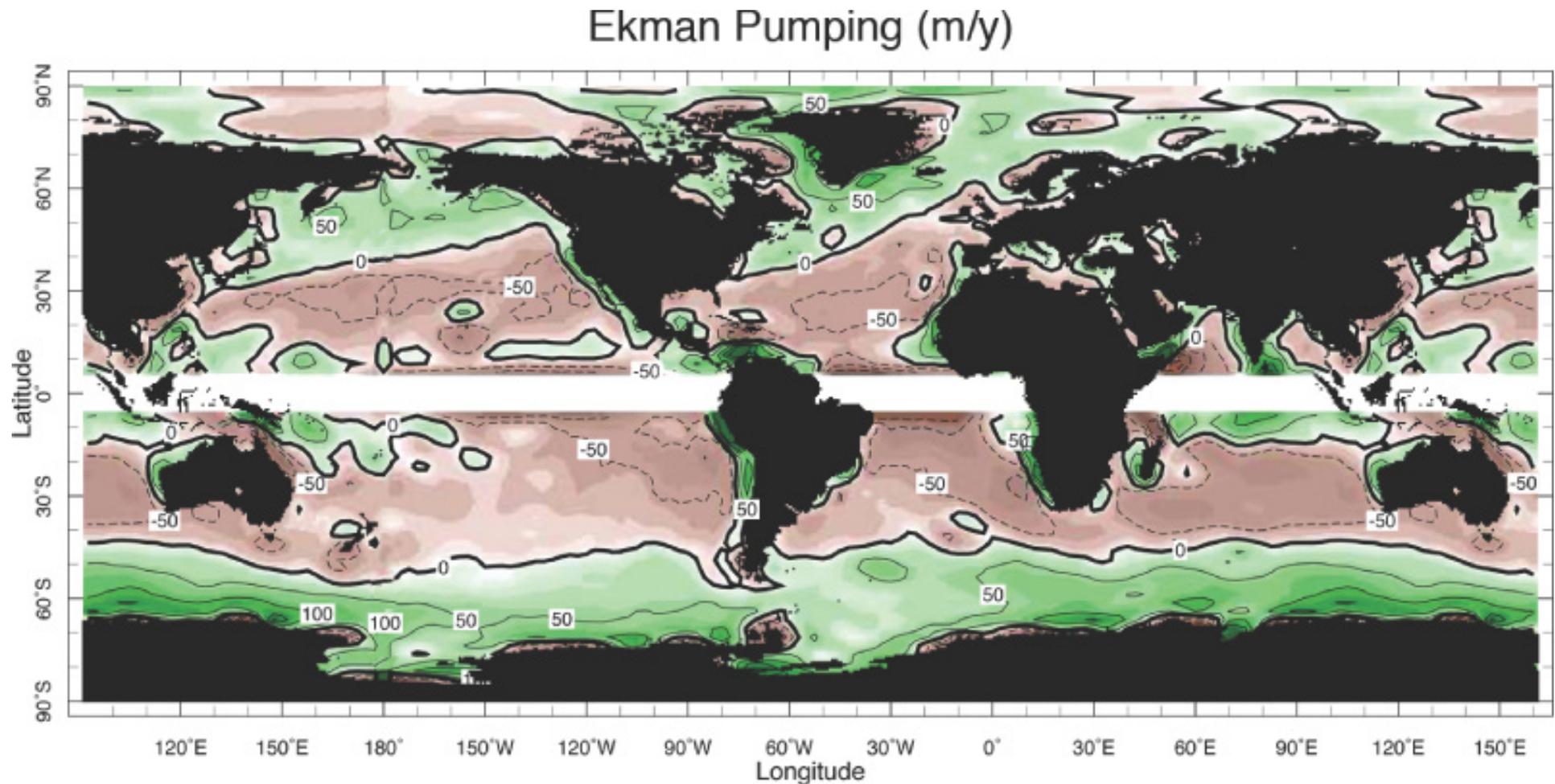
Surface Wind Stress (N/m²)



Экмановский «насос»



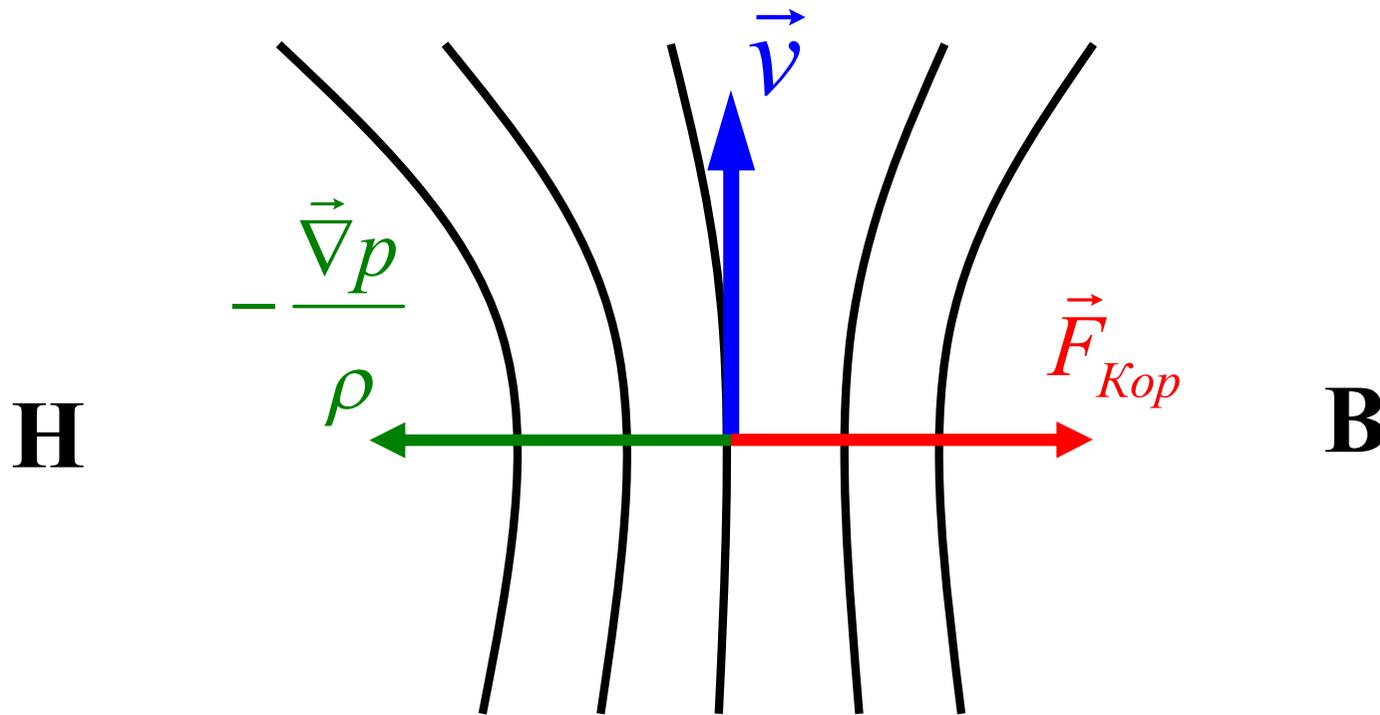
Вертикальная компонента скорости [м/год] - результат действия «насоса» Экмана (**поднятие**, **опускание**)



ЦИКЛОНЫ И АНТИЦИКЛОНЫ

Геострофический ветер/течение

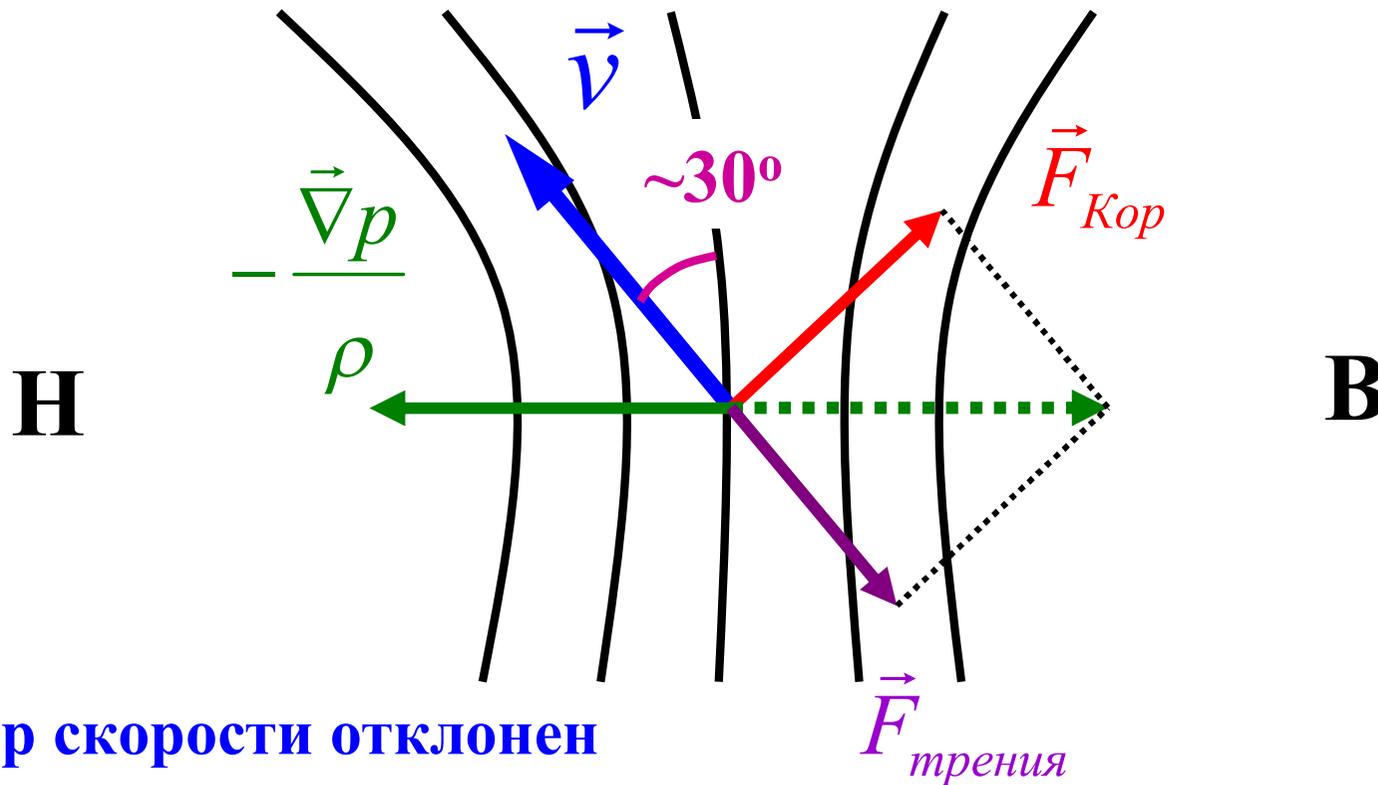
(Сев. полушарие)



**Движение строго
вдоль изобар!!!**

Ветер/течение с учетом сил трения

(Сев. полушарие)

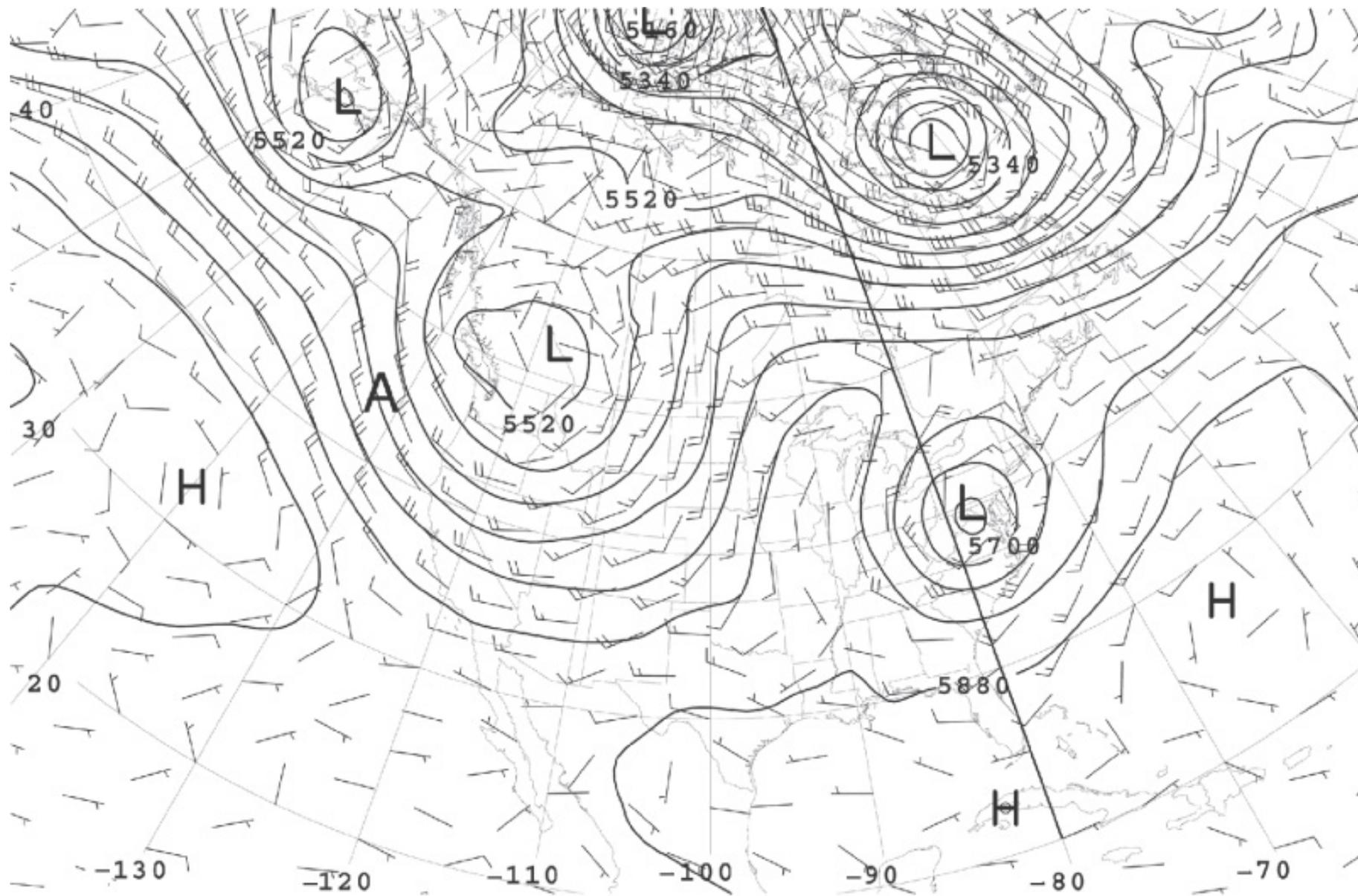


Вектор скорости отклонен
влево от изобары

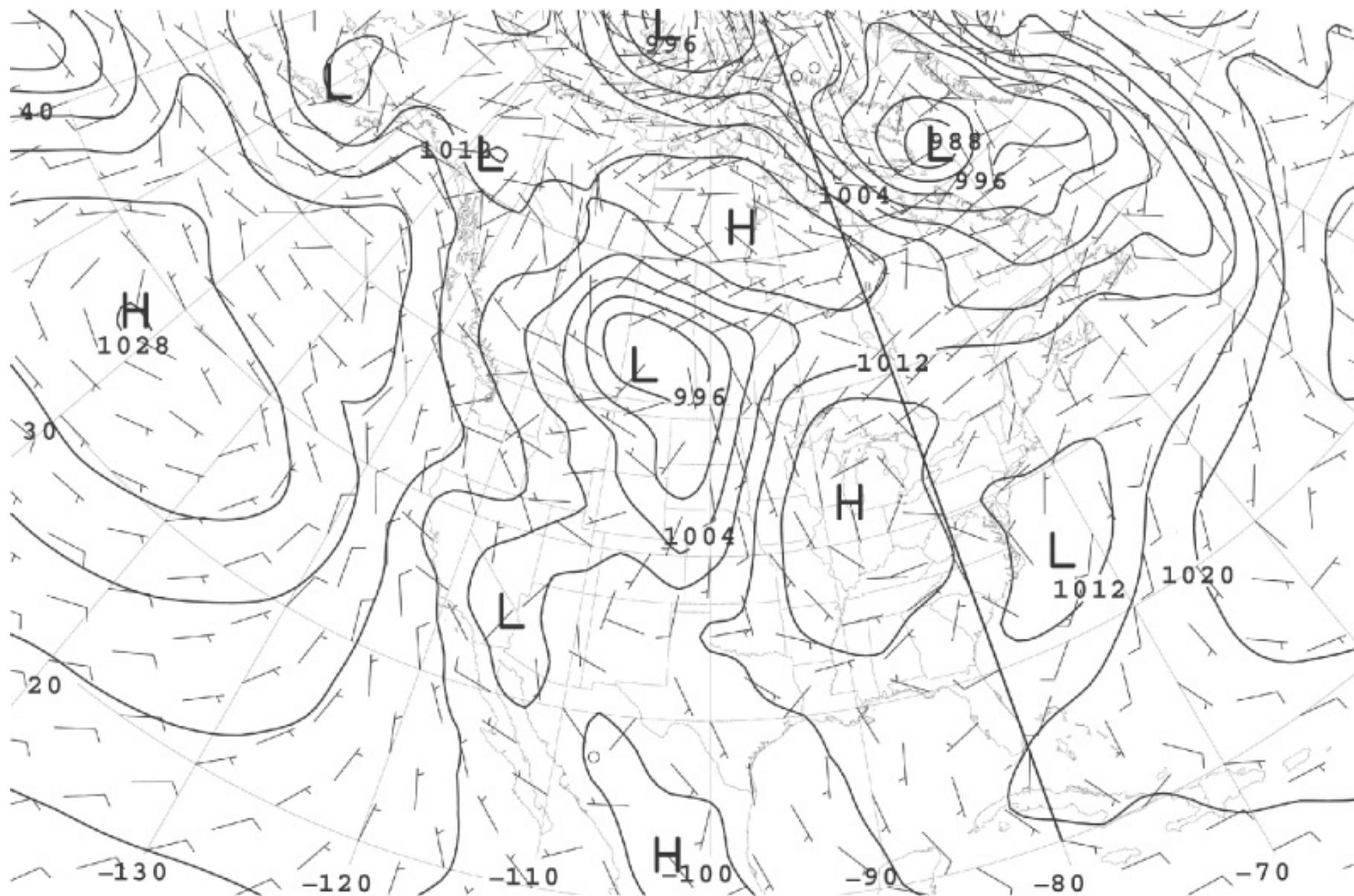
Отклонение существенно до
высот ~ 1500 м

Отклонение у поверхности
земли $\sim 30^\circ$

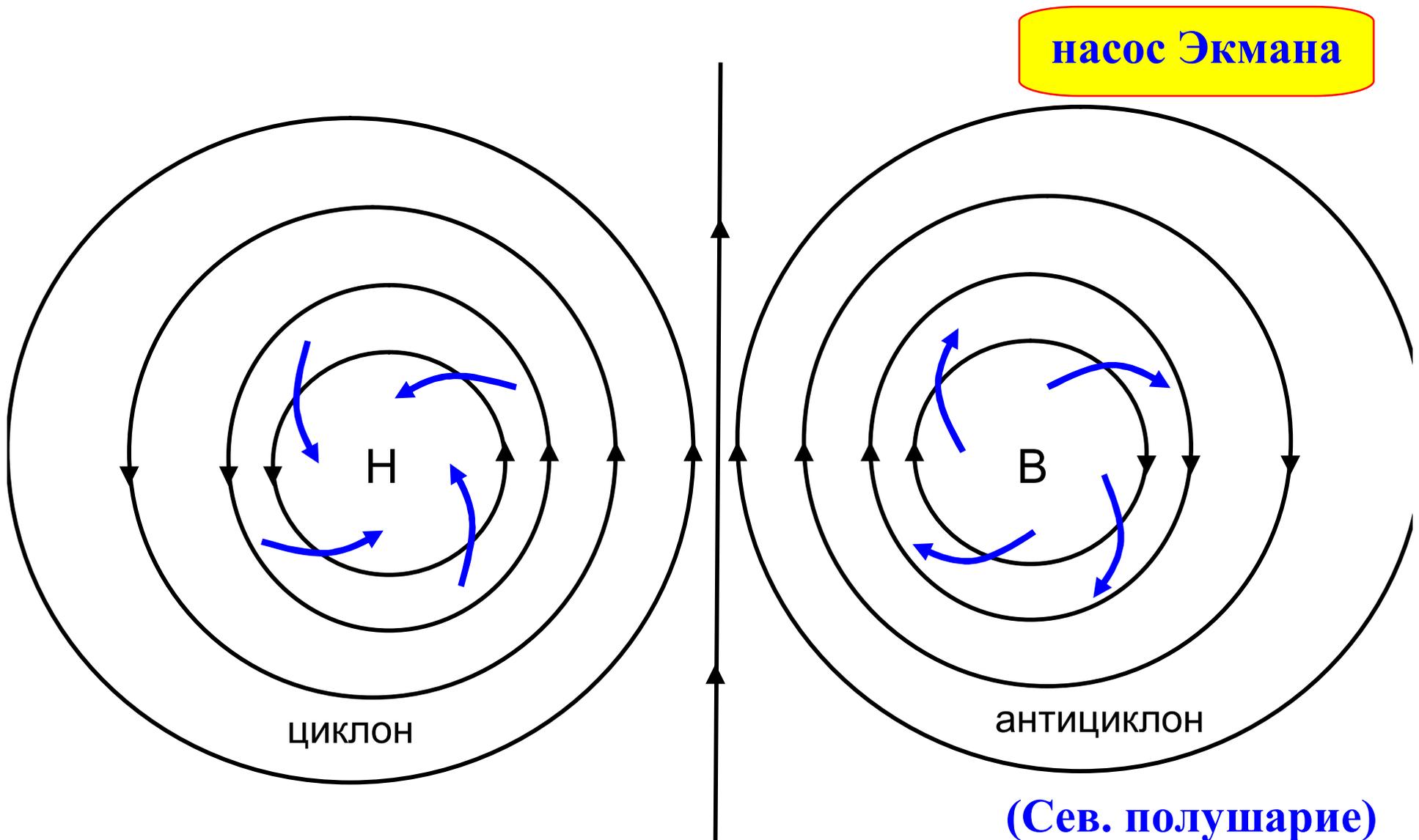
Поля атмосферного давления (изолинии) и скорости ветра на высоте 500 мбар



Поля атмосферного давления (изолинии) и скорости ветра у поверхности земли



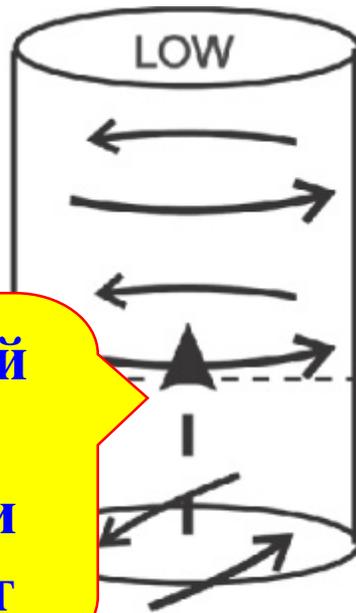
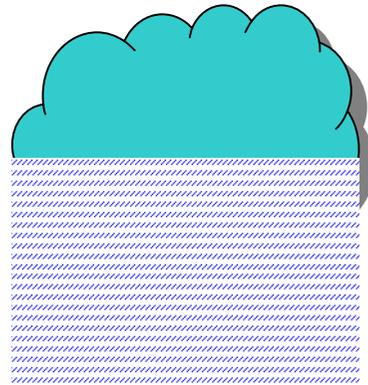
**У поверхности земли, где сила трения велика,
происходит заток воздуха в область низкого давления
и отток воздуха из области высокого давления**



Синоптические вихри

ЦИКЛОН

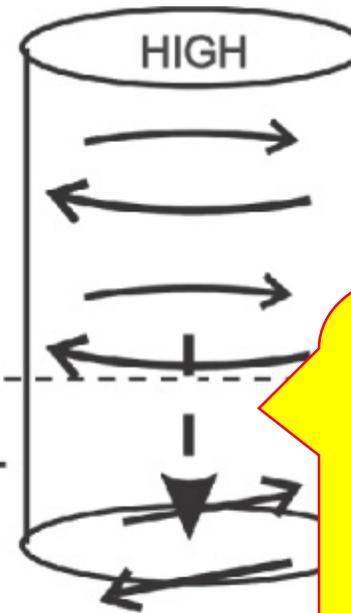
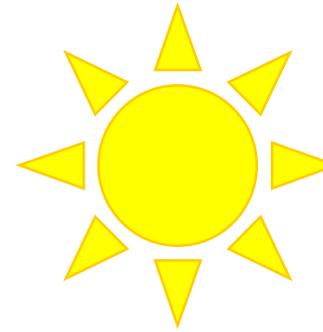
вращение
против
часовой
стрелки
(Сев.
полушарие)



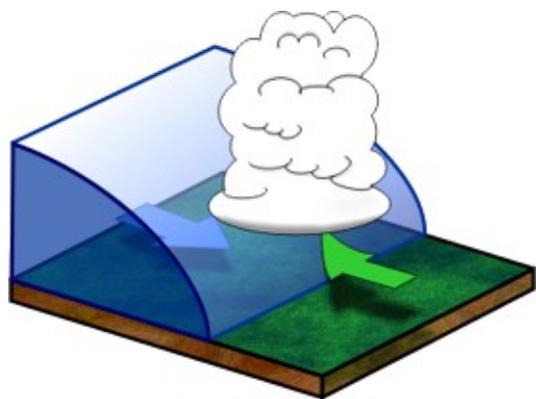
Восходящий
поток со
скоростями
сотни м/сут

АНТИЦИКЛОН

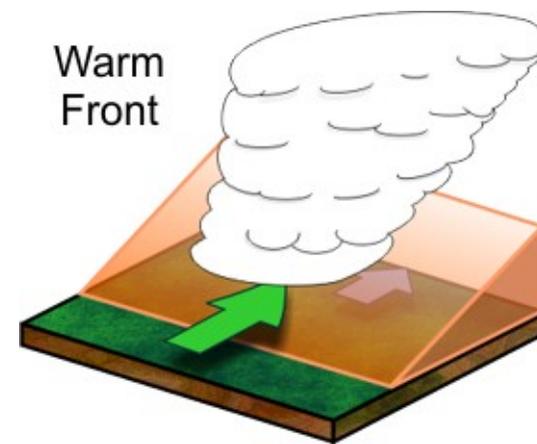
вращение по
часовой
стрелке
(Сев.
полушарие)



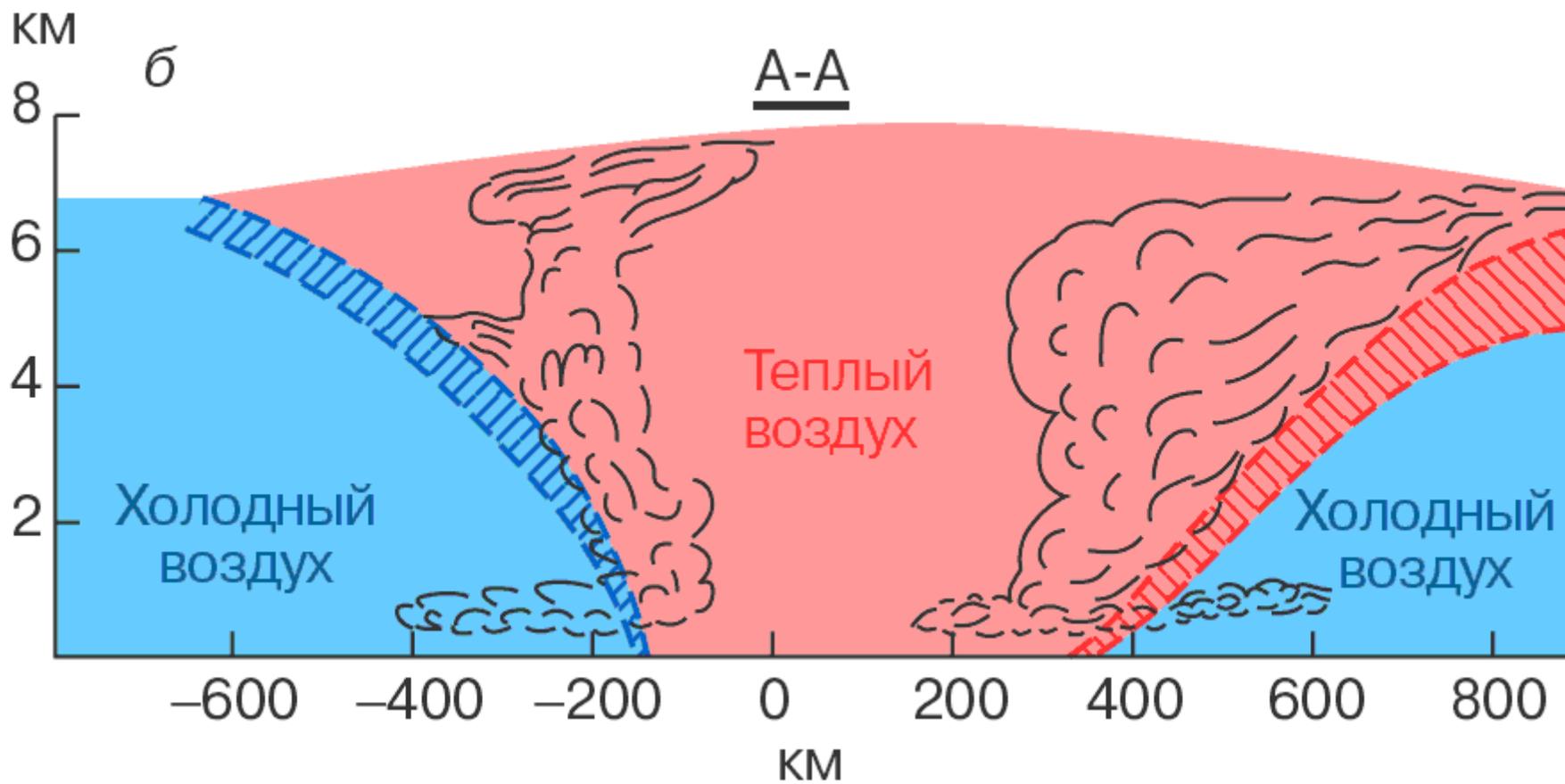
Нисходящий
поток со
скоростями от
десятков до
сотен м/сут

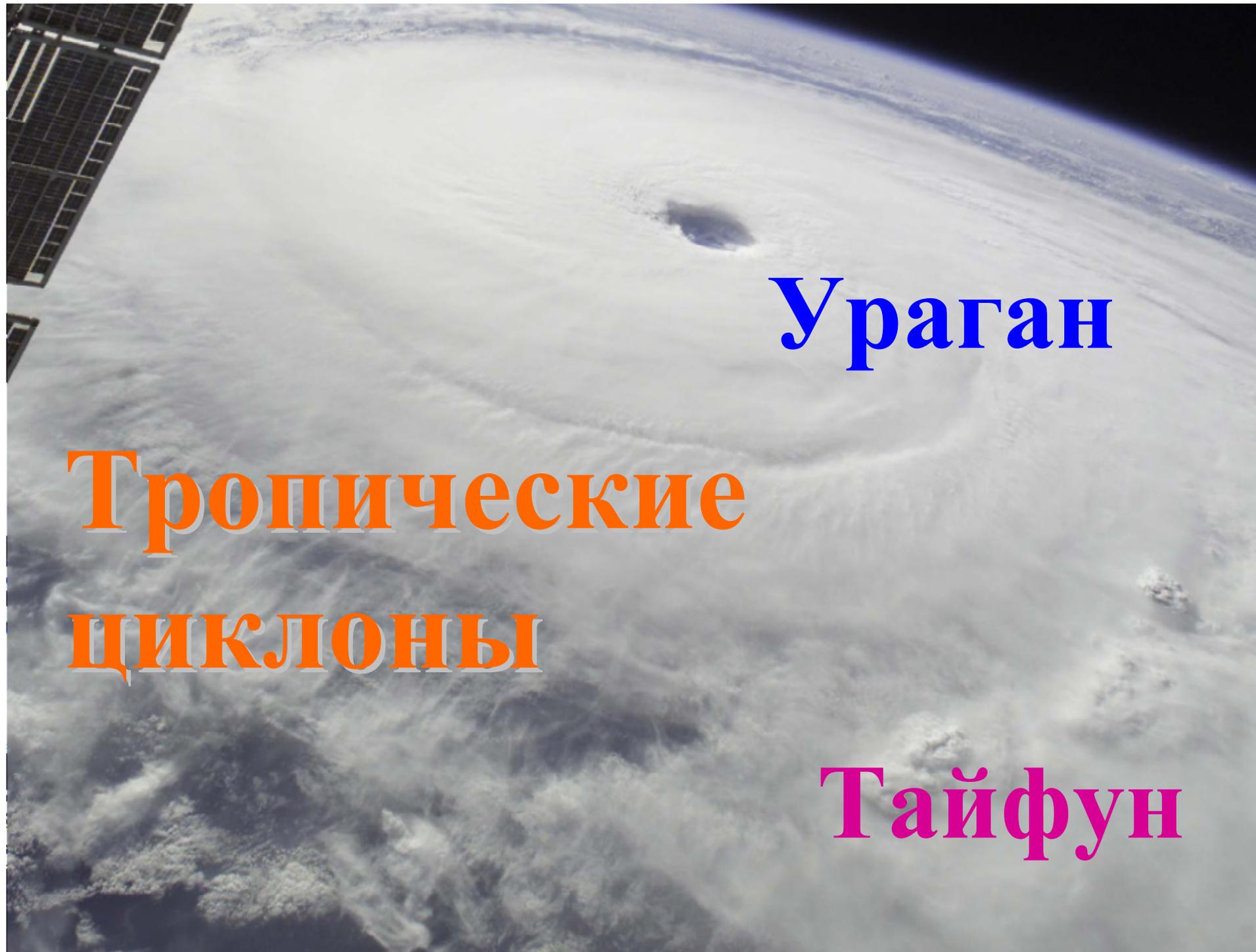


Cold Front



Warm Front



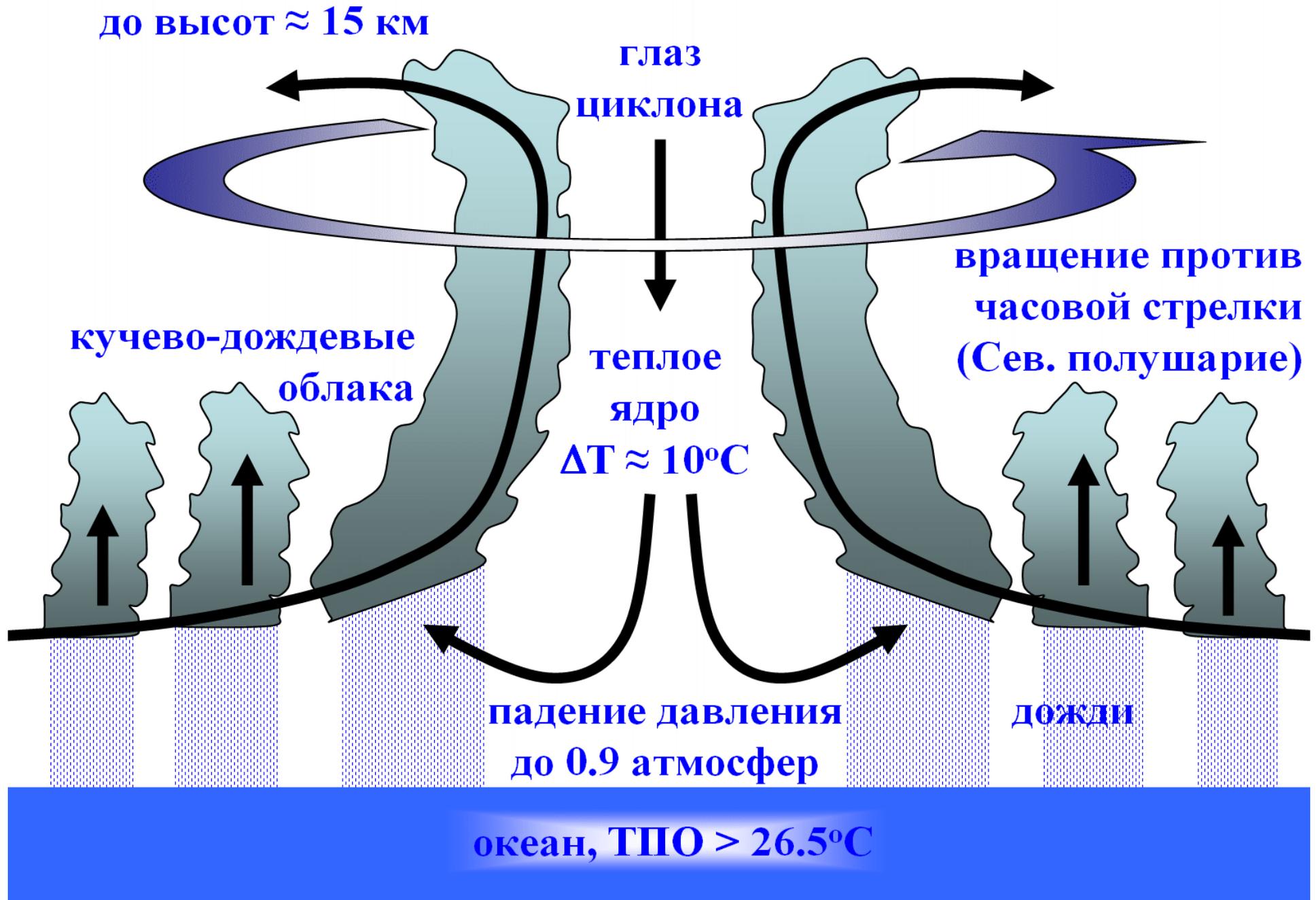


Ураган

**Тропические
ЦИКЛОНЫ**

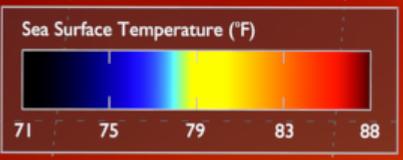
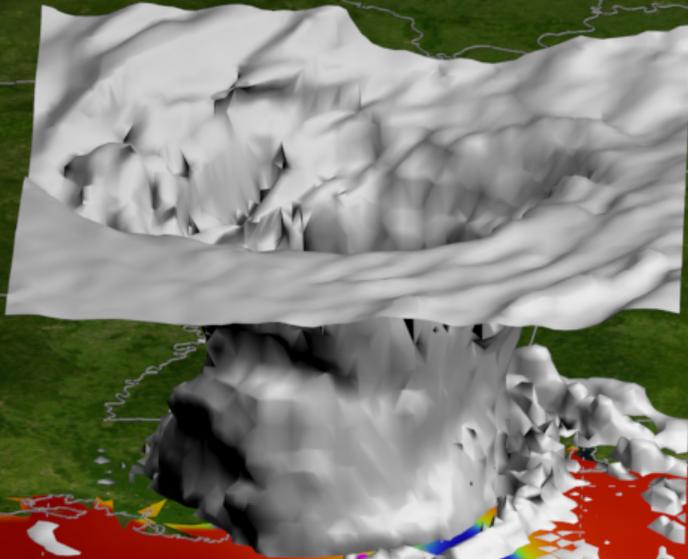
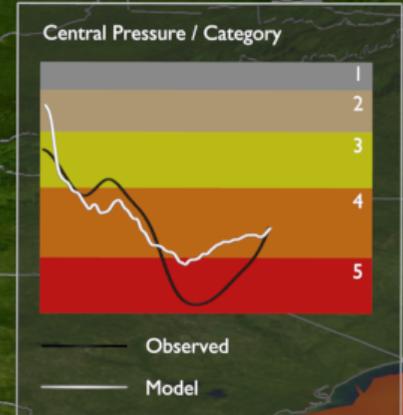
Тайфун

Схема тропического циклона



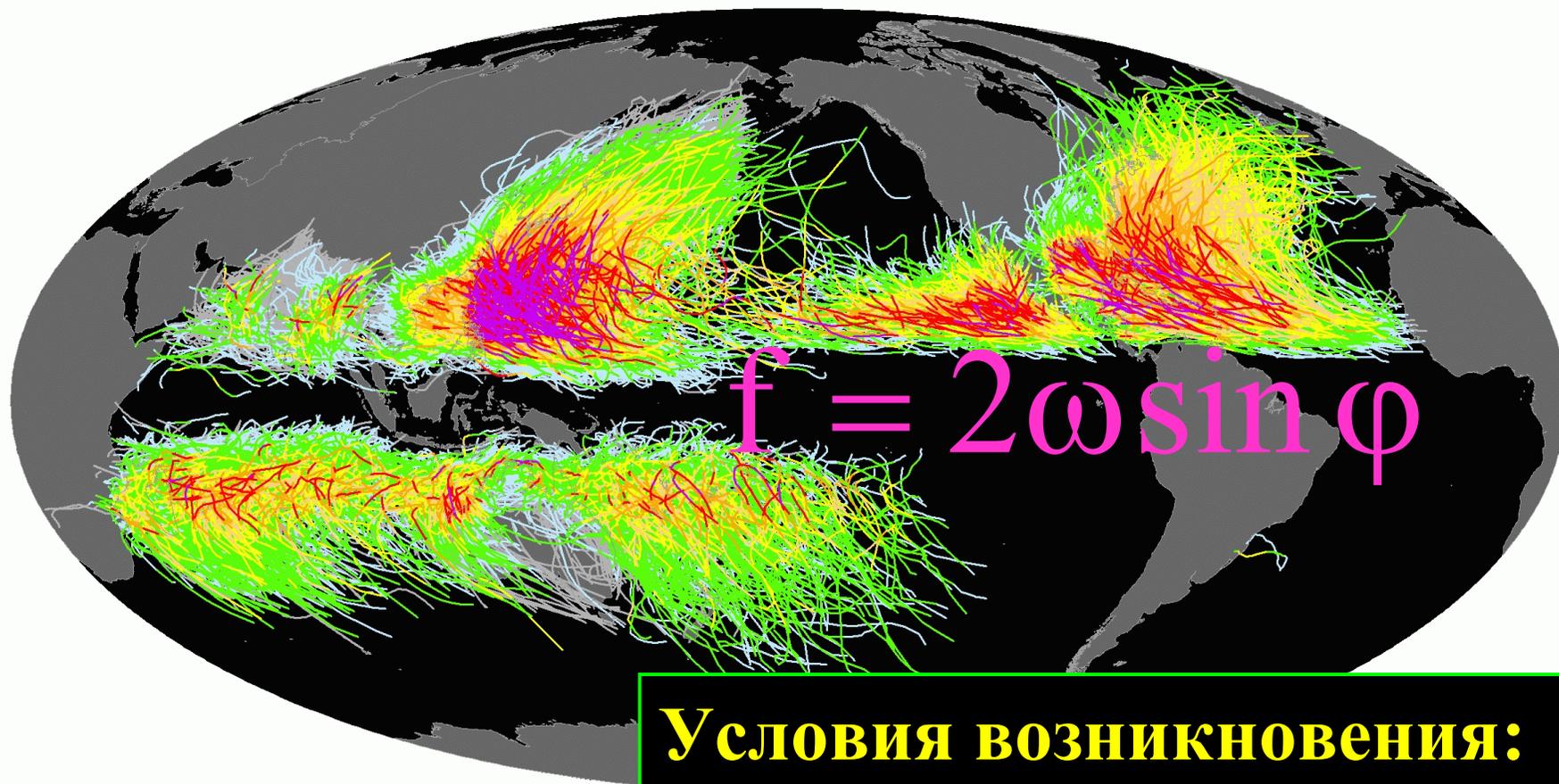
Hurricane Katrina Coupled Model Forecast

Aug 29 19:00 UTC (67h)



Треки всех известных к 2010 г. тропических циклонов

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



Условия возникновения:

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

Классификация тропических циклонов

Категория	Скорость ветра (км/ч)	Штормовой нагон (м)
1	119- 153	1.2 - 1.5
2	154-177	1.8 – 2.4
3	178-209	2.7 – 3.7
4	210-249	4.0 – 5.5
5	≥ 250	> 5.5

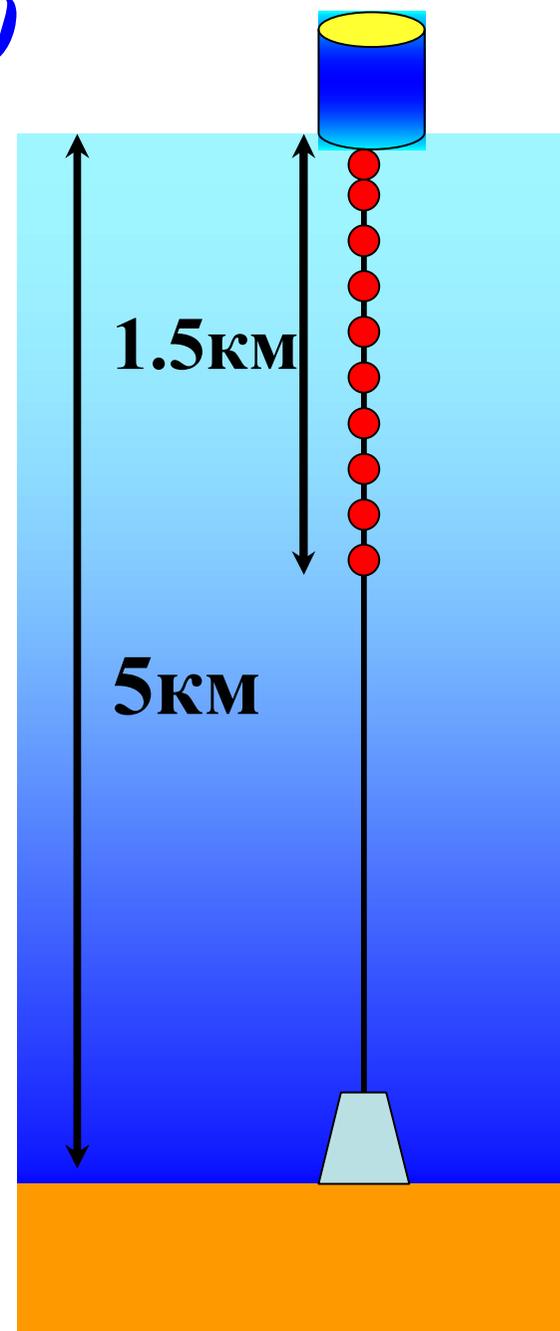
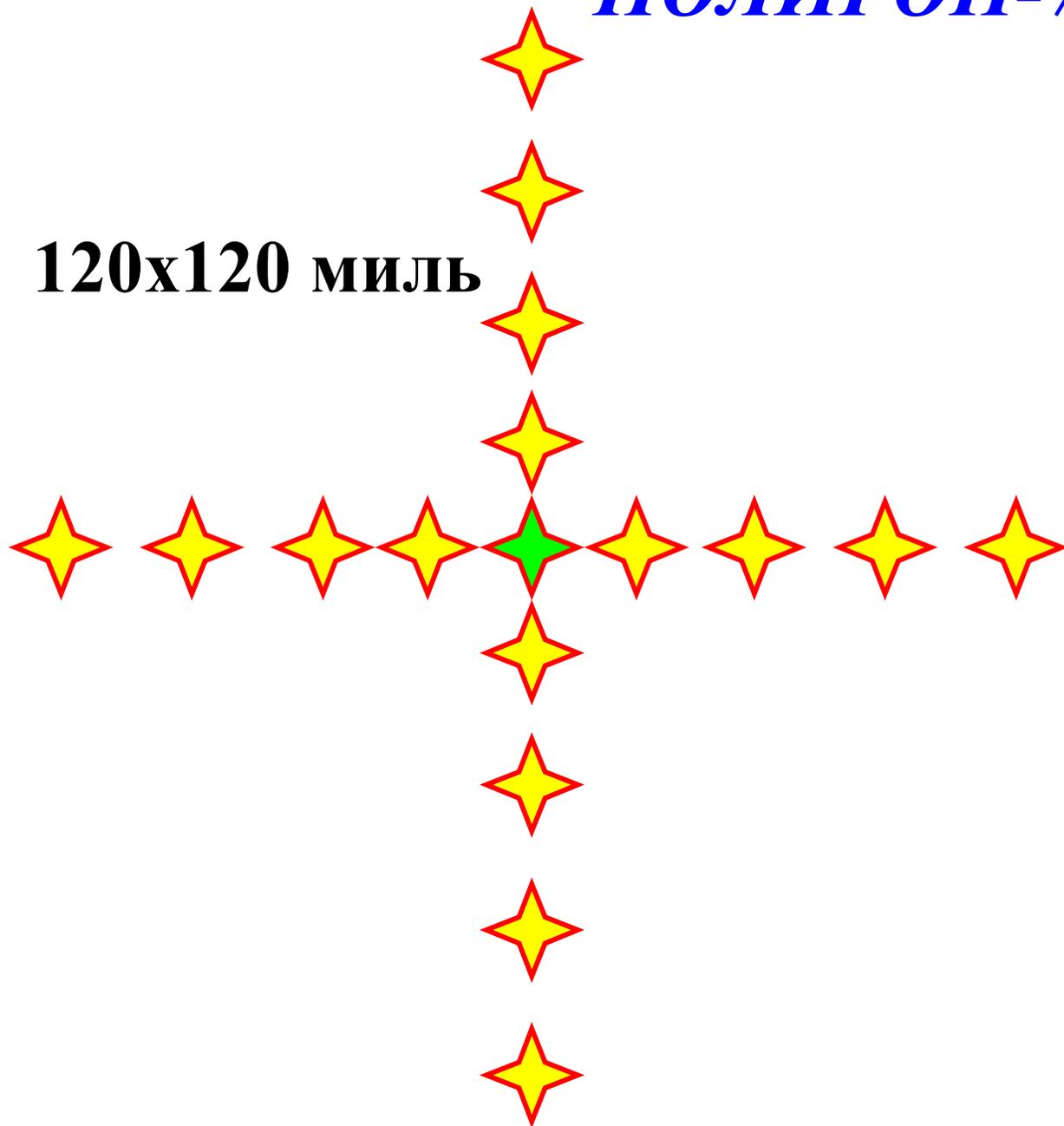
«Оружие» тропического циклона:

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

Синоптические вихри в океане

ПОЛИГОН-70

120x120 миль



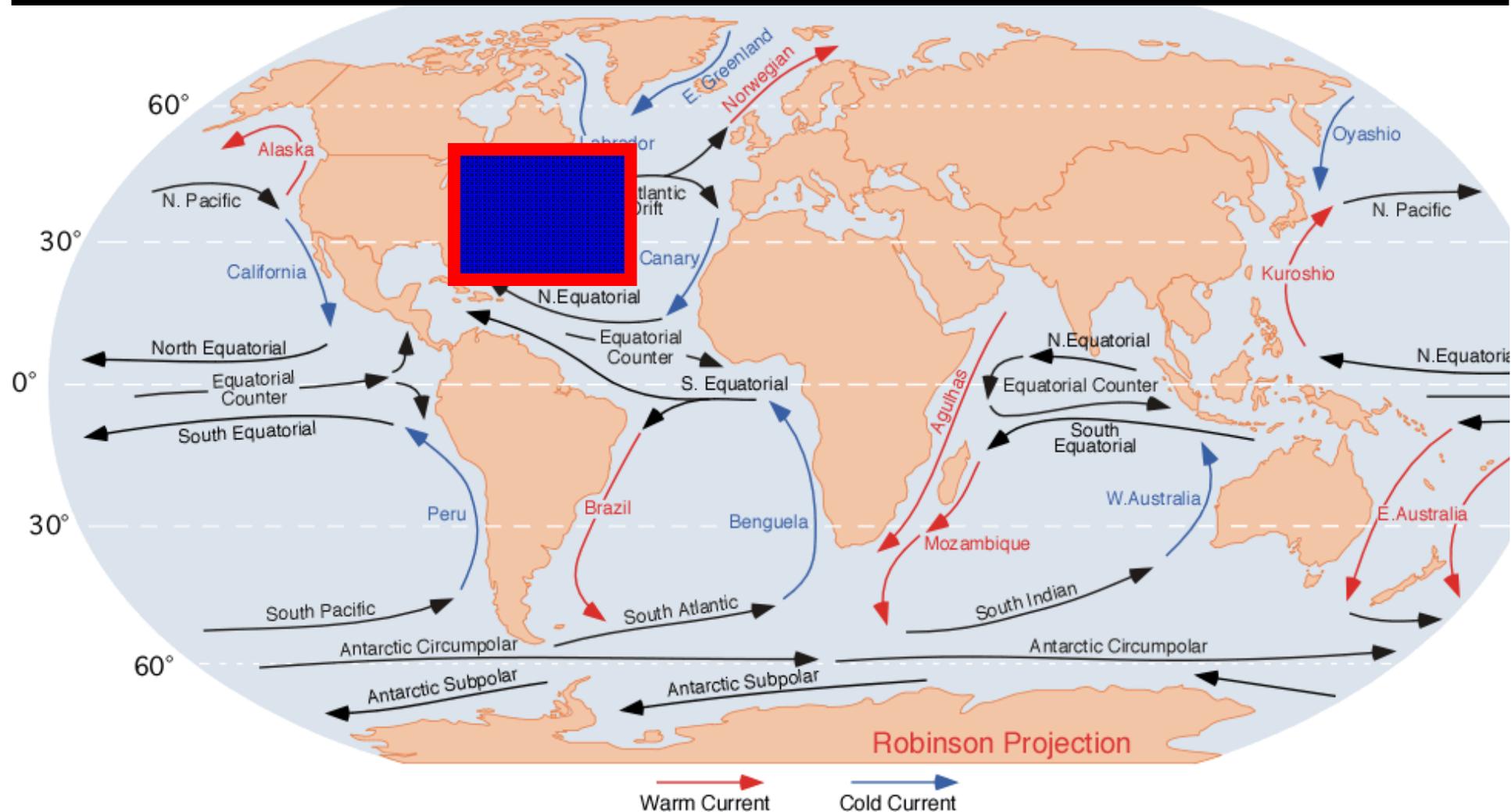
Синоптические вихри

- ❑ 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

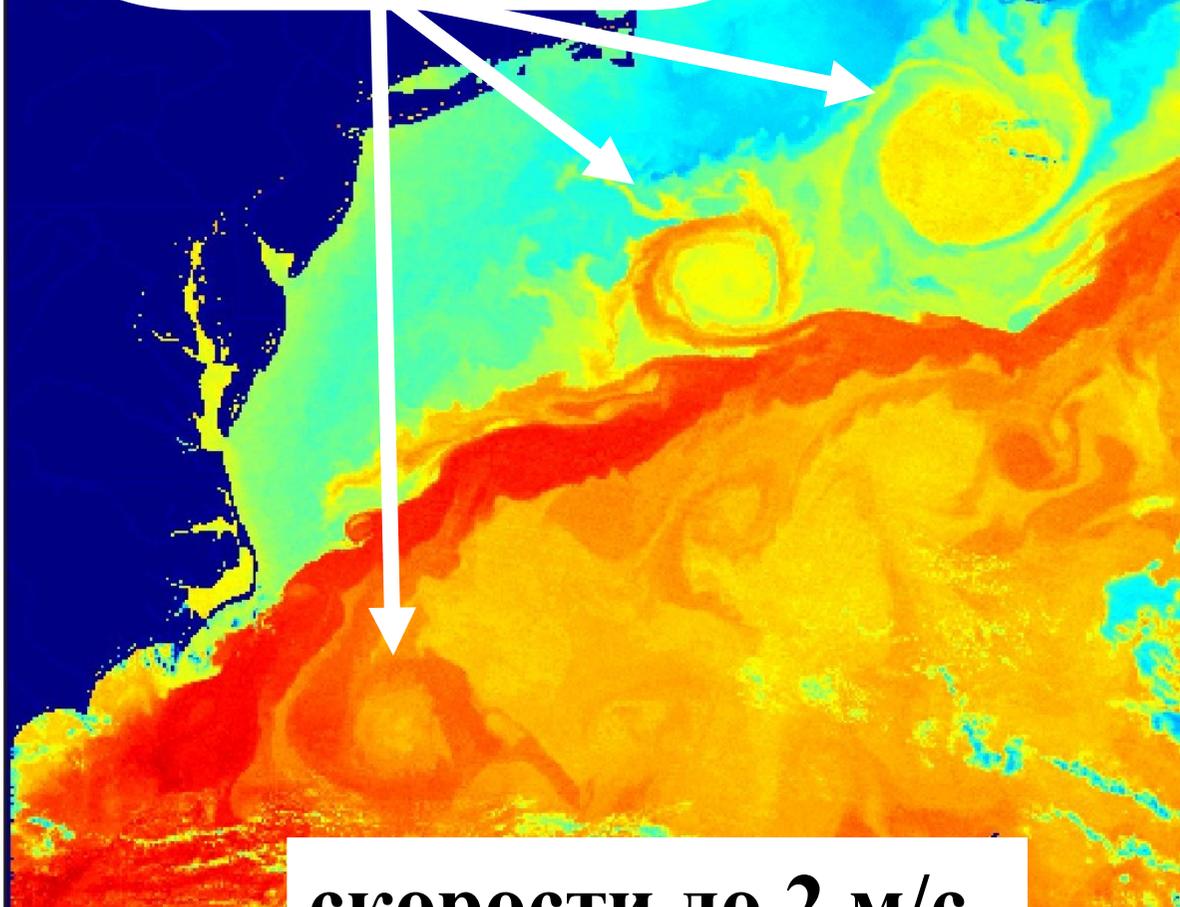
**Мгновенная картина поверхностных течений
(вихреразрешающая численная модель)**



Течения на поверхности Мирового океана



ринги Гольфстрима



скорости до 2 м/с



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

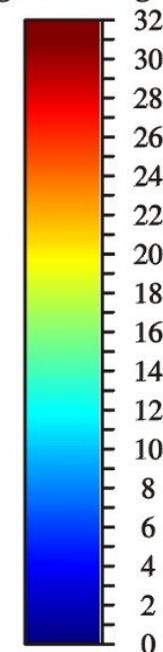
Lon Range: 79.08W to 58.81W

Horiz. Offset: -1994 2

Vert. Offset: 4681 0

SST - Split Window

Surface Temperature (Degrees Centigrade)



Сдвиговая неустойчивость

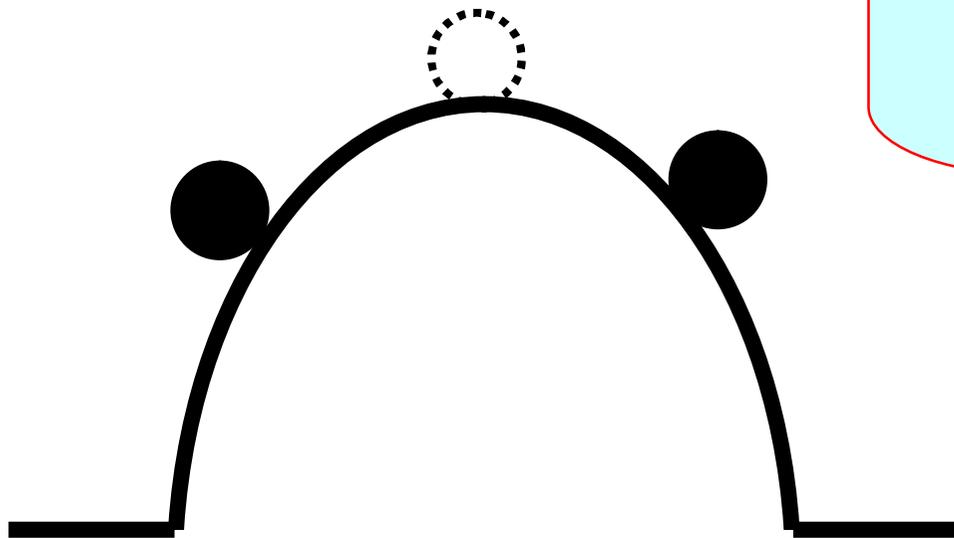


“Sunset at Rock Mountain Beach”

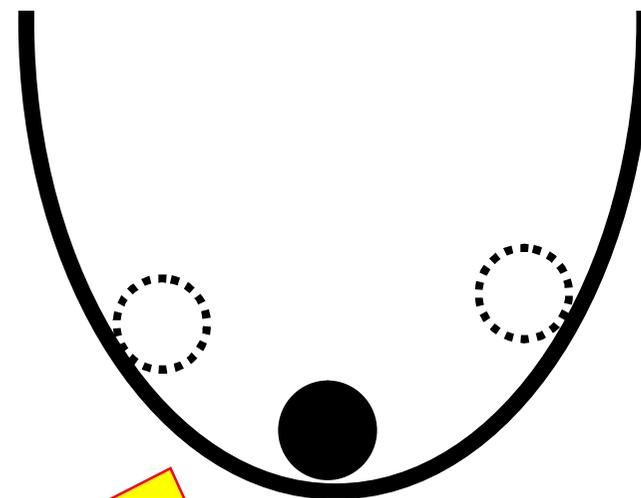
Kelvin-Helmholtz waves. Taken Jan 11, 2002 at 5:38pm from Coherent Technologies, Inc., Lafayette, CO

Устойчивость

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

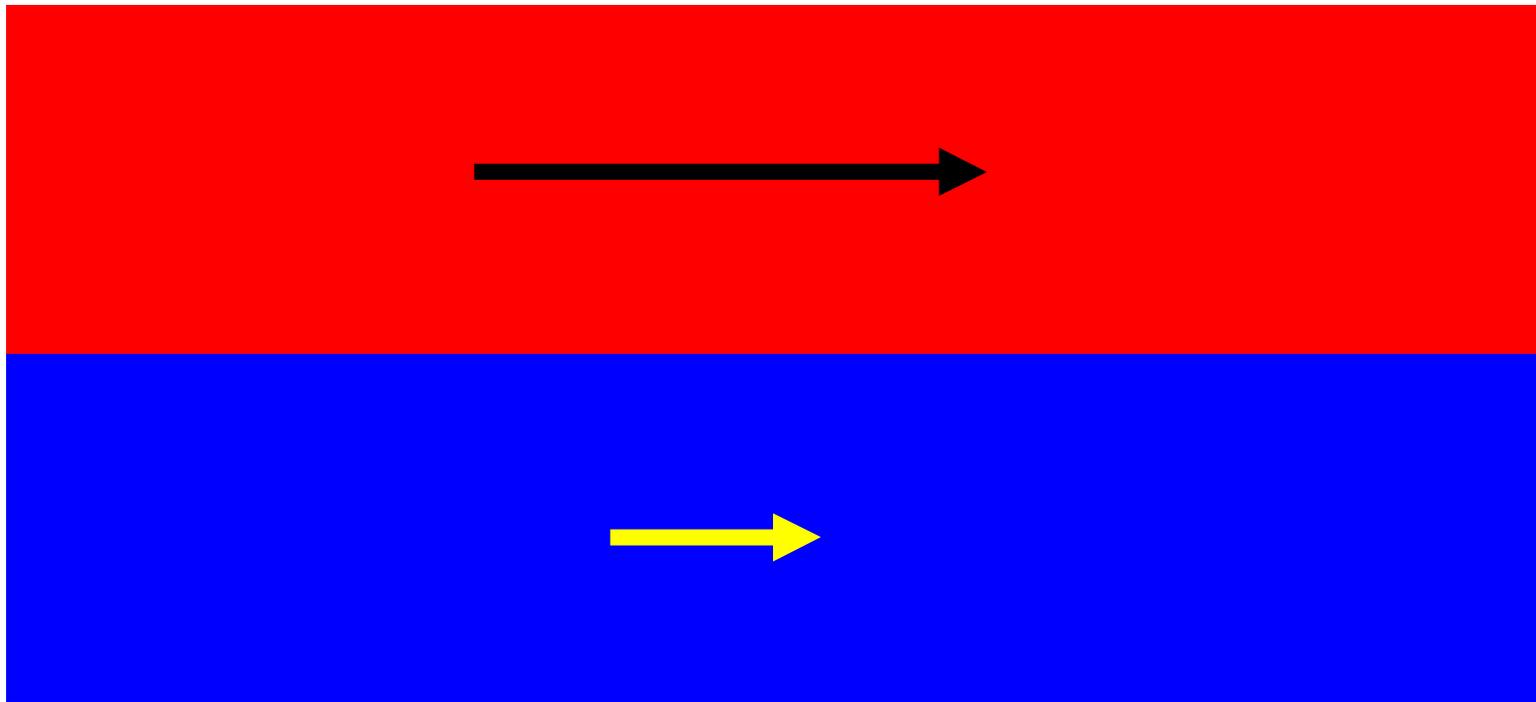


Малые возмущения нарастают со временем

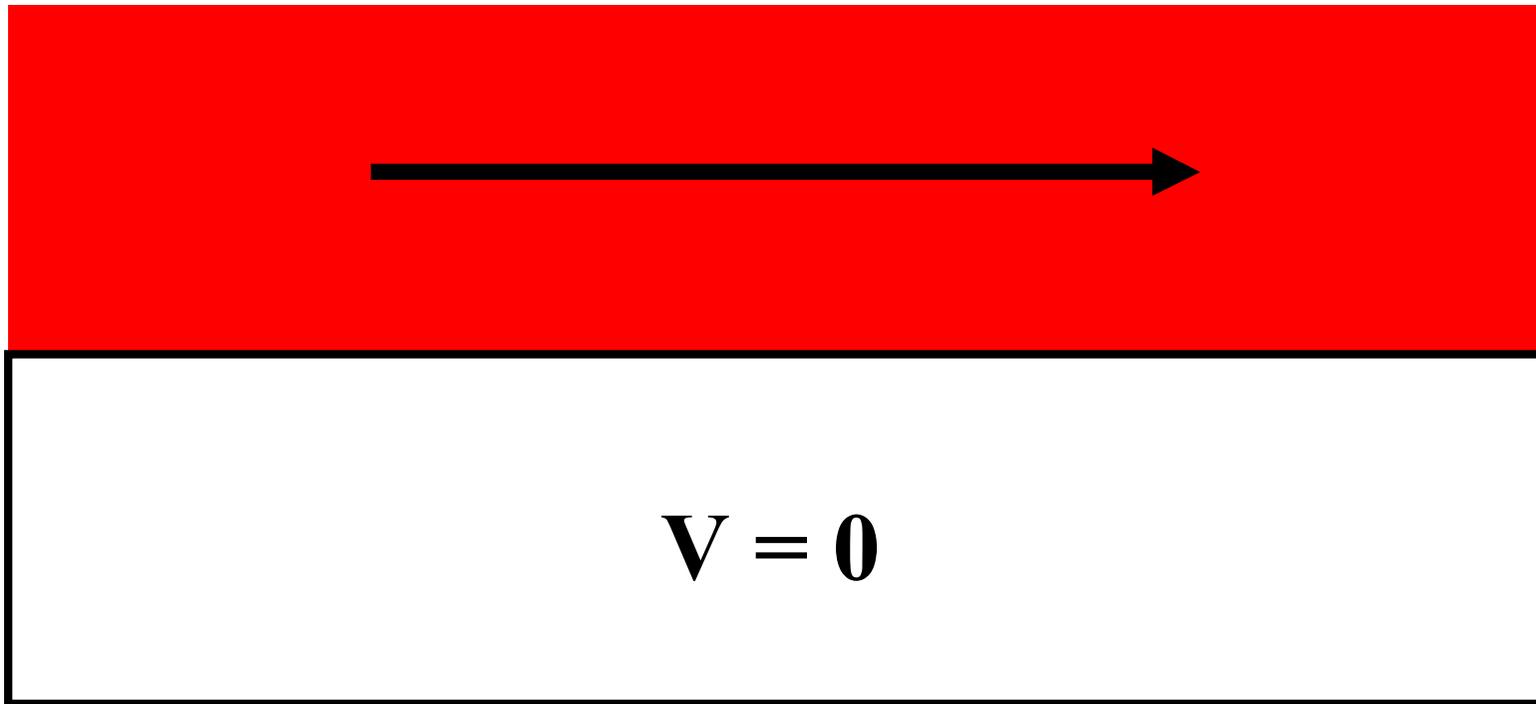


Малые возмущения затухают

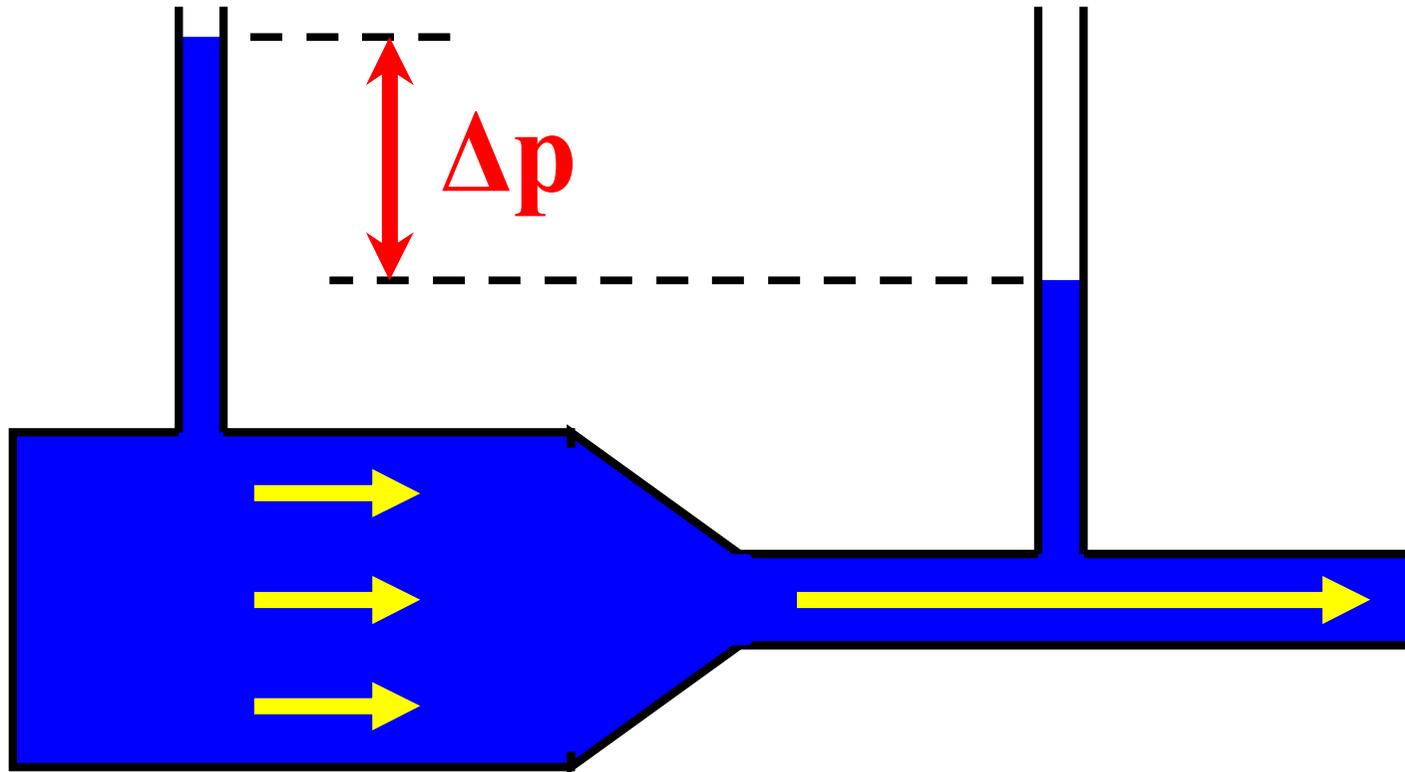
Сдвиговая неустойчивость



Сдвиговая неустойчивость



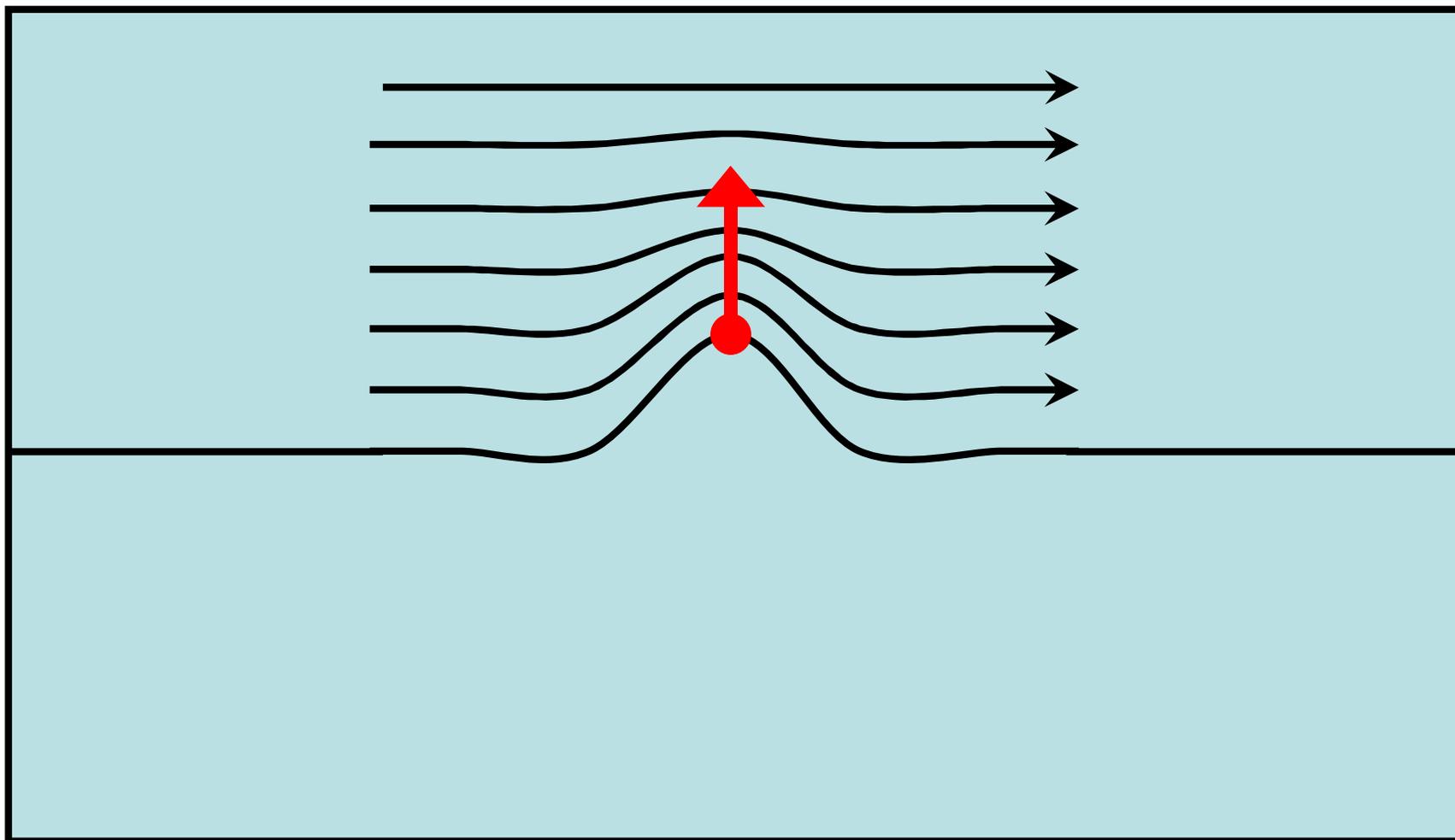
Парадокс гидромеханики



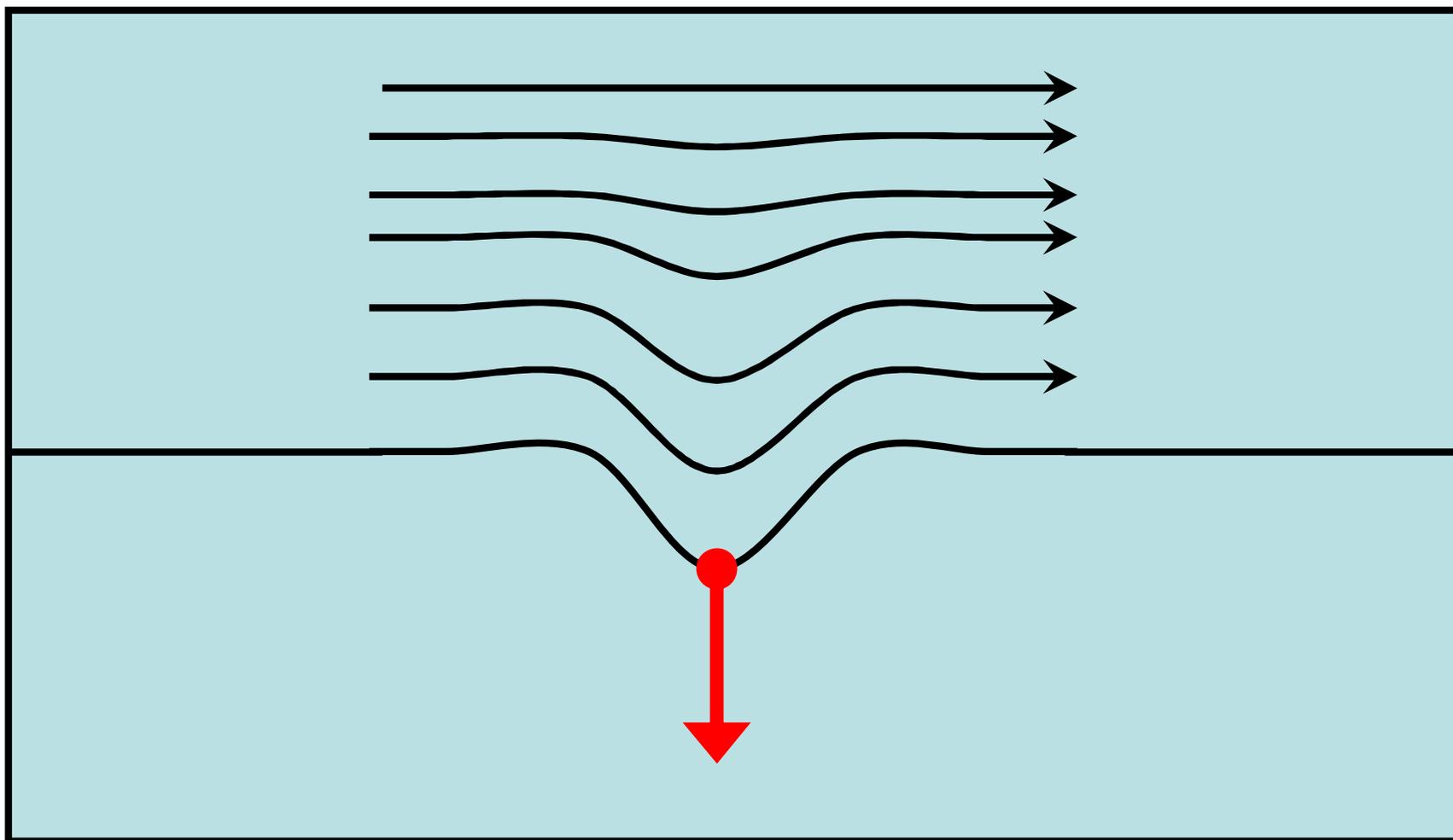
$$\frac{U^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{const}$$

уравнение Бернулли

Сдвиговая неустойчивость



Сдвиговая неустойчивость



Турбулентность

течения

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

ламинарные

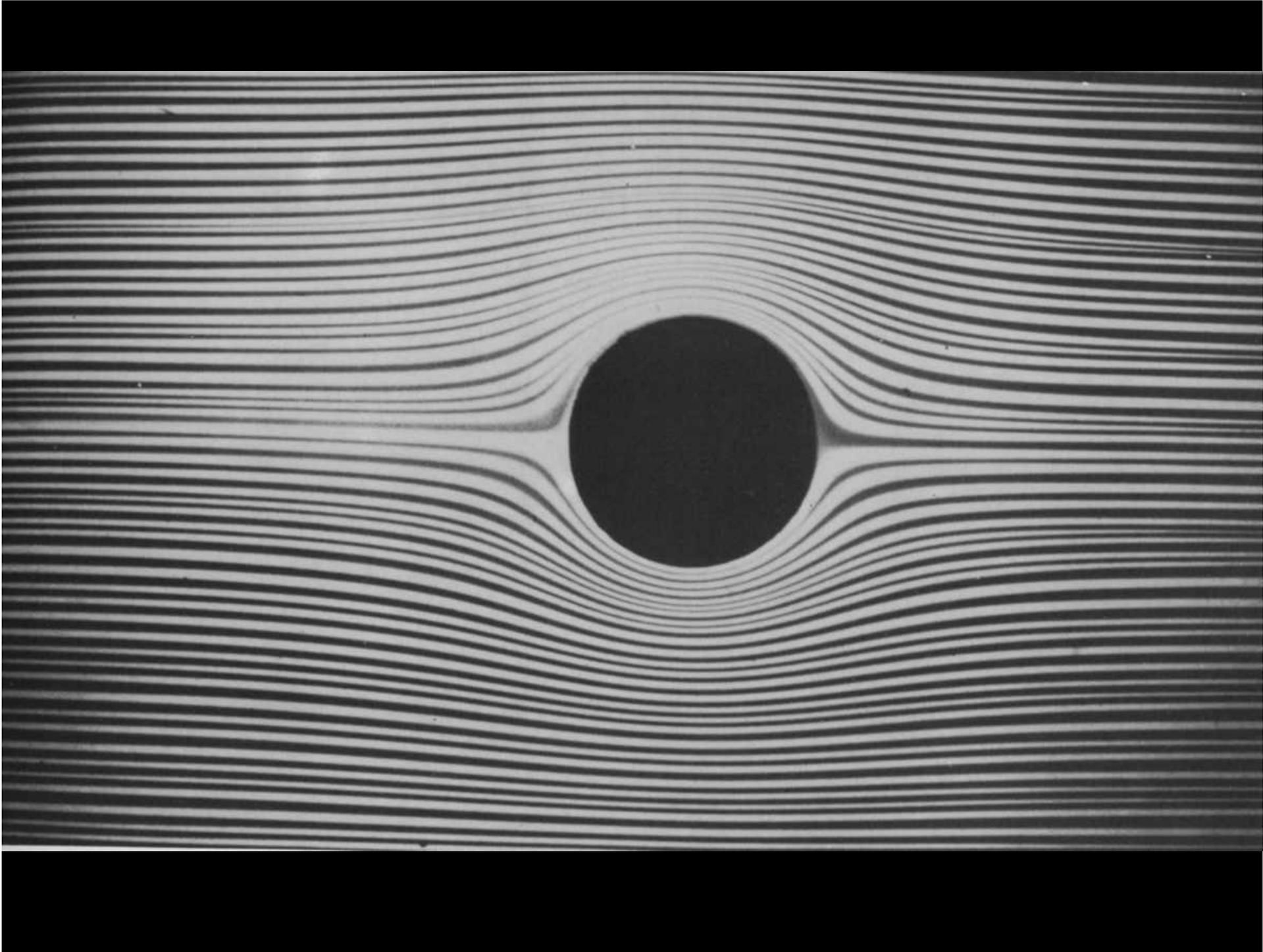
**спокойные и плавные
течения, меняющиеся
лишь в связи с
изменениями
действующих сил или
внешних условий**

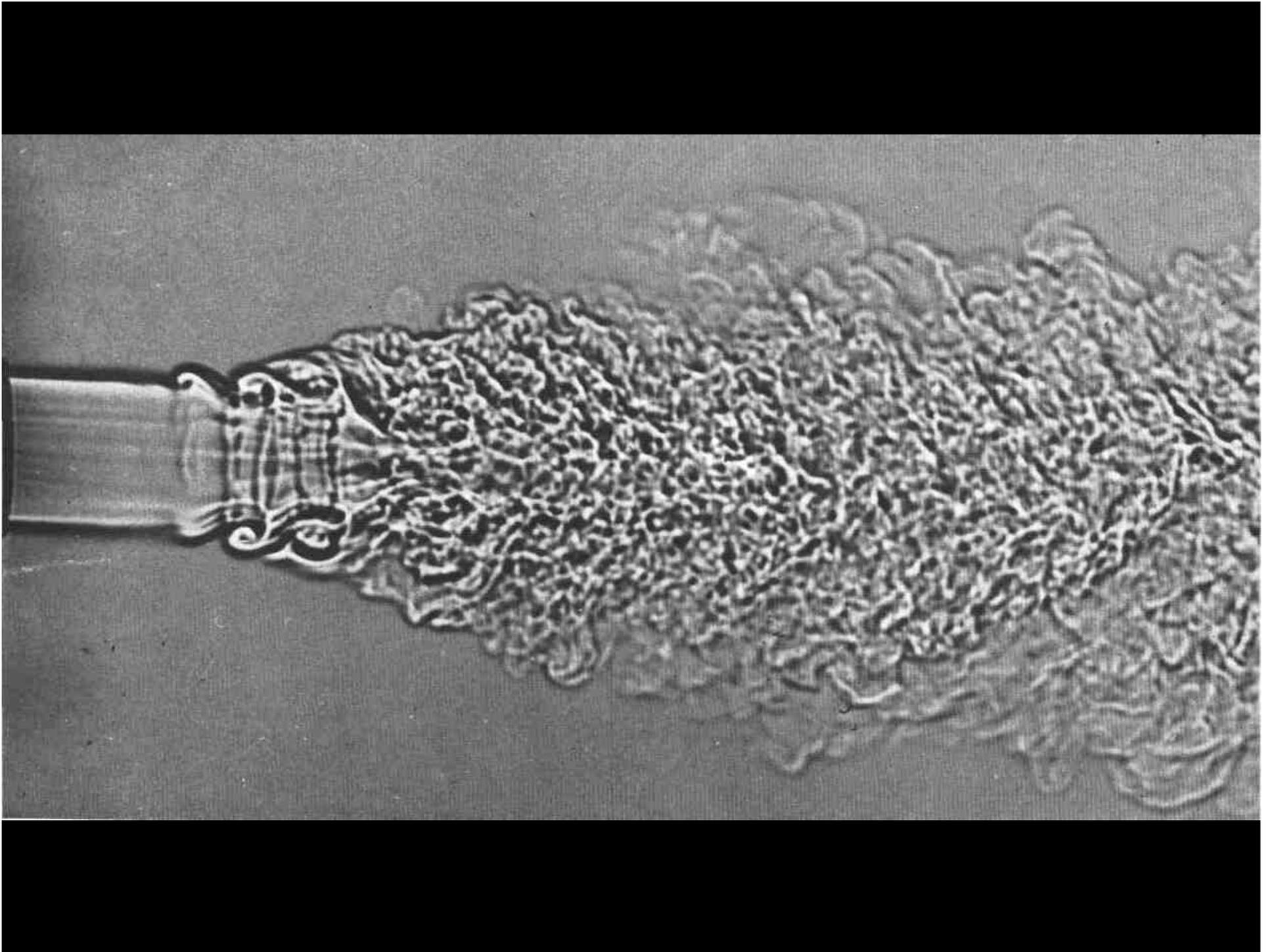
турбулентные

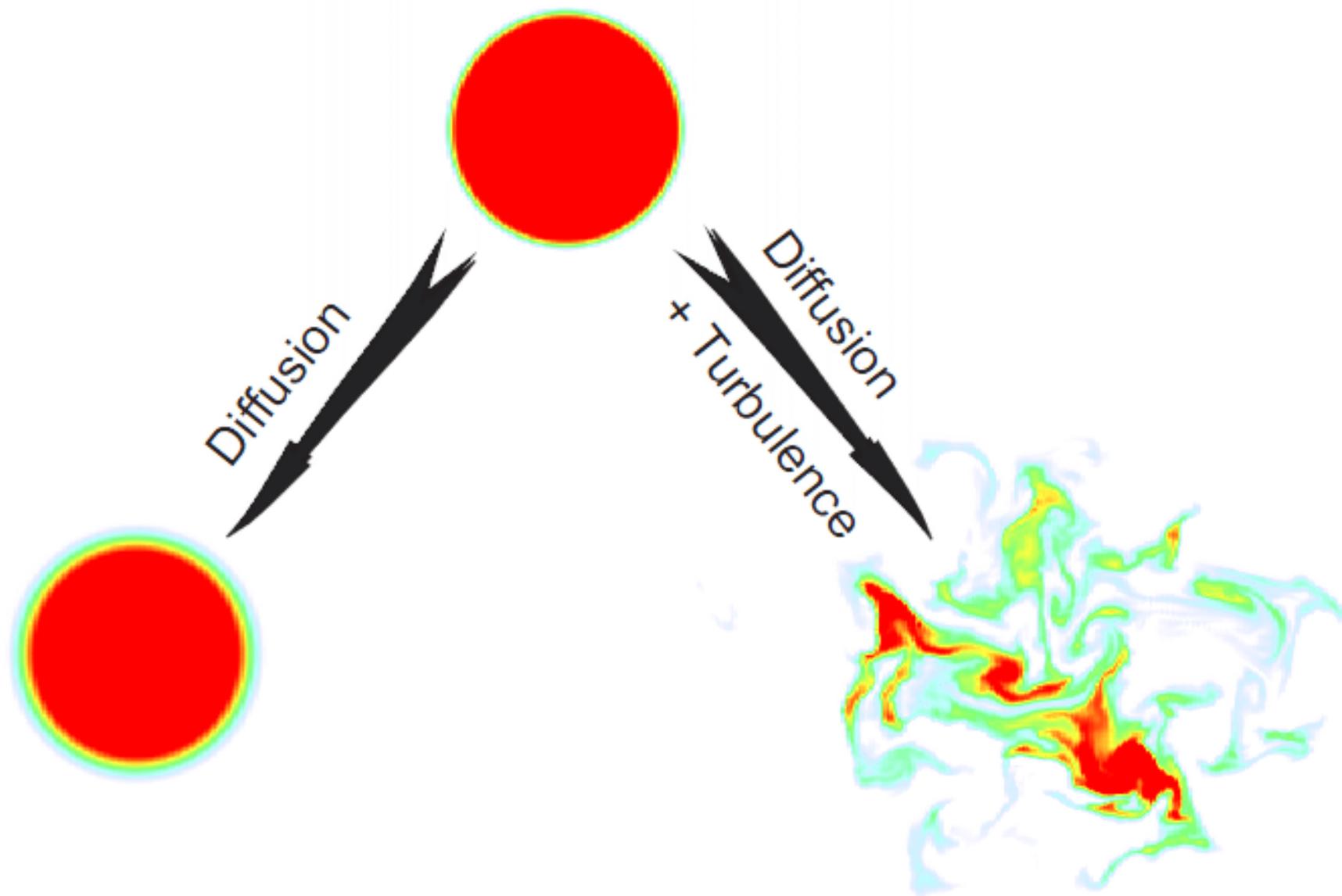
**течения, в которых
гидродинамические
величины испытывают
хаотические
флуктуации,
создаваемые наличием
многочисленных вихрей**

Leonardo da Vinci









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

U – масштаб скорости

L – масштаб длины

$$\frac{(\vec{v} \nabla) \vec{v}}{\nu \Delta \vec{v}} \approx \frac{U^2 / L}{\nu U / L^2} = \frac{UL}{\nu} = Re$$

число Рейнольдса