



**Балтийский
федеральный университет
имени Иммануила Канта**

Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН
Кафедра география океана

Динамика и особенности перемешивания мезомасштабных стоковых течений в океане: модельные расчеты и наблюдения из космоса

Выполнила:

Аспирантка 1 года обучения
Потерухина Ирина
Валерьевна

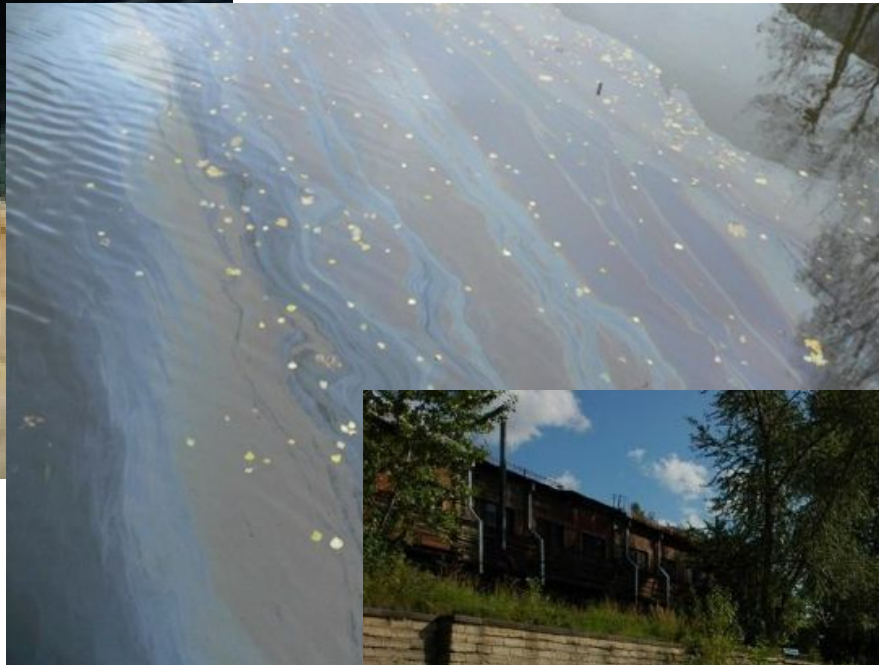
Научный руководитель :

д.ф-м.н, профессор каф.
географии океана
Гриценко Владимир
Алексеевич

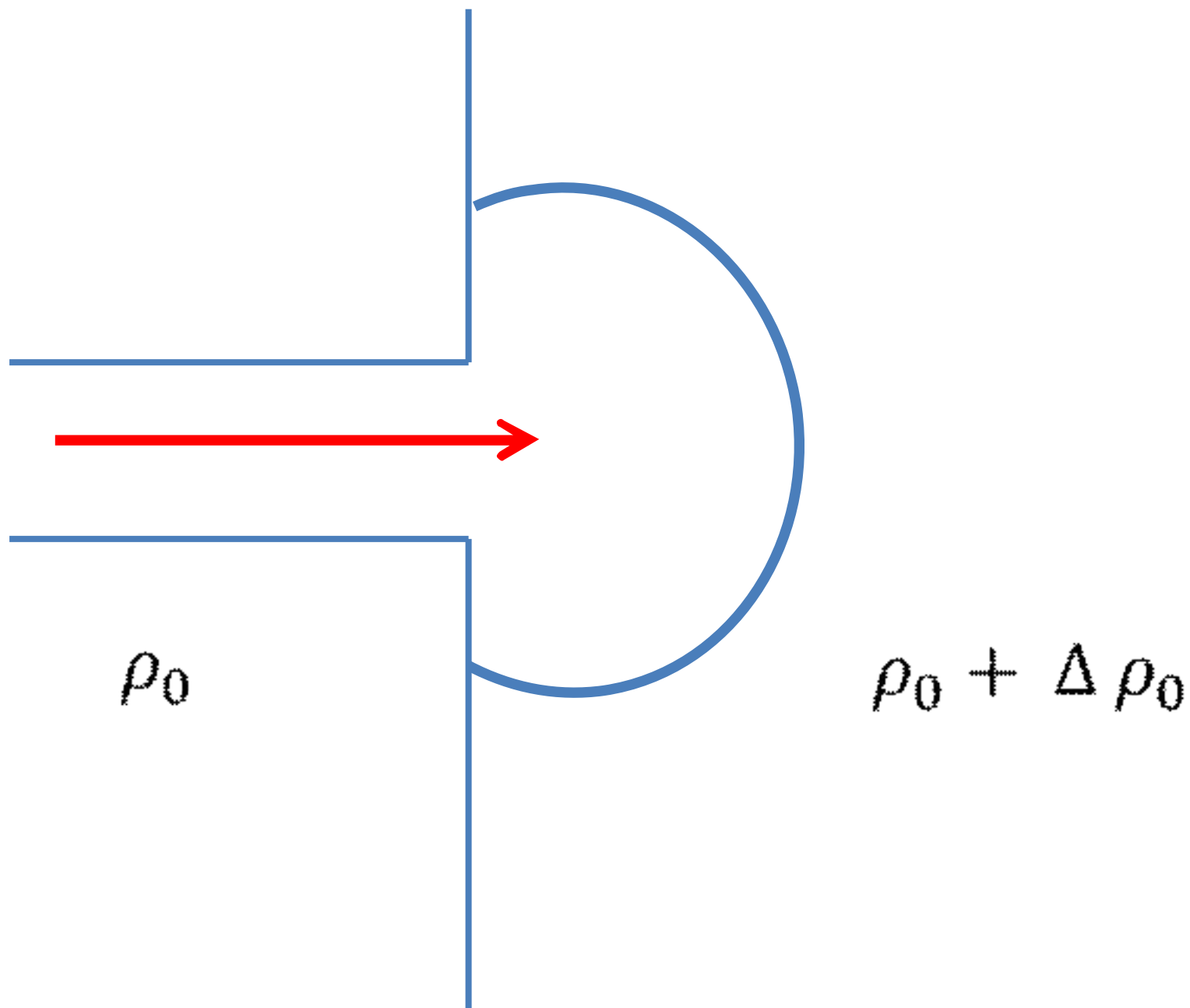
г.Таруса

Актуальность

Экологическая проблема



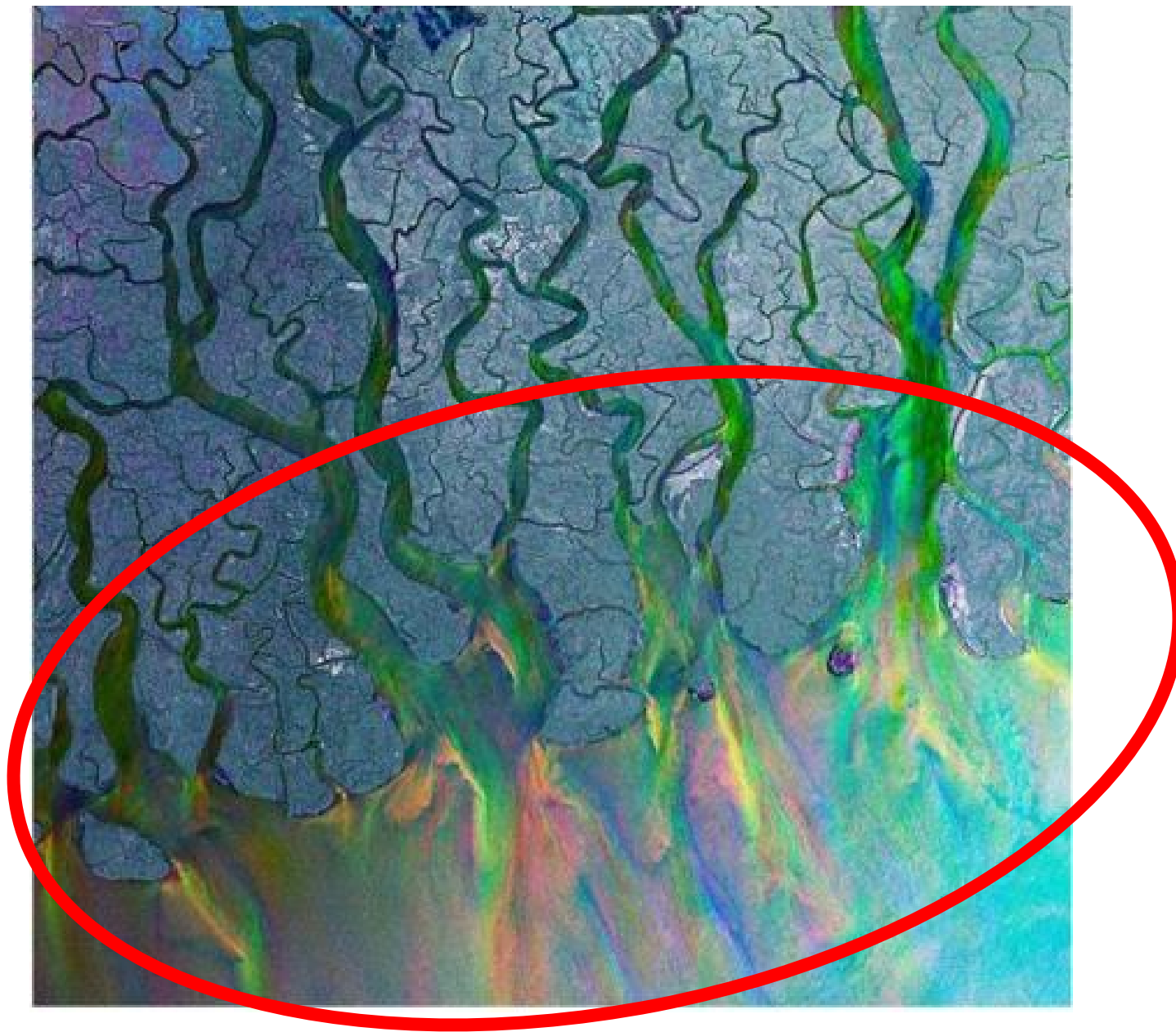
Общая схема стоковых течений



Яркие примеры стоковых течений: река Бижагош, Западная Африка



Яркие примеры стоковых течений: река Ганга, Бангладеш



Яркие примеры стоковых течений: река Амазонка, Бразилия



Яркие примеры стоковых течений: река Макензи, Канада



Яркие примеры стоковых течений: залив Папуа, Новая Гвинея



Яркие примеры стоковых течений: река Янцзы, Шанхай



Яркие примеры стоковых течений: Хуанхэ, Китай



Яркие примеры стоковых течений: Хатанга, Россия



Яркие примеры стоковых течений: Ла-Плата, Южная Америка



Уравнения модели

Основные уравнения численной модели движения жидкости в горизонтальной плоскости (модель ХУ), рассмотренные Гриценко В.А.

$$\rho \frac{d\mathbf{u}}{dt} - \rho \mathbf{f} \mathbf{v} = -\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{x}} + \mu_{\text{T}} \Delta \mathbf{u}, \quad \rho \frac{d\mathbf{v}}{dt} + \rho \mathbf{f} \mathbf{u} = -\frac{\partial \mathbf{p}}{\partial \mathbf{y}} + \mu_{\text{T}} \Delta \mathbf{v},$$

$$\frac{\partial \mathbf{u}}{\partial \mathbf{x}} + \frac{\partial \mathbf{v}}{\partial \mathbf{y}} = 0,$$

$$\frac{d\rho}{dt} = \mathbf{D}_{\text{T}} \Delta \rho, \quad \frac{d\mathbf{c}}{dt} = \mathbf{D}_{\text{T}} \Delta \mathbf{c},$$

Где U и V –
компоненты
горизонтальной
скорости
 C – трассер
(краска)

При переходе к переменным завихренность-функция тока-избыточная плотность получаем следующий вид уравнений:

$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \frac{dv}{dt} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \cdot \frac{du}{dt} \right) + \mathbf{f} \cdot \left(\mathbf{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = v_T \Delta \omega,$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} = \mathbf{D}_T \Delta \rho,$$

$$\Delta \psi = \omega \quad \frac{\partial c}{\partial t} + \mathbf{u} \frac{\partial c}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial c}{\partial y} = \mathbf{D}_T \Delta c,$$

где

$$\omega = \partial \mathbf{u} / \partial y - \partial \mathbf{v} / \partial x \text{ - завихренность; } \psi \text{ - функция тока}$$

$$\mathbf{u} = \partial \psi / \partial y \quad \mathbf{v} = -\partial \psi / \partial x$$

$$v_T = v_0 + v_{ef}$$

$$\rho = \rho_0 + \sigma \text{ - плотность;}$$

$$\mathbf{D}_T = \mathbf{Sc} v_T \text{ - коэффициенты турбулентных вязкости и диффузии; } \mathbf{Sc} \text{ - турбулентное число Шмидта;}$$

$$v_{\text{ЭФ}} \text{ - эффективная турбулентная вязкость;}$$

$$v_0 \text{ молекулярный коэффициент вязкости воды}$$

Дискретные уравнения численной модели течения были построены при помощи алгоритма с направленными разностями (Роуч, 1980; Гриценко, Юрова, 1997-а) и имеют следующий вид:

$$\begin{aligned}
 & \frac{\omega_{i,j}^{n+1} - \omega_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{\mathbf{u}_R^n \omega_{RX}^n - \mathbf{u}_L^n \omega_{LX}^n}{\Delta x} + \frac{\mathbf{v}_R^n \omega_{RZ}^n - \mathbf{v}_L^n \omega_{LZ}^n}{\Delta y} + \\
 & + \frac{\sigma_{RX}^n - \sigma_{LX}^n}{\Delta x} \cdot \left(\frac{\mathbf{v}_{i,j}^n - \mathbf{v}_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{u}_R^n \mathbf{v}_{RX}^n - \mathbf{u}_L^n \mathbf{v}_{LX}^n}{\Delta x} + \frac{\mathbf{v}_R^n \mathbf{v}_{RZ}^n - \mathbf{v}_L^n \mathbf{v}_{LZ}^n}{\Delta y} \right) - \\
 & - \frac{\sigma_{RZ}^n - \sigma_{LZ}^n}{\Delta y} \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_{i,j}^n - \mathbf{u}_{i,j}^{n-1}}{\Delta t} + \frac{\mathbf{u}_R^n \mathbf{u}_{RX}^n - \mathbf{u}_L^n \mathbf{u}_{LX}^n}{\Delta x} + \frac{\mathbf{v}_R^n \mathbf{u}_{RZ}^n - \mathbf{v}_L^n \mathbf{u}_{LZ}^n}{\Delta y} \right) + \\
 & + \frac{\mathbf{fL}_0 \Delta \rho_0}{\rho_0 \mathbf{U}_0} \cdot \left(\frac{\mathbf{u}_R^n \sigma_{RX}^n - \mathbf{u}_L^n \sigma_{LX}^n}{\Delta x} + \frac{\mathbf{v}_R^n \sigma_{RZ}^n - \mathbf{v}_L^n \sigma_{LZ}^n}{\Delta y} \right) = \nu_{\text{ЭФ}} \frac{\Delta^2 \omega_{i,j}^n}{\Delta x^2}
 \end{aligned}$$

$$\frac{\sigma_{i,j}^{n+1} - \sigma_{i,j}^n}{\Delta t} + \frac{\mathbf{u}_R^n \sigma_{RX}^n - \mathbf{u}_L^n \sigma_{LX}^n}{\Delta x} + \frac{\mathbf{v}_R^n \sigma_{RZ}^n - \mathbf{v}_L^n \sigma_{LZ}^n}{\Delta y} = \text{Sc} \cdot \nu_T \frac{\Delta^2 \sigma_{i,j}^n}{\Delta y^2}$$

$$\Psi_{i+1,j}^n + \Psi_{i-1,j}^n + \Psi_{i,j+1}^n + \Psi_{i,j-1}^n - 4 \cdot \Psi_{i,j}^n = \Delta x^2 \cdot \omega_{i,j}^n$$

где

$$\mathbf{u}_R^n = \frac{\mathbf{u}_{i,j}^n + \mathbf{u}_{i+1,j}^n}{2} \quad \mathbf{v}_R^n = \frac{\mathbf{v}_{i,j}^n + \mathbf{v}_{i+1,j}^n}{2} \quad \mathbf{u}_L^n = \frac{\mathbf{u}_{i,j}^n + \mathbf{u}_{i-1,j}^n}{2} \quad \mathbf{v}_L^n = \frac{\mathbf{v}_{i,j}^n + \mathbf{v}_{i-1,j}^n}{2}$$

$$\Delta \omega_{i,j}^n = \omega_{i+1,j}^n + \omega_{i-1,j}^n + \omega_{i,j+1}^n + \omega_{i,j-1}^n - 4 \cdot \omega_{i,j}^n$$

$$\mathbf{f}_{RX}^n = \begin{cases} \mathbf{f}_{i,j}^n, & \mathbf{u}_R^n > 0 \\ \mathbf{f}_{i+1,j}^n, & \mathbf{u}_R^n < 0 \end{cases} \quad \mathbf{f}_{LX}^n = \begin{cases} \mathbf{f}_{i-1,j}^n, & \mathbf{u}_L^n > 0 \\ \mathbf{f}_{i,j}^n, & \mathbf{u}_L^n < 0 \end{cases}$$

$$\mathbf{f}_{RZ}^n = \begin{cases} \mathbf{f}_{i,j}^n, & \mathbf{v}_R^n > 0 \\ \mathbf{f}_{i,j+1}^n, & \mathbf{v}_R^n < 0 \end{cases} \quad \mathbf{f}_{LZ}^n = \begin{cases} \mathbf{f}_{i,j-1}^n, & \mathbf{v}_L^n < 0 \\ \mathbf{f}_{i,j}^n, & \mathbf{v}_L^n > 0 \end{cases}$$

$\mathbf{f}_{i,j}^n$ - значения одного из полей задачи, например, завихренности (ω) или плотности (σ) на n -ом временном слое в (i,j) узле расчетной сетки.

К сожалению, данные уравнения не могут быть решены по традиционной двухслойной по времени схеме. Для их решения была использована трехслойная по времени схема, причем для вычисления полных производных по времени для завихренности использовались значения со второго и третьего шага по времени, а для компонент скорости - с первого и второго. Для расчета самого первого, начального шага по времени второй член (выражение в скобках) левой части уравнения не учитывался.

$$\rho \frac{d\omega}{dt} + \left(\frac{\partial \rho}{\partial x} \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt} - \frac{\partial \rho}{\partial y} \cdot \frac{d\mathbf{u}}{dt} \right) + \mathbf{f} \cdot \left(\mathbf{u} \frac{\partial \rho}{\partial x} + \mathbf{v} \frac{\partial \rho}{\partial y} \right) = \nu_T \Delta \omega,$$

Для сравнения процедура первого шага была выполнена в виде отдельного процесса с уменьшенным (в сто раз) шагом по времени. Сколько-нибудь заметных различий в результатах расчетов по обоим алгоритмам старта обнаружить не удалось.

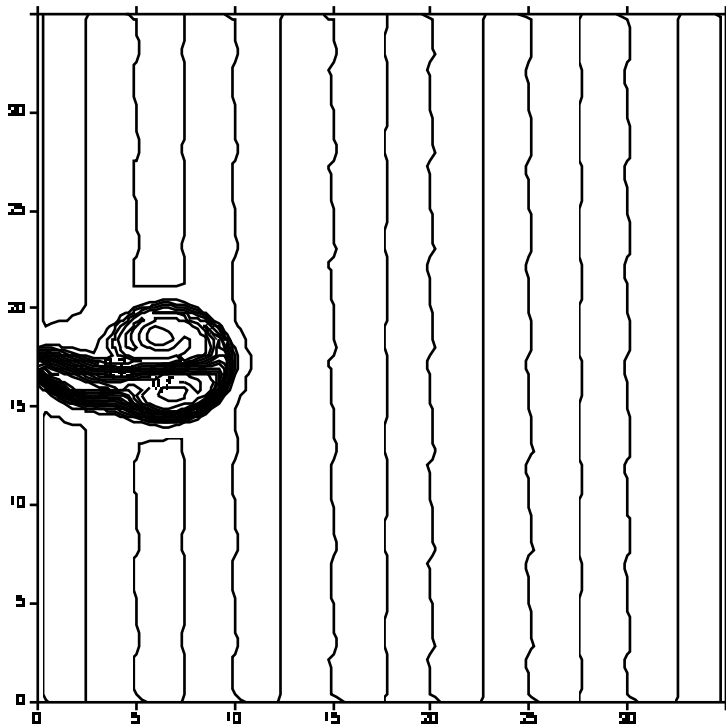
Для решения уравнения Пуассона в подзадаче определения функции тока по известной завихренности был использован алгоритм последовательной верхней релаксации (Роуч, 1980).

Общая схема численных экспериментов

$$Ro = U_0 / f \cdot L_0 \text{ - число Россби}$$

$$\frac{\rho_0}{\Delta\rho_0} \cdot \frac{U_0}{f \cdot L_0} = \frac{\rho_0}{\Delta\rho_0} \cdot \mathbf{Ro} = \mathbf{Ro}^*$$

Ro^* - редуцированное число
Россби



$$\mathbf{Ro}^* = 50$$

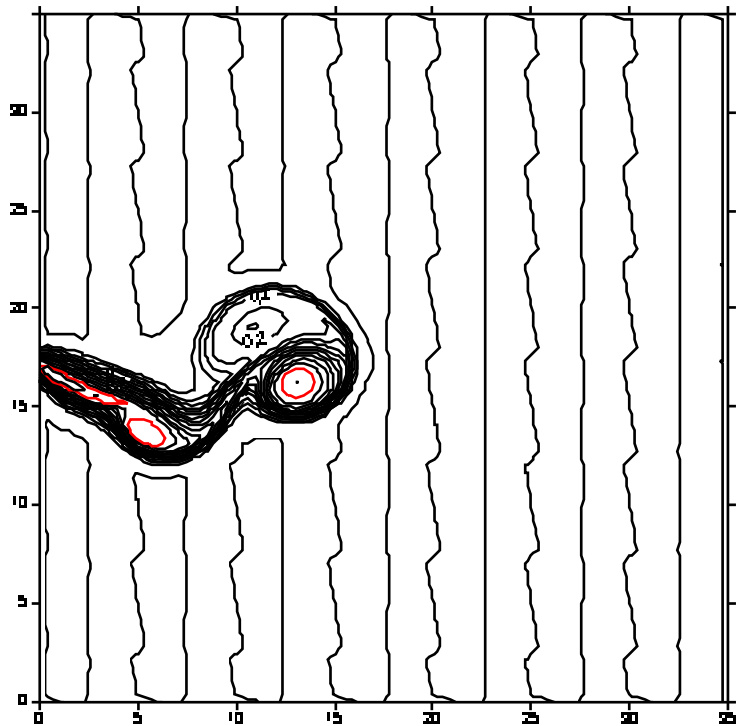
$$\mathbf{Ro} = 0.05$$

$$h_0 = 35$$

$$u_0 = 50$$

$$\Delta\rho_0 = 0.001$$

очень слабое , едва
заметное
искривление



$$Ro^* = 0,01$$

$$Ro = 1$$

$$h_0 = 100$$

$$u_0 = 1$$

$$\Delta p_0 = 0.001$$

крутой поворот, завал,
контурное течение

Яркие примеры стоковых течений: Хуанхэ, Китай



Благодарю за внимание!