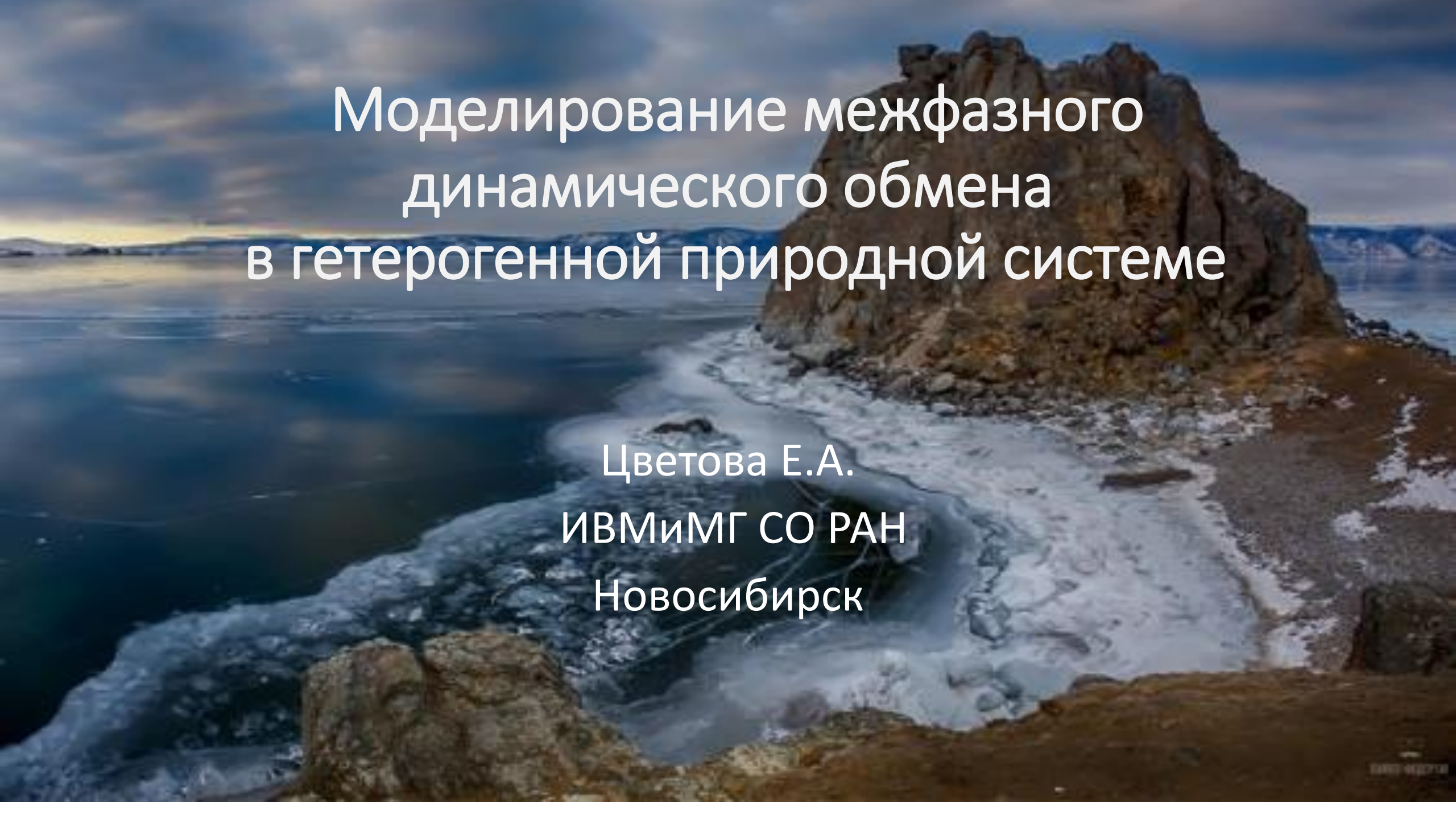




Моделирование межфазного динамического обмена в гетерогенной природной системе

Цветова Е.А.
ИВМиМГ СО РАН
Новосибирск

Мотивация: Метан в Байкале

- «Зеленый» газ. Связь с климатическими процессами
- Открытие подводных выходов газа и грязевых вулканов
- Открытие залежей гидрата
- Круги на льду
- Продолжение цикла исследований

Землетрясение на Байкале 16.03.2018



Землетрясение на Байкале 16 марта 2018 г.



Землетрясение на Байкале 16.03.2018



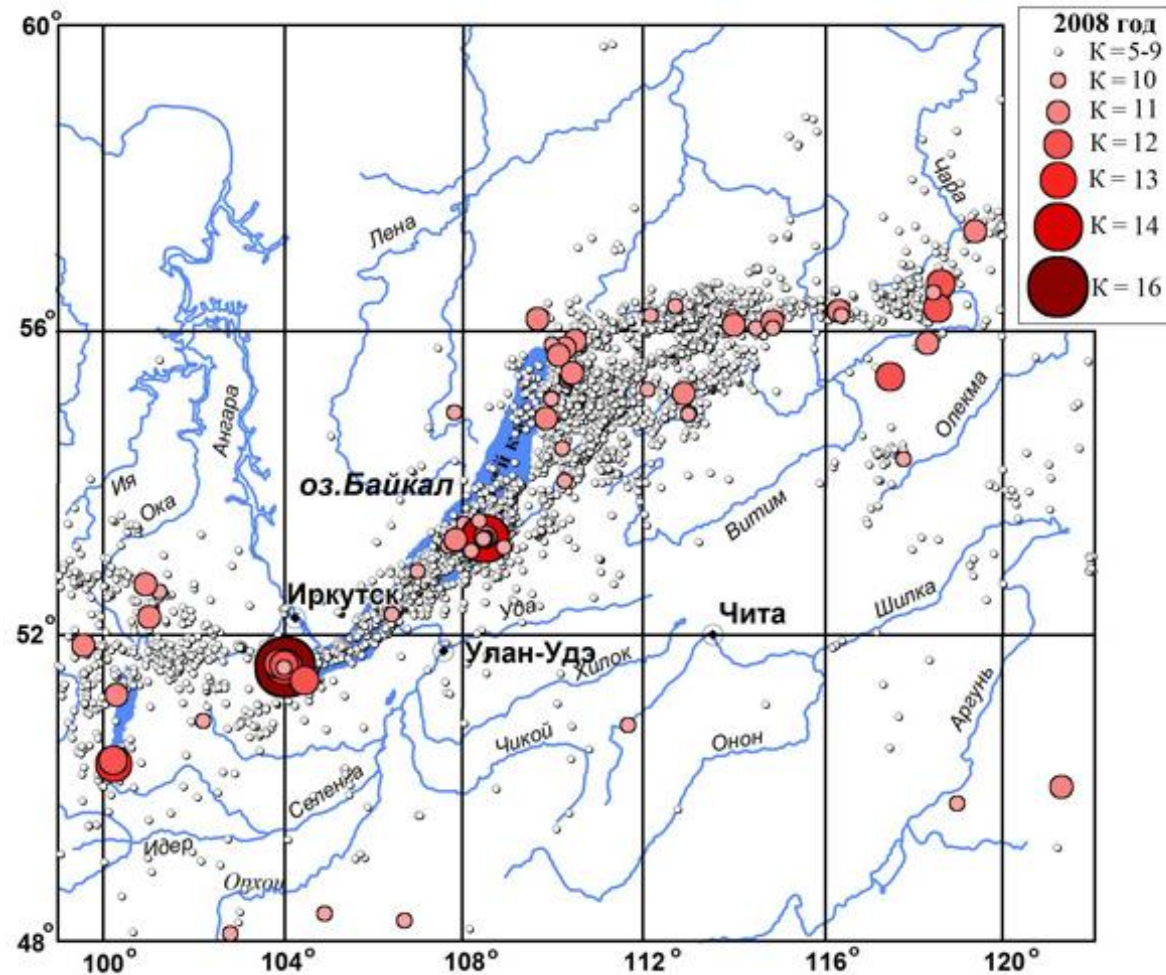
Землетрясение на Байкале 16.03.2018



Землетрясение на Байкале 16.03.2018



Earthquakes in 2008, significant Kultuk and near cape Nizhnee Izgolv'e



Earthquakes in 2008, significant Kultuk and near cape Nizhnee Izgolv'e (http://seis-bykl.ru/modules/Seismo_ce/images/god_b/2008.jpg)

Granin N.G., Radzyminovich N.A., Granina L.Z., Blinov V.V., Gnatovskiy R.Y. Freshening of near-bottom waters in Lake Baikal triggered by the Mw6.2 Kultuk earthquake of August 2008. // Geo-Marine Letters; 2012; 32(5):453-464.

Возможные последствия землетрясения, связанные с метаном

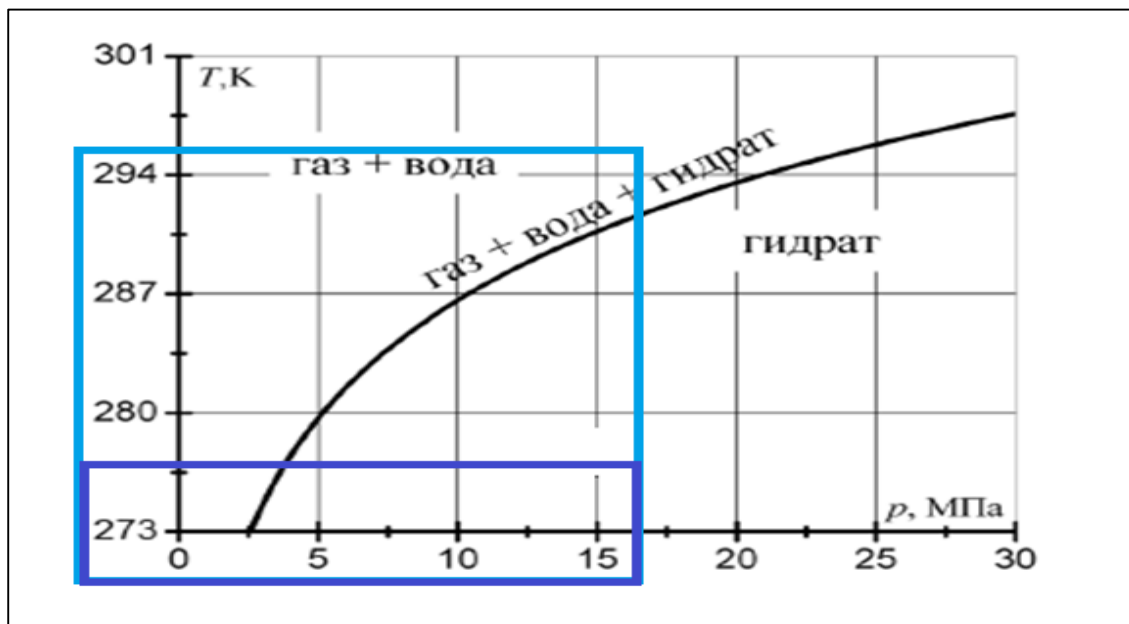
В толще вод:

- всплытие гидратов (твердых частиц, кристаллов);
- подводный выход газа;
- опреснение придонных вод из-за разложения гидратов;

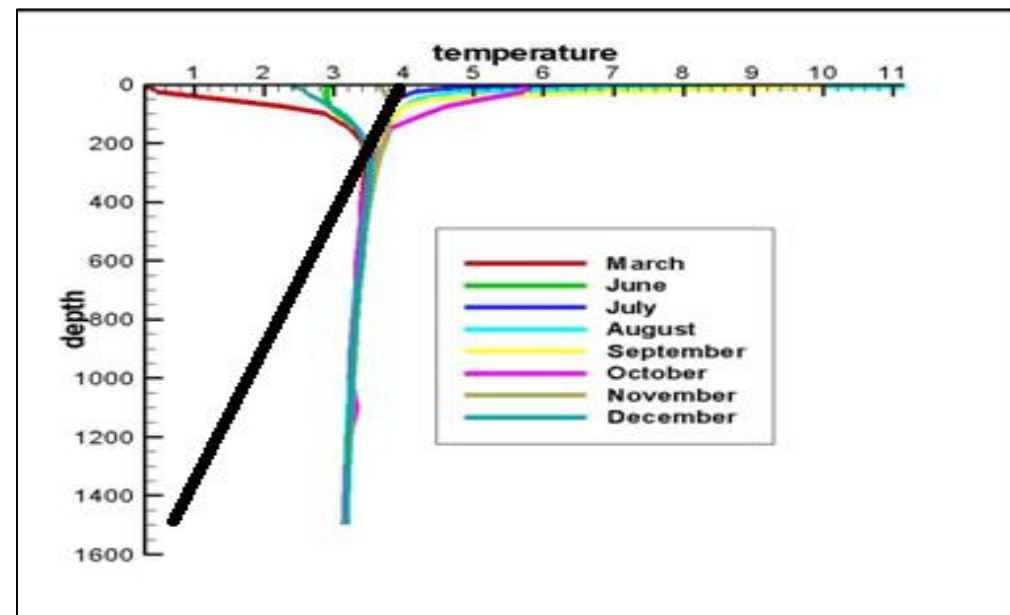
Связь с атмосферой :

- в результате разлома льда происходит массовый выход накопившегося подо льдом метана в атмосферу, в то время как в обычных условиях выход газа происходит весной постепенно, по мере таяния и нарушения сплошности льда.

Условия существования метана в Байкале. Среднемесячная температура



Фазовая диаграмма
системы метан-вода



Распределение температуры
по глубине

Принципы построения моделей

- Применяются теория и методы механики сплошной среды
- Вводится понятие многоскоростного континуума, согласно которому в каждом конкретном элементе объема содержится несколько фаз, которые описываются своими параметрами: приведенной плотностью (масса k -ой составляющей в единице объема) , скоростью и т.д.

$$\sum_{k=1}^2 \varepsilon_k = 1$$

$$\rho = \sum_{k=1}^2 \bar{\rho}_k \varepsilon_k = \bar{\rho}_l \varepsilon_l + \bar{\rho}_h \varepsilon_h$$

Система уравнений

$$\frac{\partial(\rho_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k)}{\partial z} = S_k, \quad k = l, h$$

$$\frac{\partial(\rho_k u_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k u_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k u_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k u_k)}{\partial z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial x} \pm F_x + F_x^c + \rho_k D_x(u_k)$$

$$\frac{\partial(\rho_k v_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k v_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k v_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k v_k)}{\partial z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial y} \pm F_y + F_y^c + \rho_k D_y(v_k)$$

$$\frac{\partial(\rho_k w_k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho_k u_k w_k)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho_k v_k w_k)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho_k w_k w_k)}{\partial z} = -\varepsilon_k \frac{\partial p}{\partial z} + \rho_k g \pm F_z + F_z^c + \rho_k D_z(w_k)$$

$$\rho_k = \bar{\rho}_k \varepsilon_k$$

Термодинамика системы

$$\rho \hat{c}_p \frac{dT}{dt} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + q_T,$$

$$\rho \hat{c}_p = \sum_{j=h,l} k_j \rho_j c_j, \quad \lambda = \sum_{j=h,l} k_j \lambda_j,$$

$$\rho = \sum_{k=1}^2 \bar{\rho}_k \varepsilon_k = \bar{\rho}_l \varepsilon_l + \bar{\rho}_h \varepsilon_h$$

$$\bar{\rho}_l = f(T, \bar{S}, p)$$

$$\bar{\rho}_h = \text{const}$$

Межфазный динамический обмен

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}^f + \mathbf{F}^a + \mathbf{F}^u$$

Сила трения

$$\mathbf{F}^f = -\varepsilon_h C_f \bar{\rho}_l (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l); \quad \mathbf{F}^f = -\varepsilon_h \tilde{C}_f \bar{\rho}_l |(\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l)| (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l)$$

Добавленная массовая сила

$$\mathbf{F}^a = -\varepsilon_h C_a \bar{\rho}_l \frac{d(\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l)}{dt}$$

Подъемная сила или сила Магнуса

$$\mathbf{F}^u = -\varepsilon_h C_u \bar{\rho}_l (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l) \times (\nabla \times \mathbf{u}_l)$$

Расчет добавленной массовой силы

$$\mathbf{F}^a = -\varepsilon_h C_a \rho_l \frac{d(\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l)}{dt} = -\varepsilon_h C_a \rho_l \left(\frac{d\mathbf{u}_h}{dt} - \frac{d\mathbf{u}_l}{dt} \right) =$$

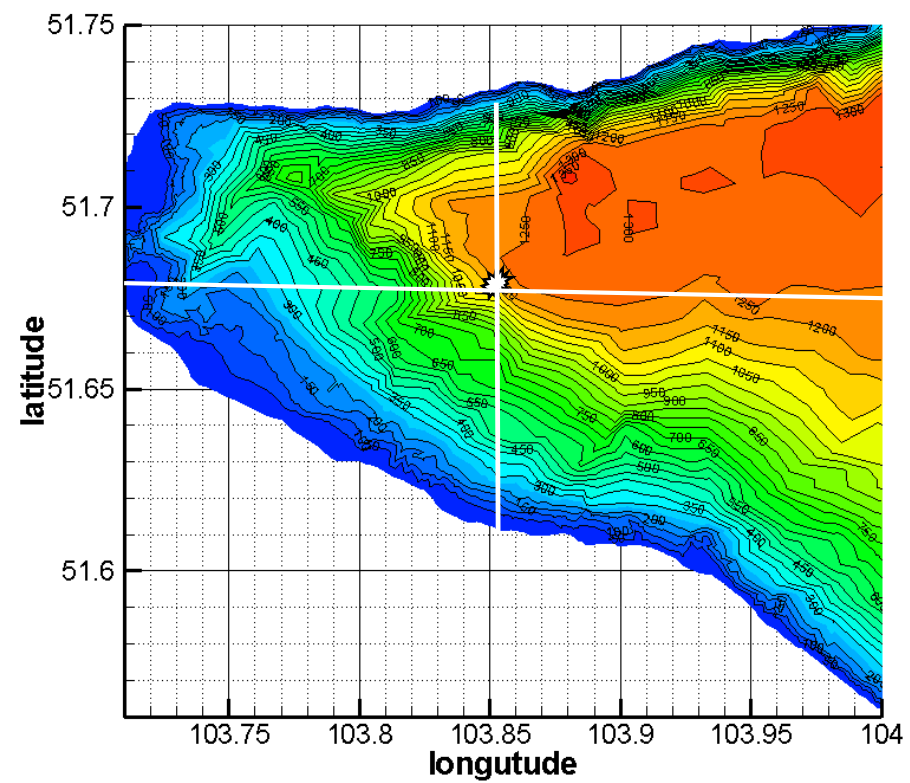
$$-\varepsilon_h C_a \rho_l \begin{pmatrix} \frac{\partial u_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial u_h}{\partial x} + v_h \frac{\partial u_h}{\partial y} + w_h \frac{\partial u_h}{\partial z} - \left(\frac{\partial u_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial u_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial u_l}{\partial y} + w_l \frac{\partial u_l}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial v_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial v_h}{\partial x} + v_h \frac{\partial v_h}{\partial y} + w_h \frac{\partial v_h}{\partial z} - \left(\frac{\partial v_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial v_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial v_l}{\partial y} + w_l \frac{\partial v_l}{\partial z} \right) \\ \frac{\partial w_h}{\partial t} + u_h \frac{\partial w_h}{\partial x} + v_h \frac{\partial w_h}{\partial y} + w_h \frac{\partial w_h}{\partial z} - \left(\frac{\partial w_l}{\partial t} + u_l \frac{\partial w_l}{\partial x} + v_l \frac{\partial w_l}{\partial y} + w_l \frac{\partial w_l}{\partial z} \right) \end{pmatrix}$$

Расчет подъемной силы

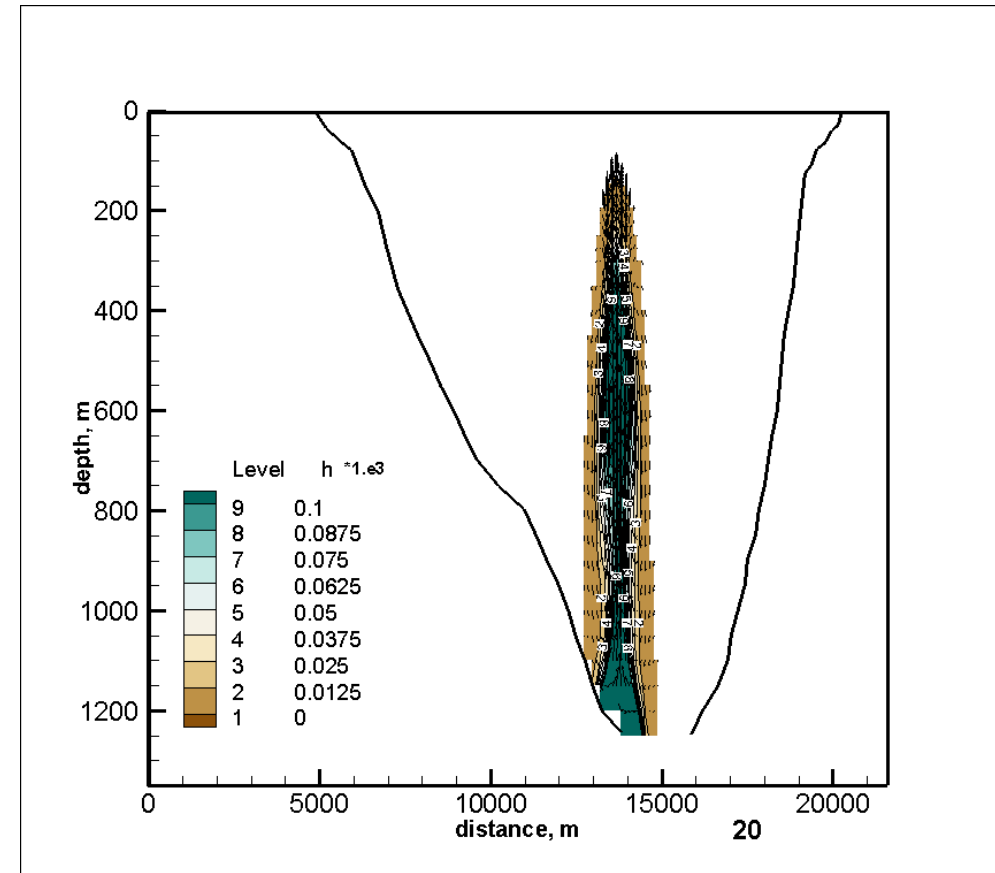
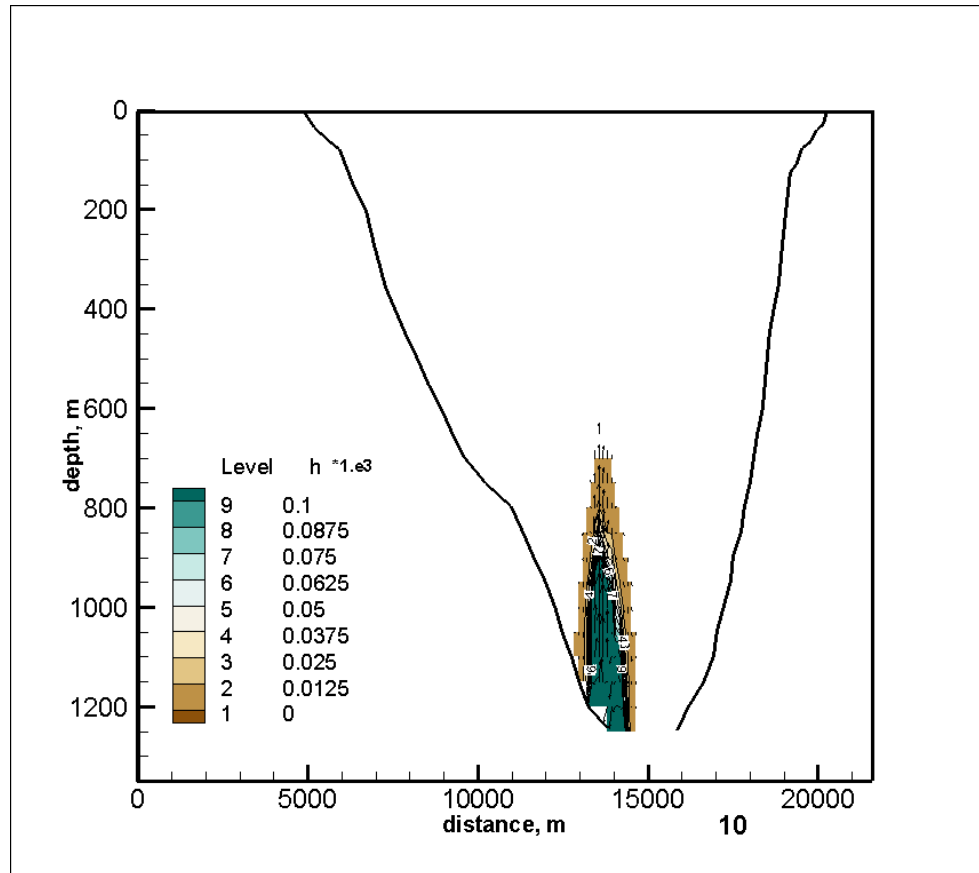
$$\mathbf{F}^u = -\varepsilon_h C_u \rho_l (\mathbf{u}_h - \mathbf{u}_l) \times (\nabla \times \mathbf{u}_l)$$

$$\mathbf{F}^u = -\varepsilon_h C_u \rho_l \begin{pmatrix} (v_h - v_l) \left(\frac{\partial v_l}{\partial x} - \frac{\partial u_l}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial w_l}{\partial x} - \frac{\partial u_l}{\partial z} \right) (w_h - w_l) \\ (u_h - u_l) \left(\frac{\partial v_l}{\partial x} - \frac{\partial u_l}{\partial y} \right) - \left(\frac{\partial w_l}{\partial y} - \frac{\partial v_l}{\partial z} \right) (w_h - w_l) \\ (u_h - u_l) \left(\frac{\partial w_l}{\partial x} - \frac{\partial u_l}{\partial z} \right) - \left(\frac{\partial w_l}{\partial y} - \frac{\partial v_l}{\partial z} \right) (v_h - v_l) \end{pmatrix}$$

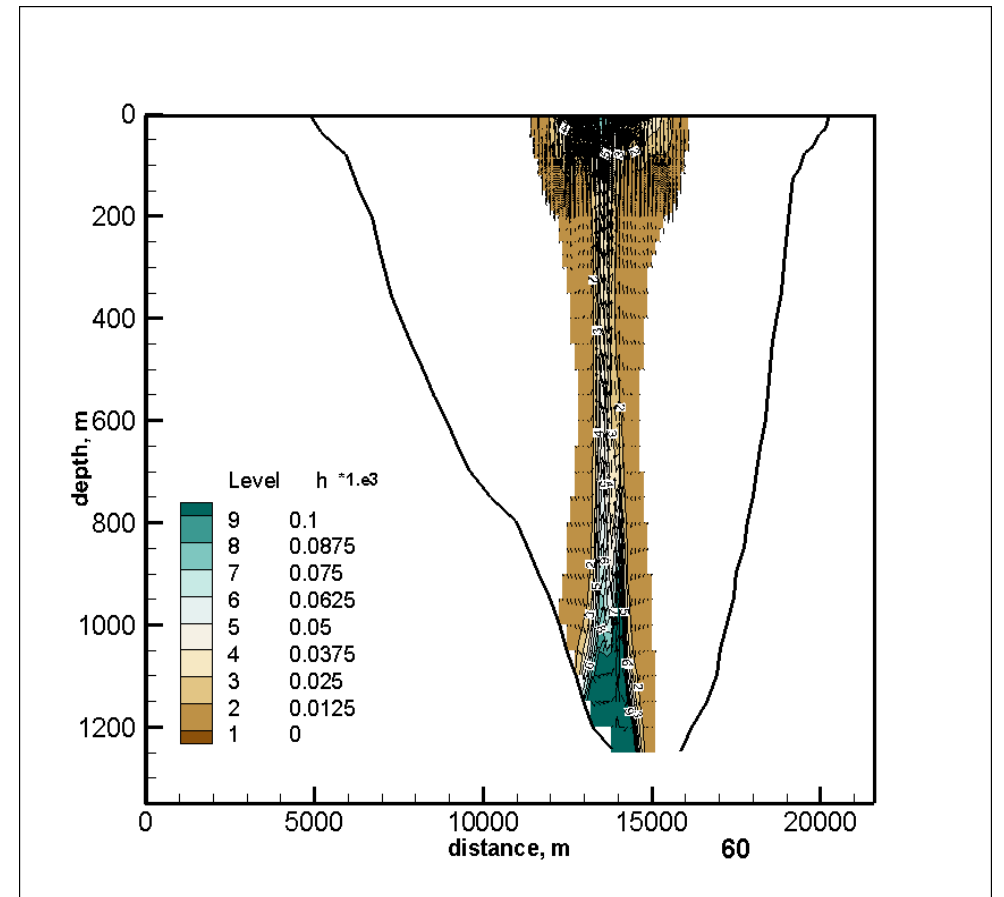
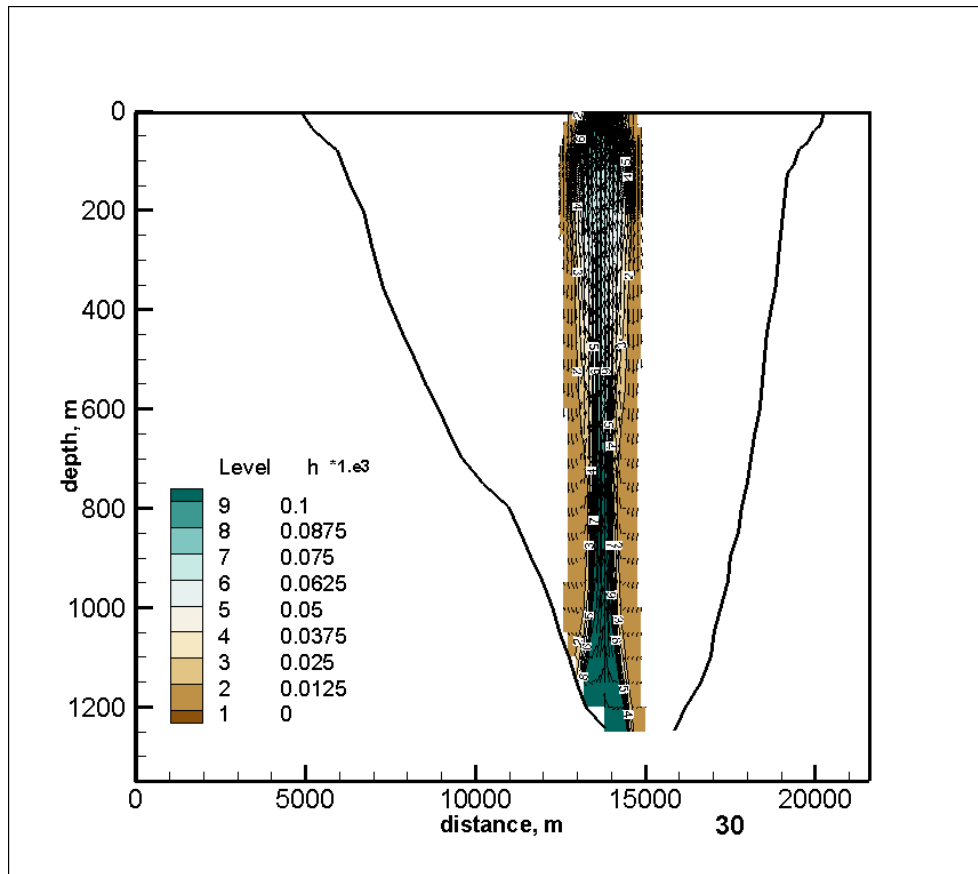
Рельеф дна



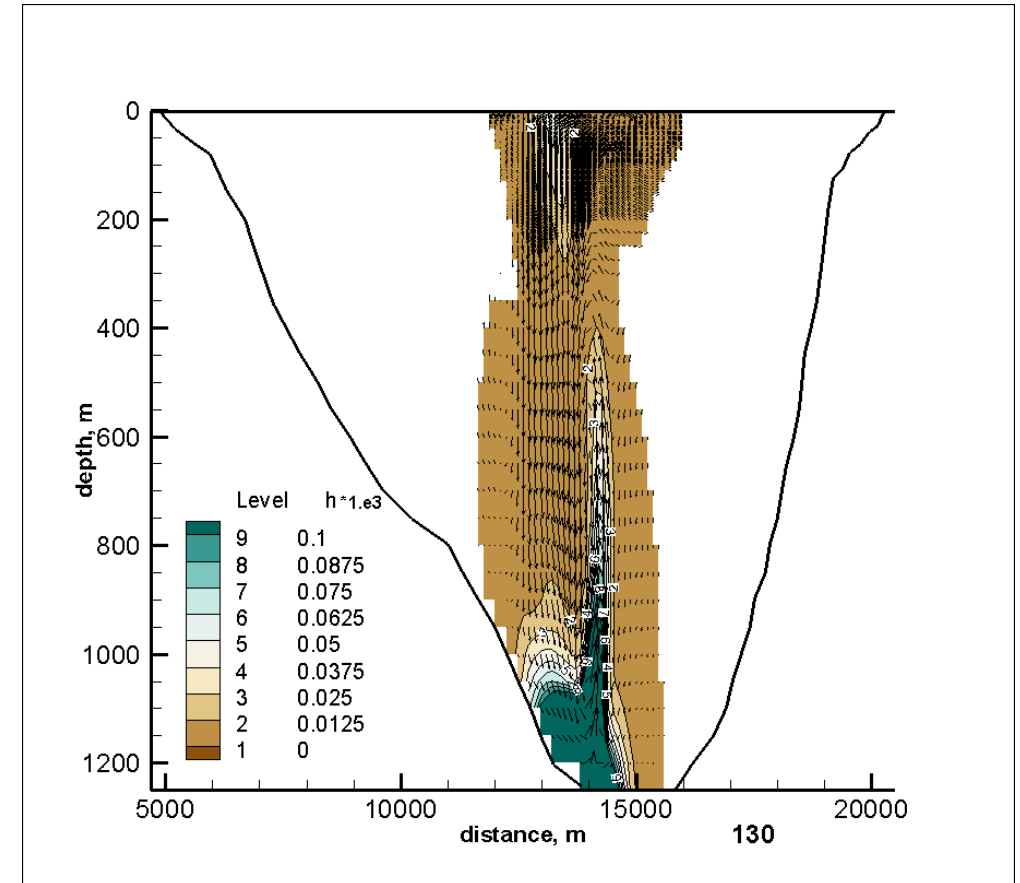
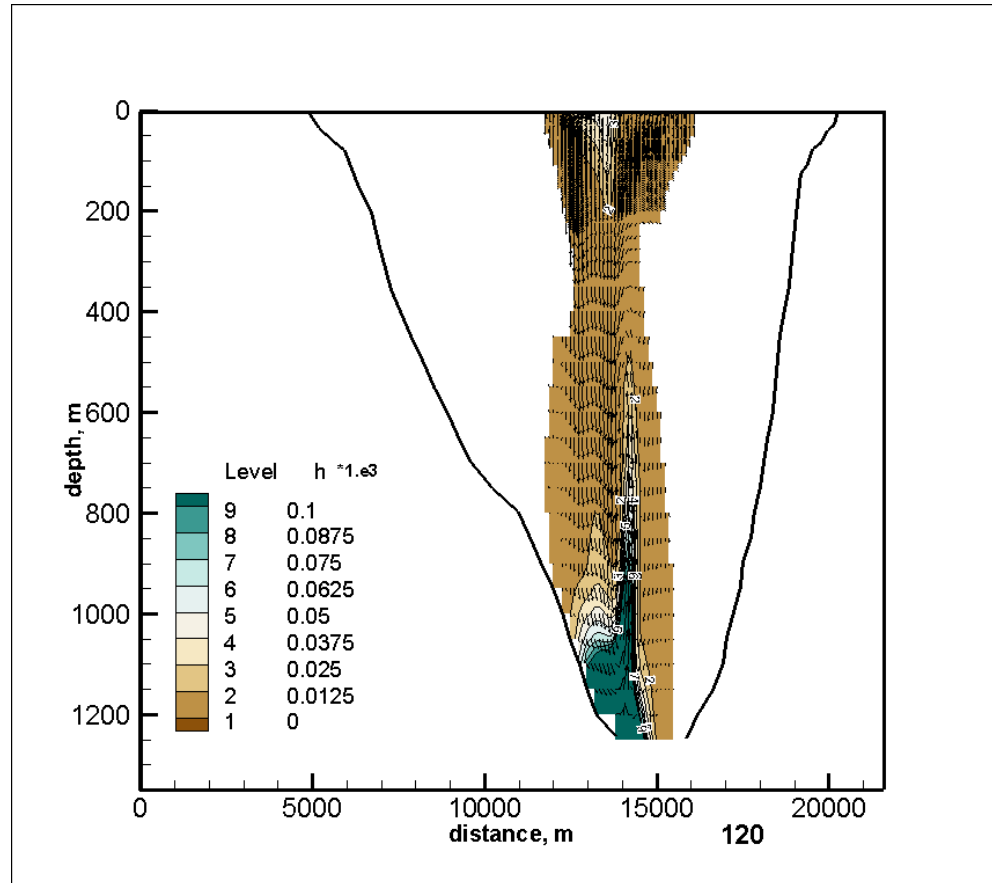
Всплытие твердой фазы



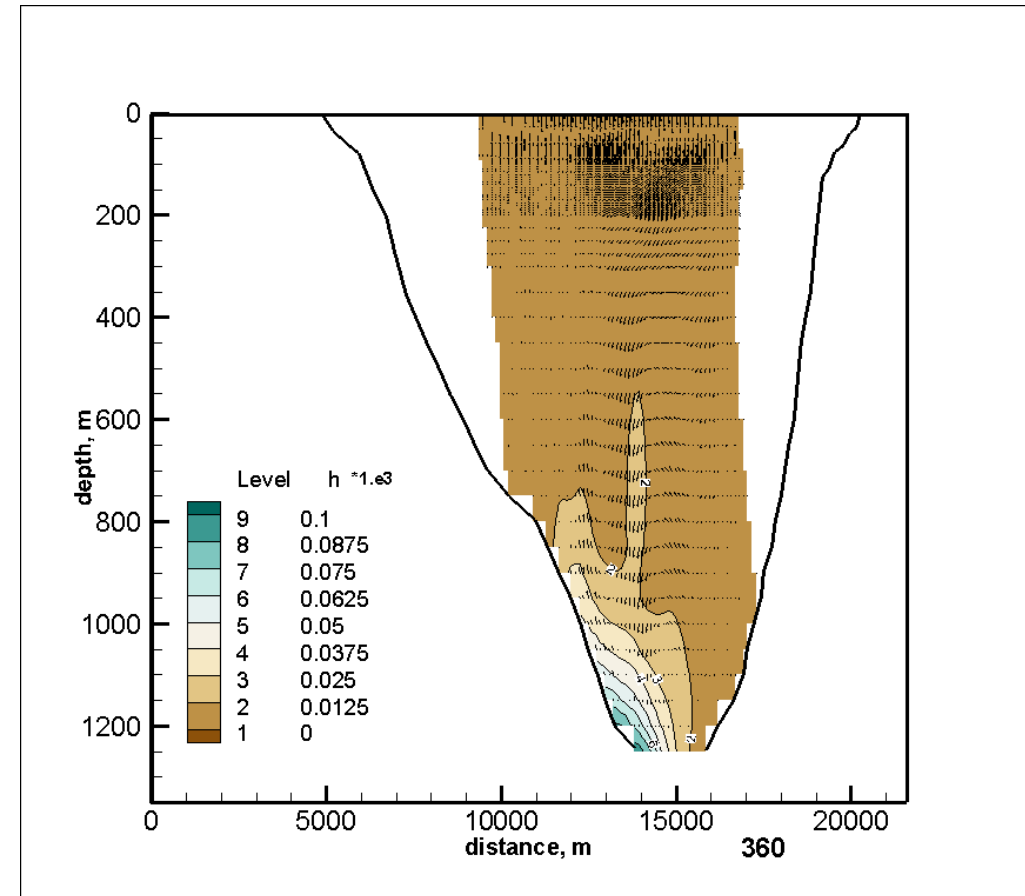
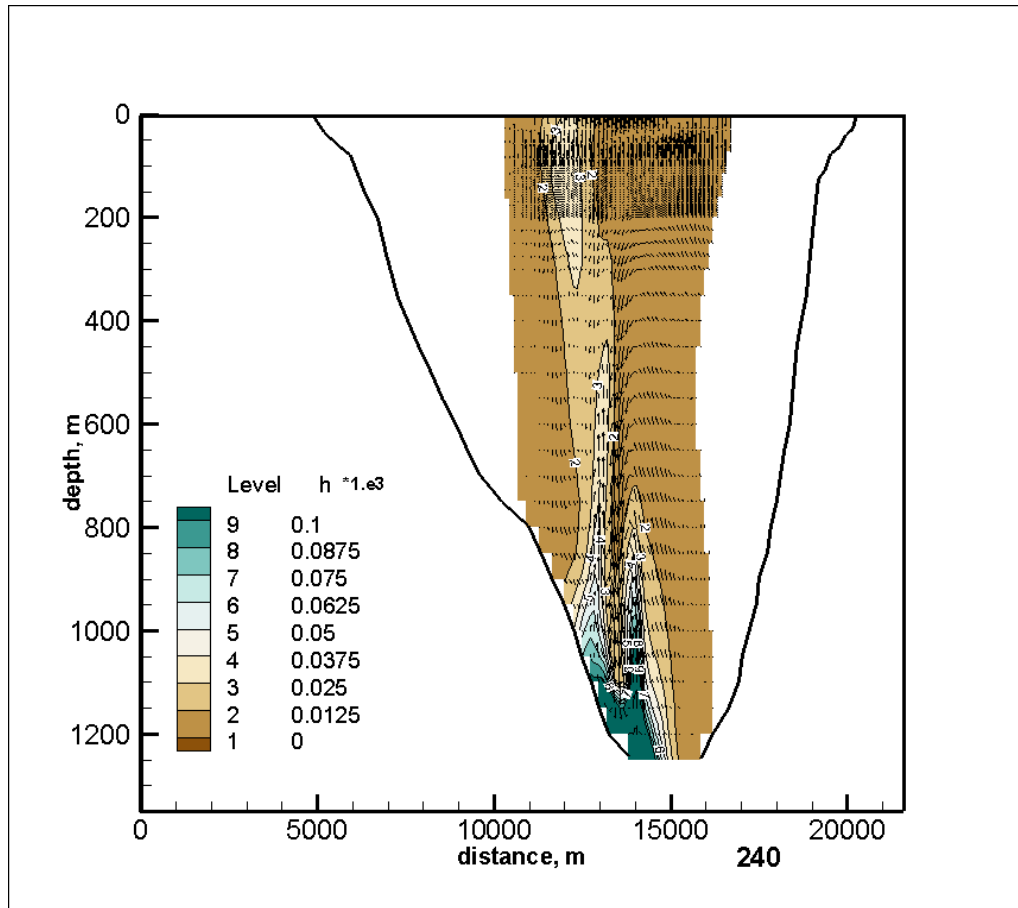
Всплытие твердой фазы



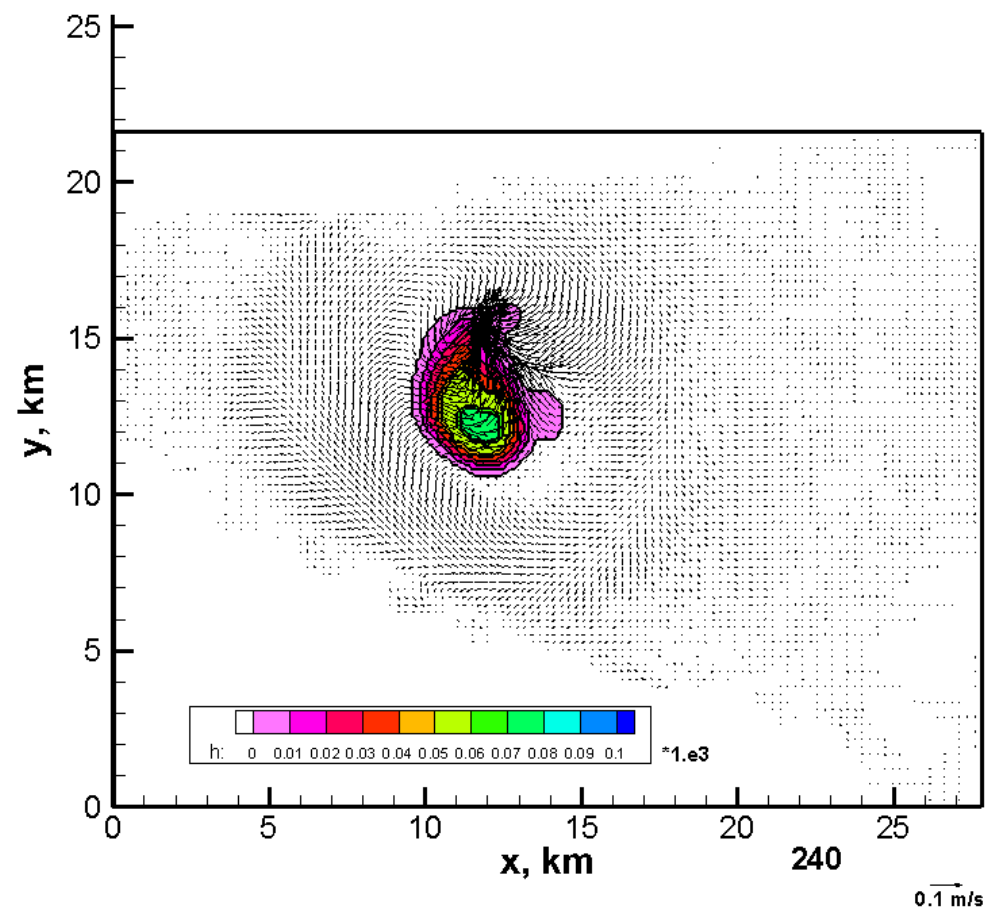
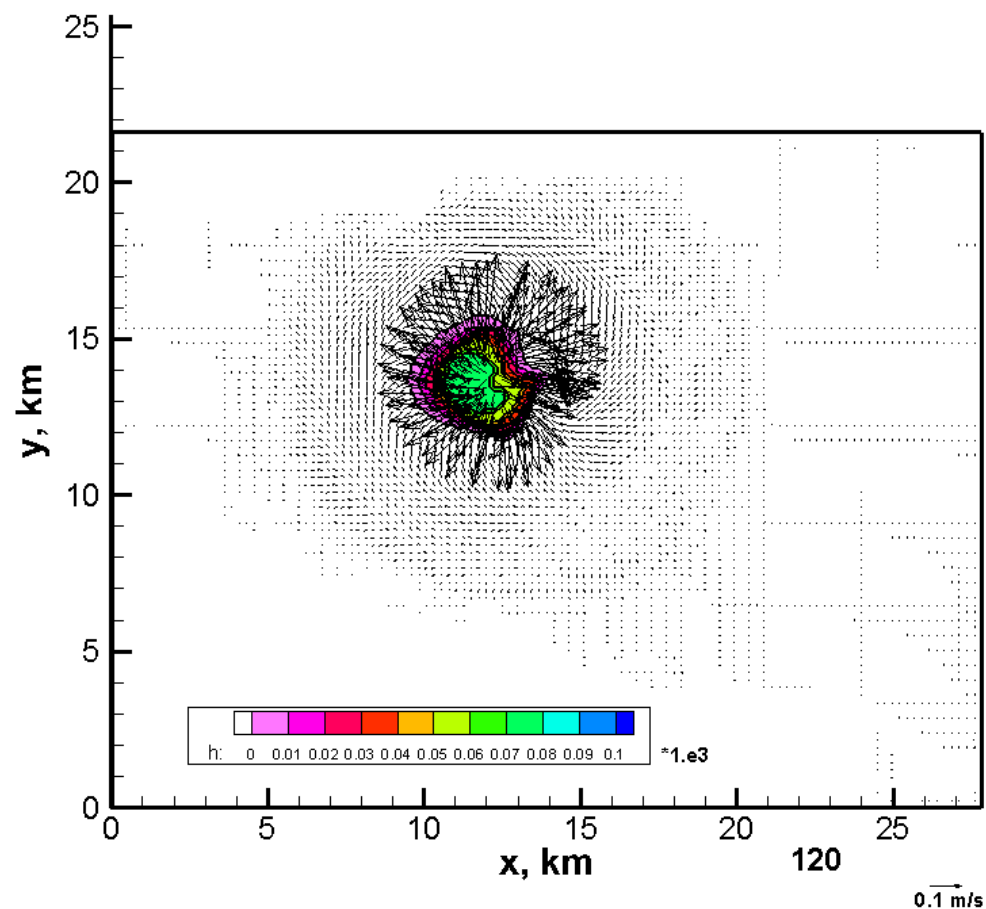
Возвратные движения твердой фазы



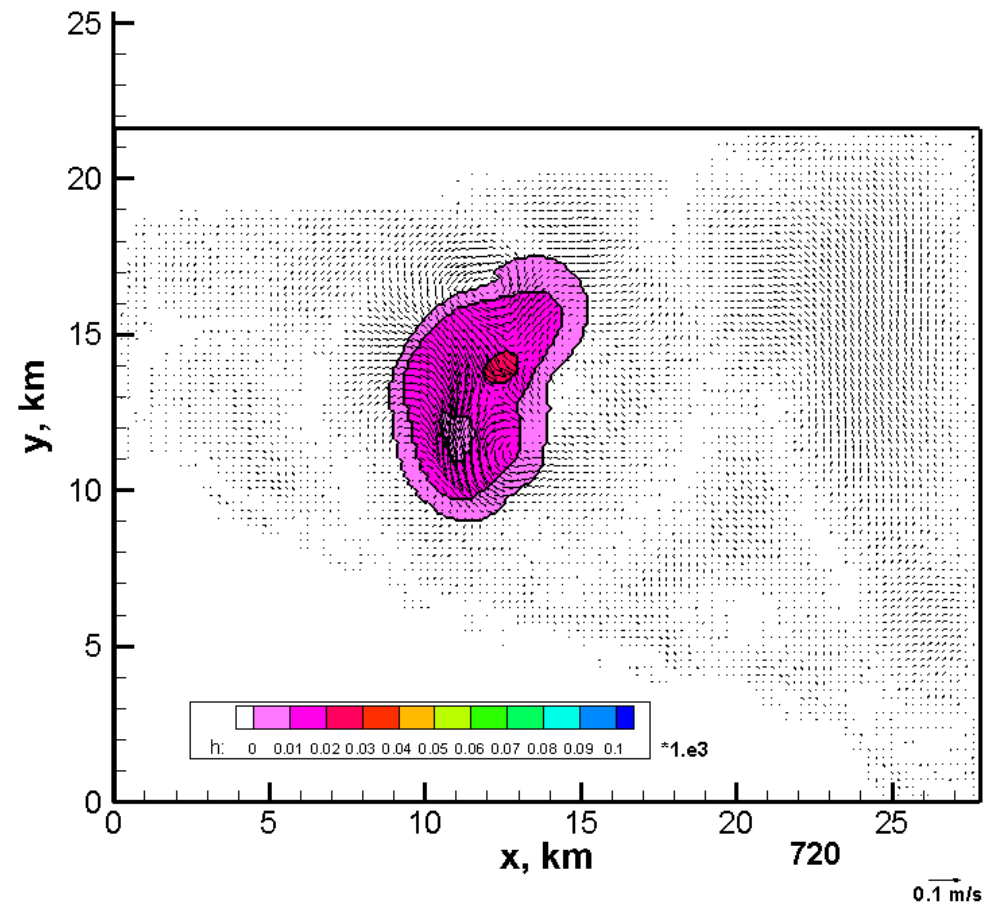
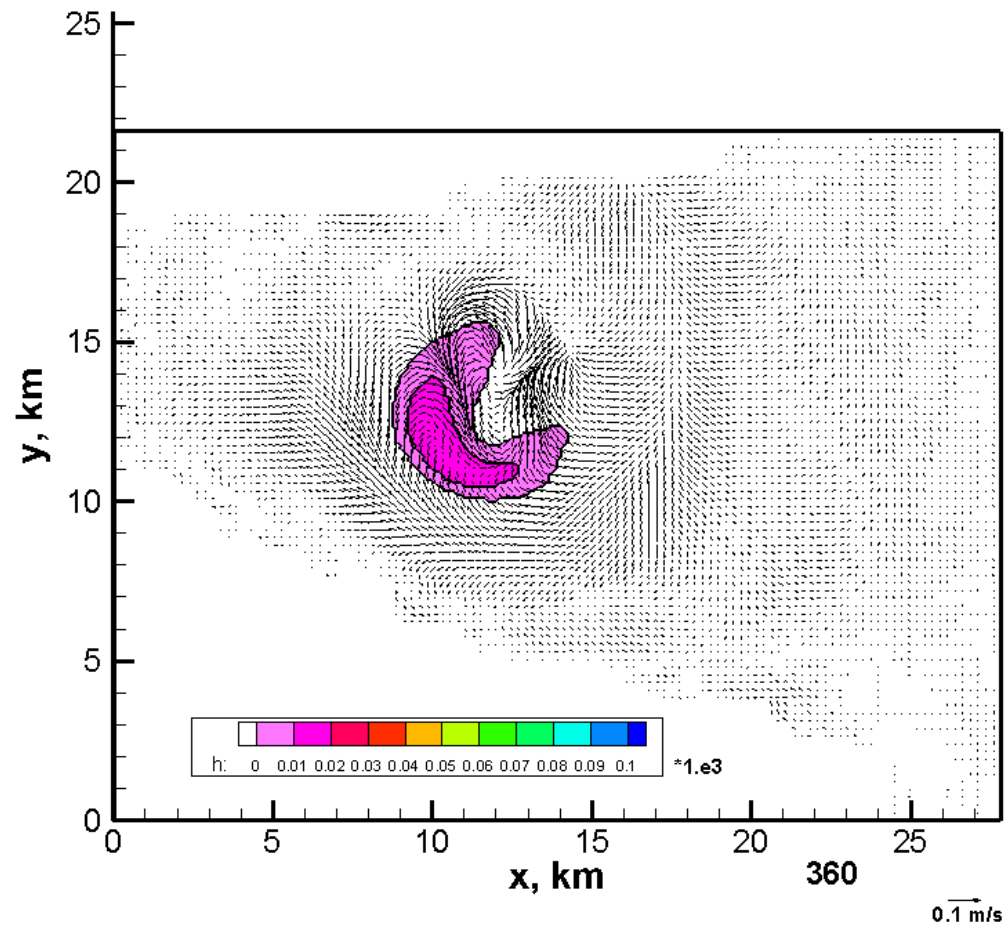
Система течений



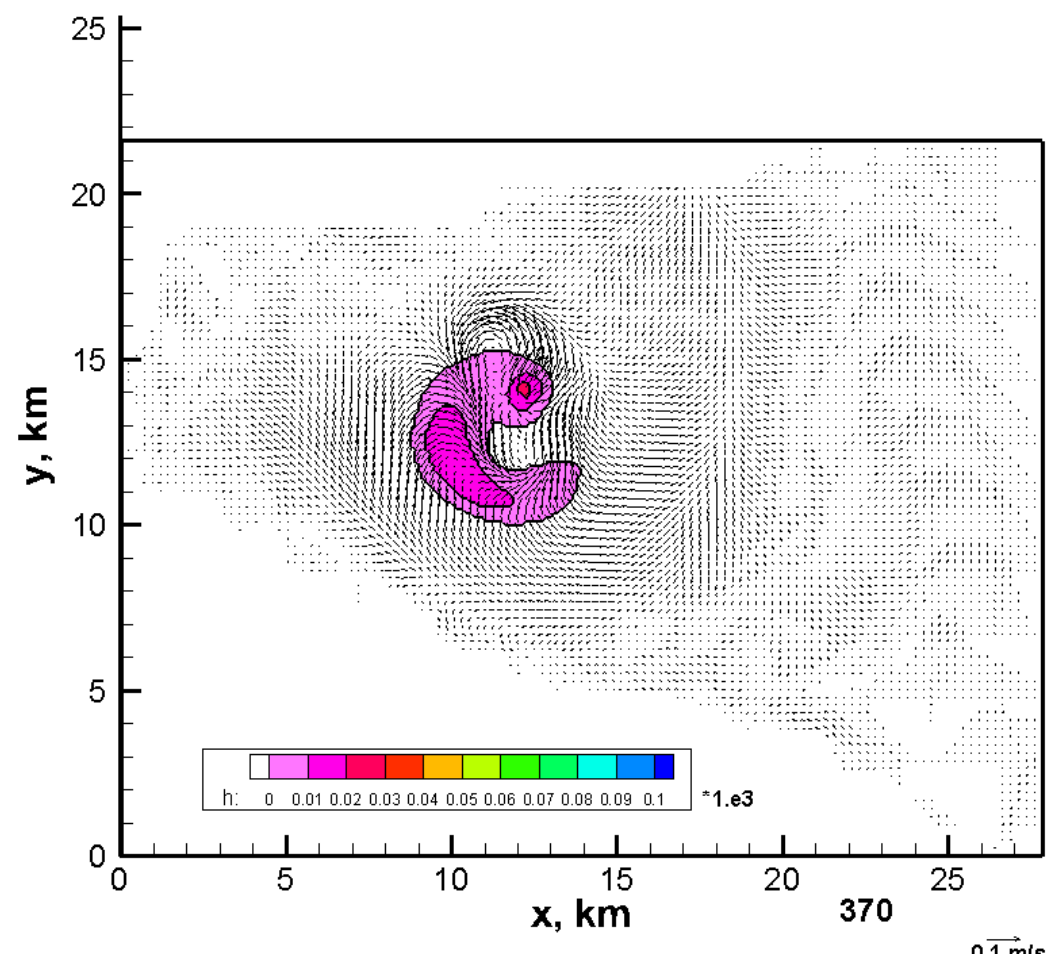
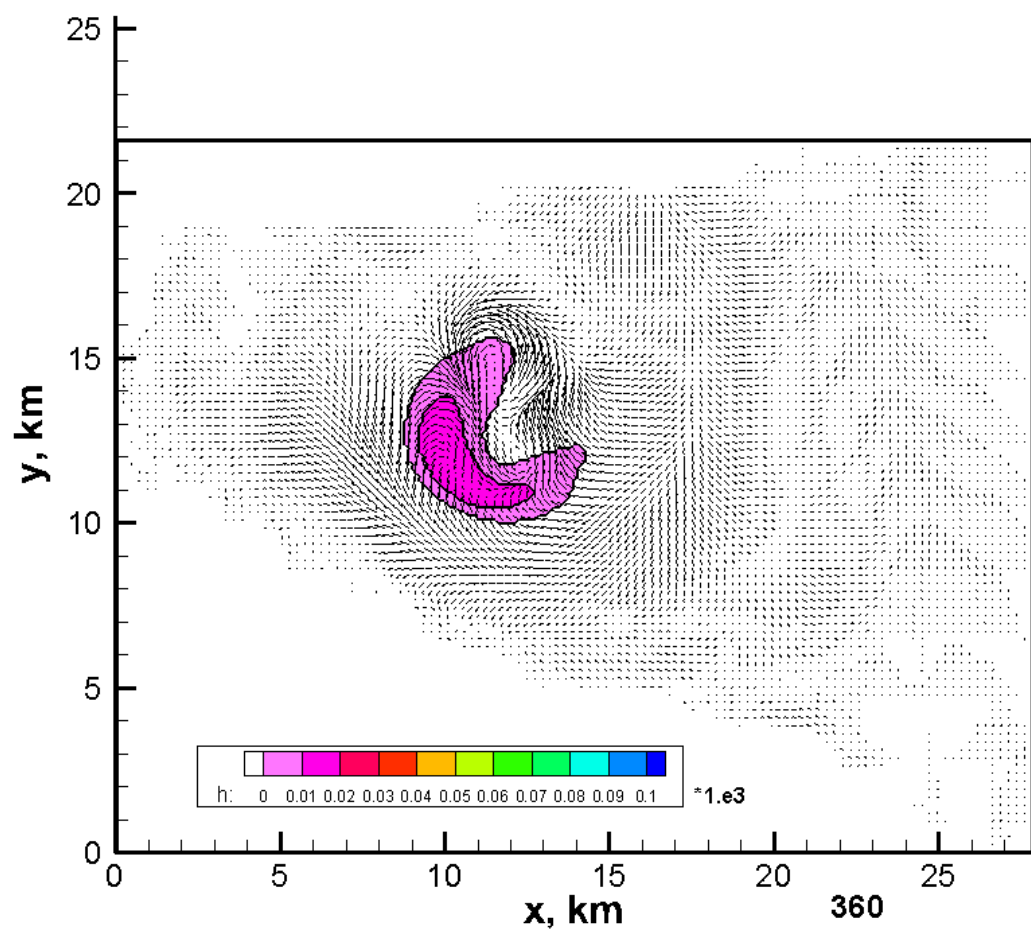
Примесь на глубине 2, 5 м



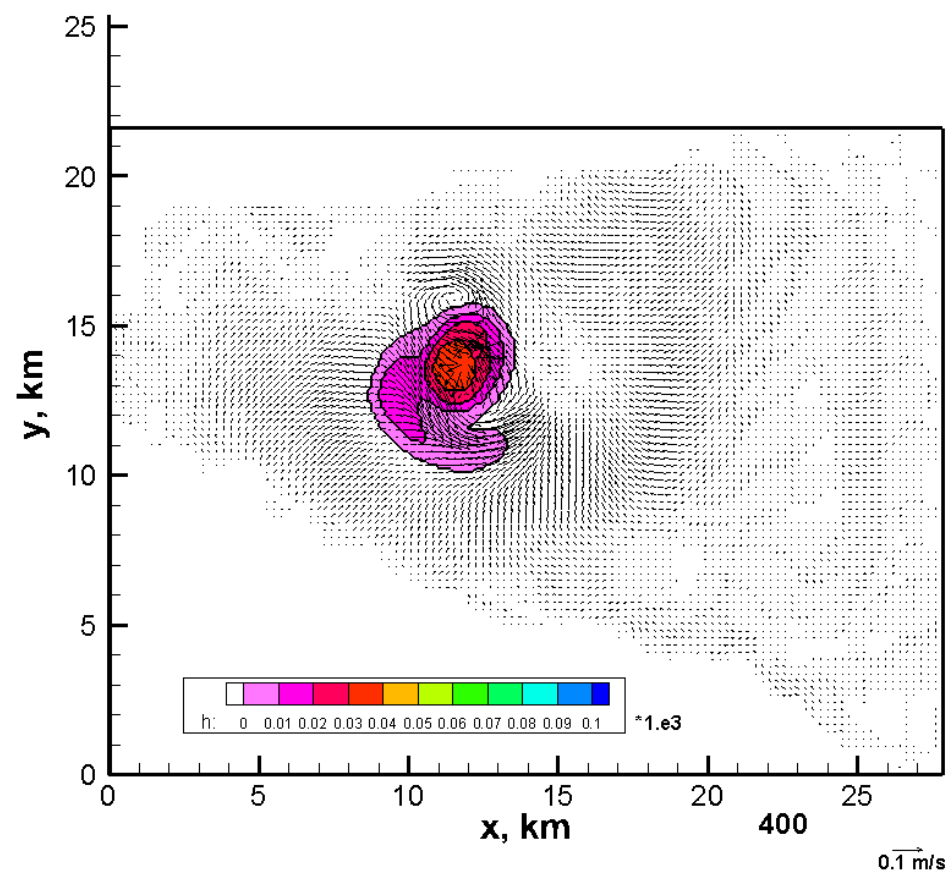
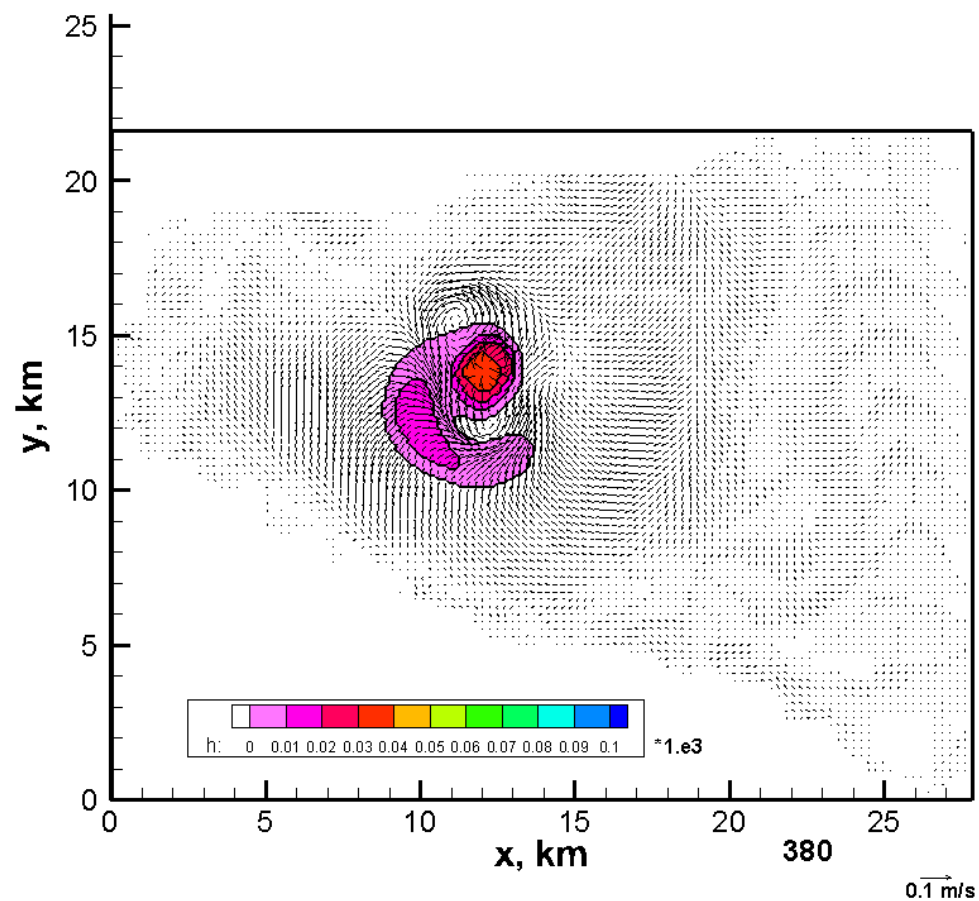
Примесь на глубине 2,5 м



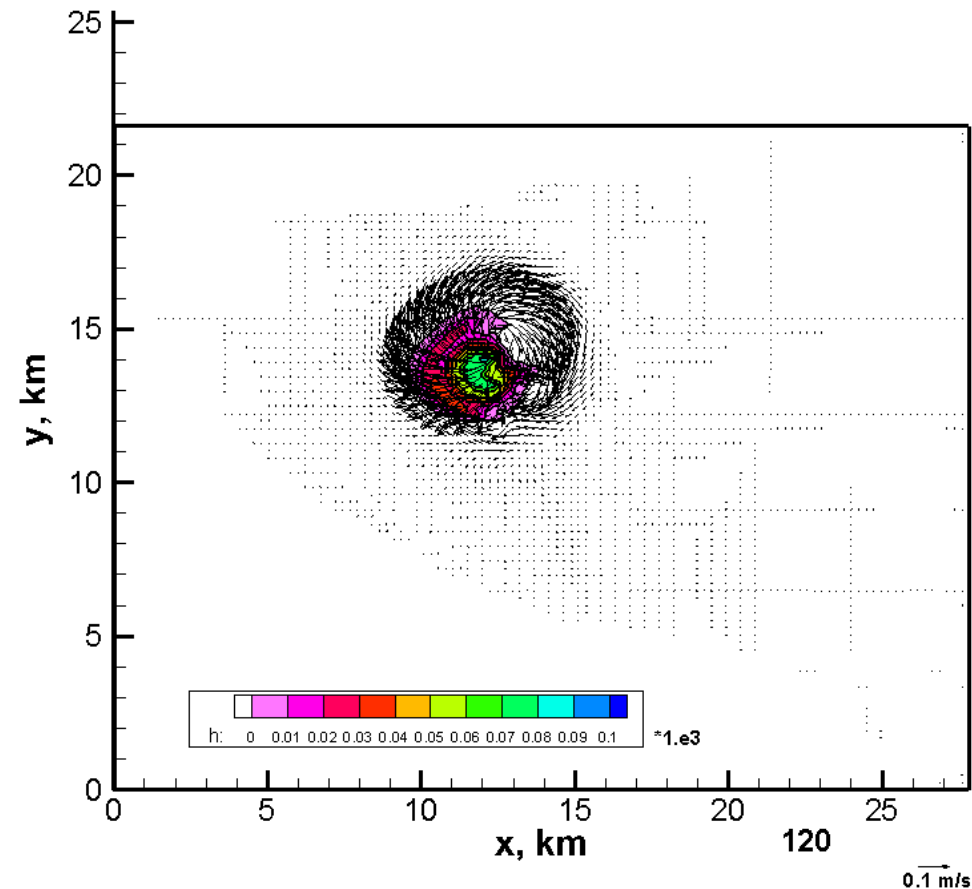
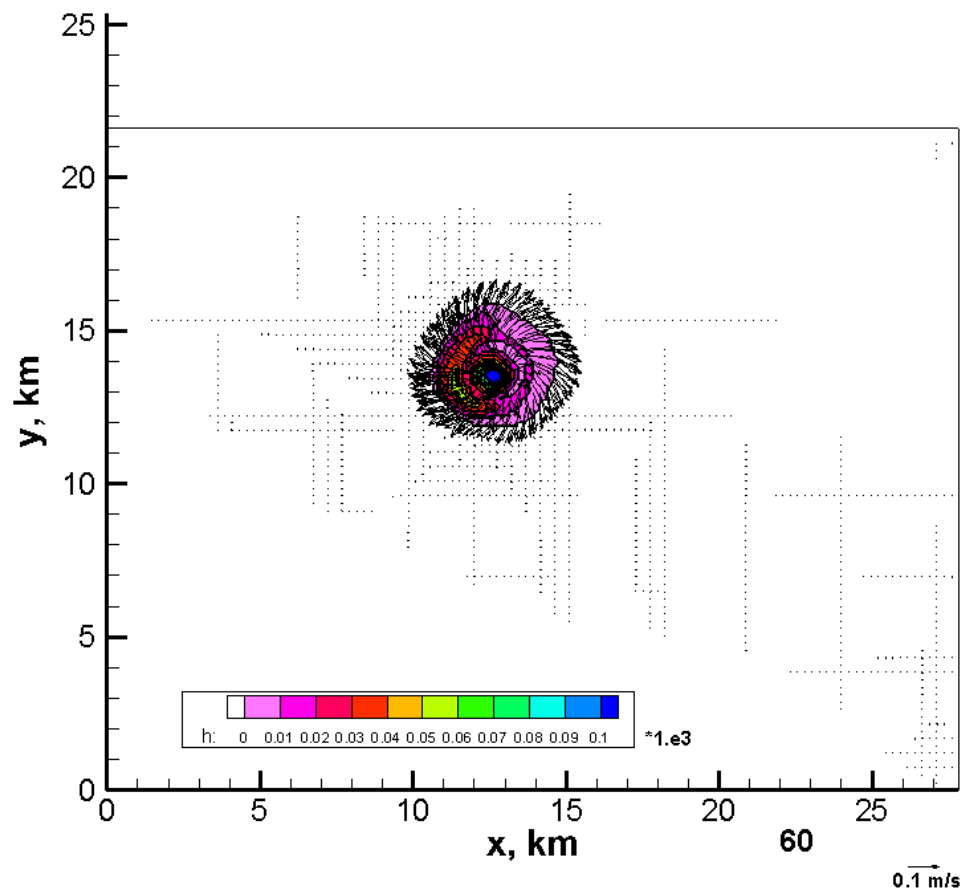
Примесь на глубине 10 м



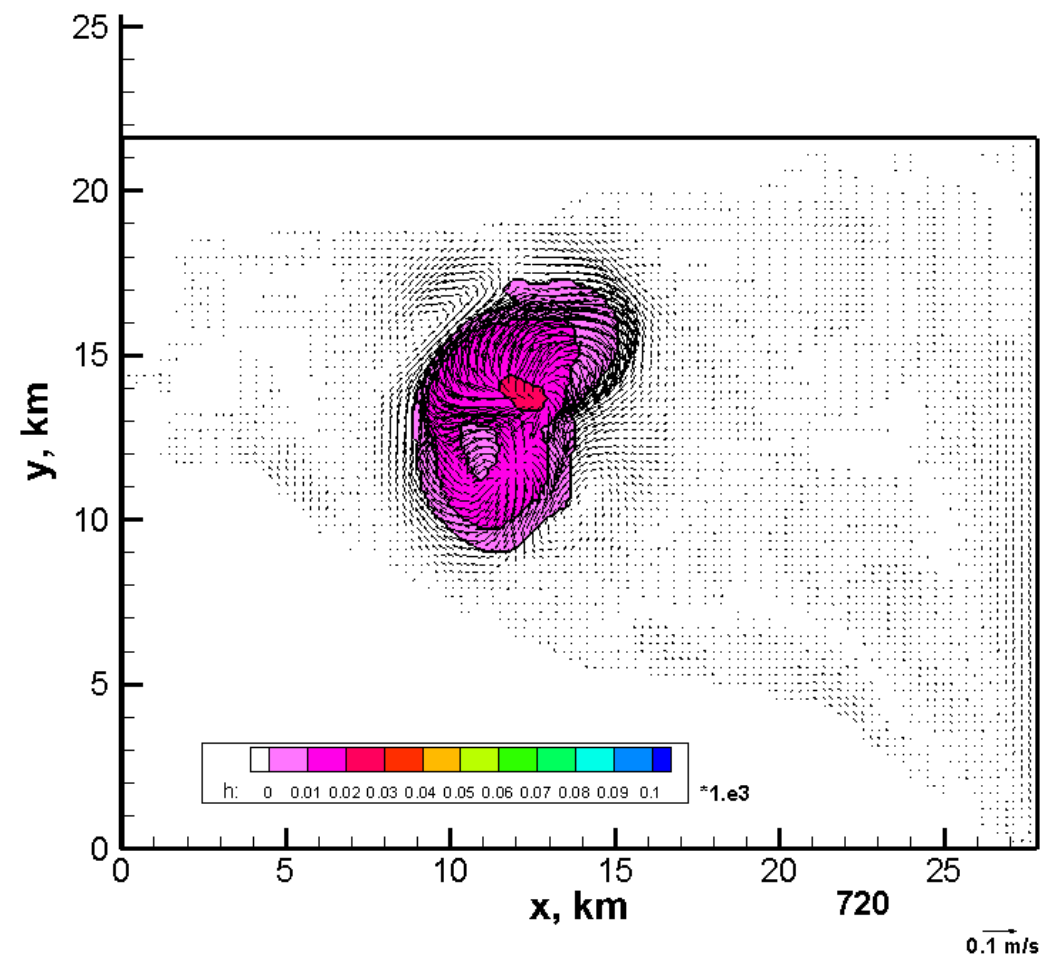
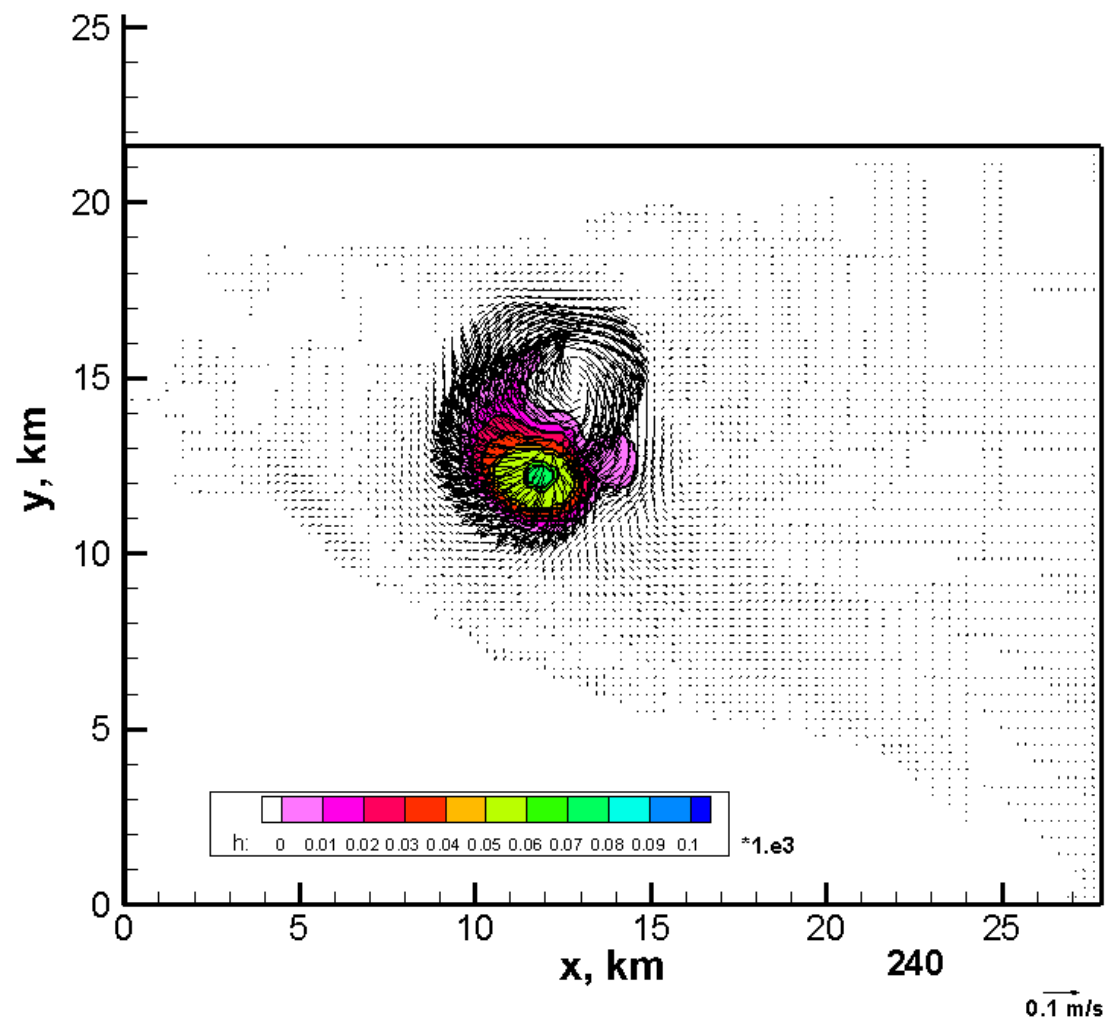
Примесь на глубине 10 м



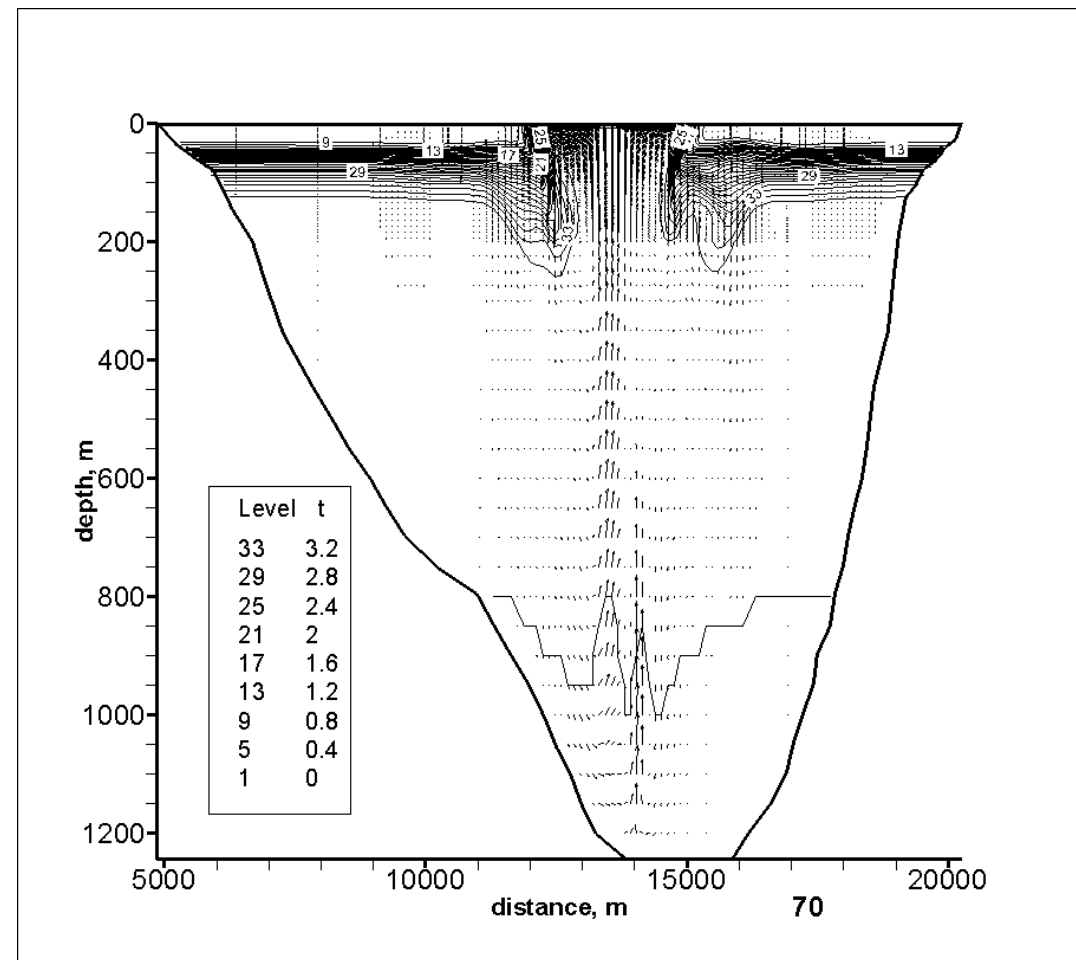
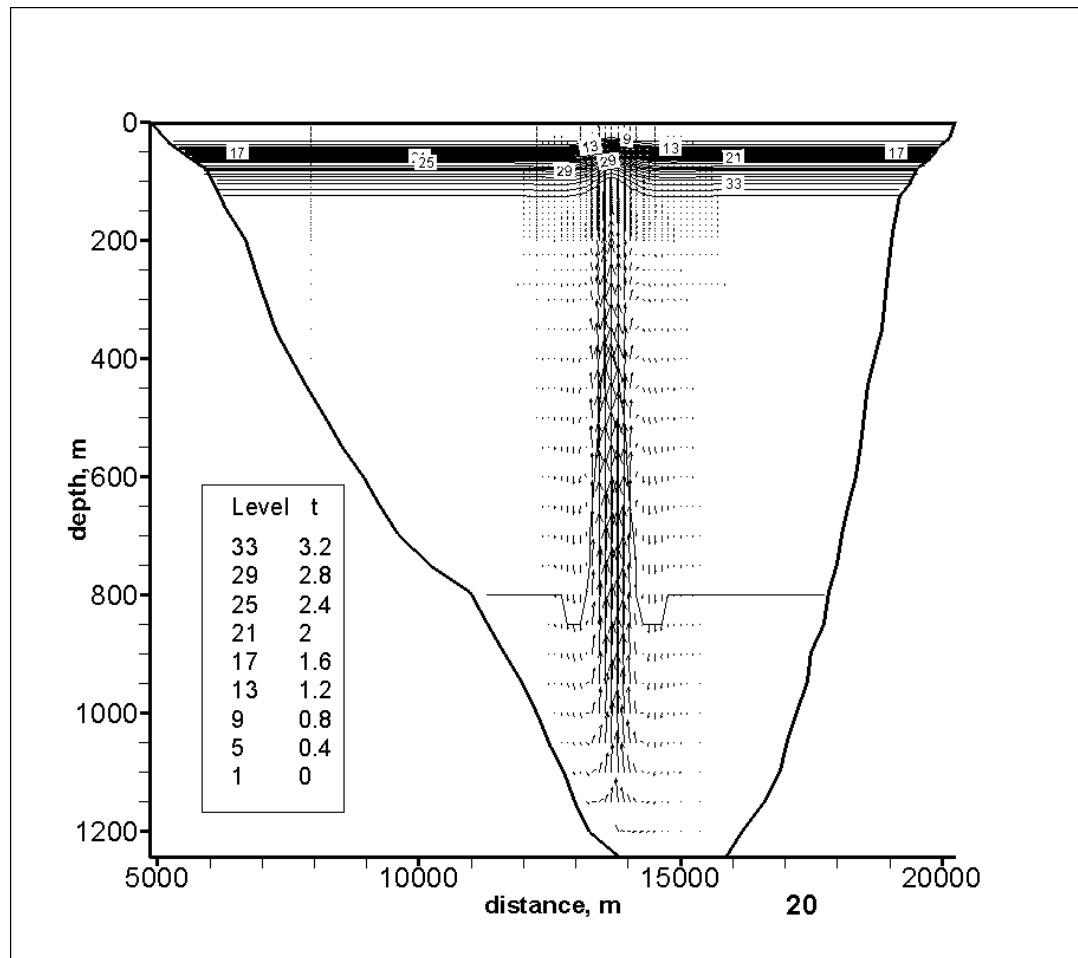
Примесь. Горизонтальное сечение на глубине 100м



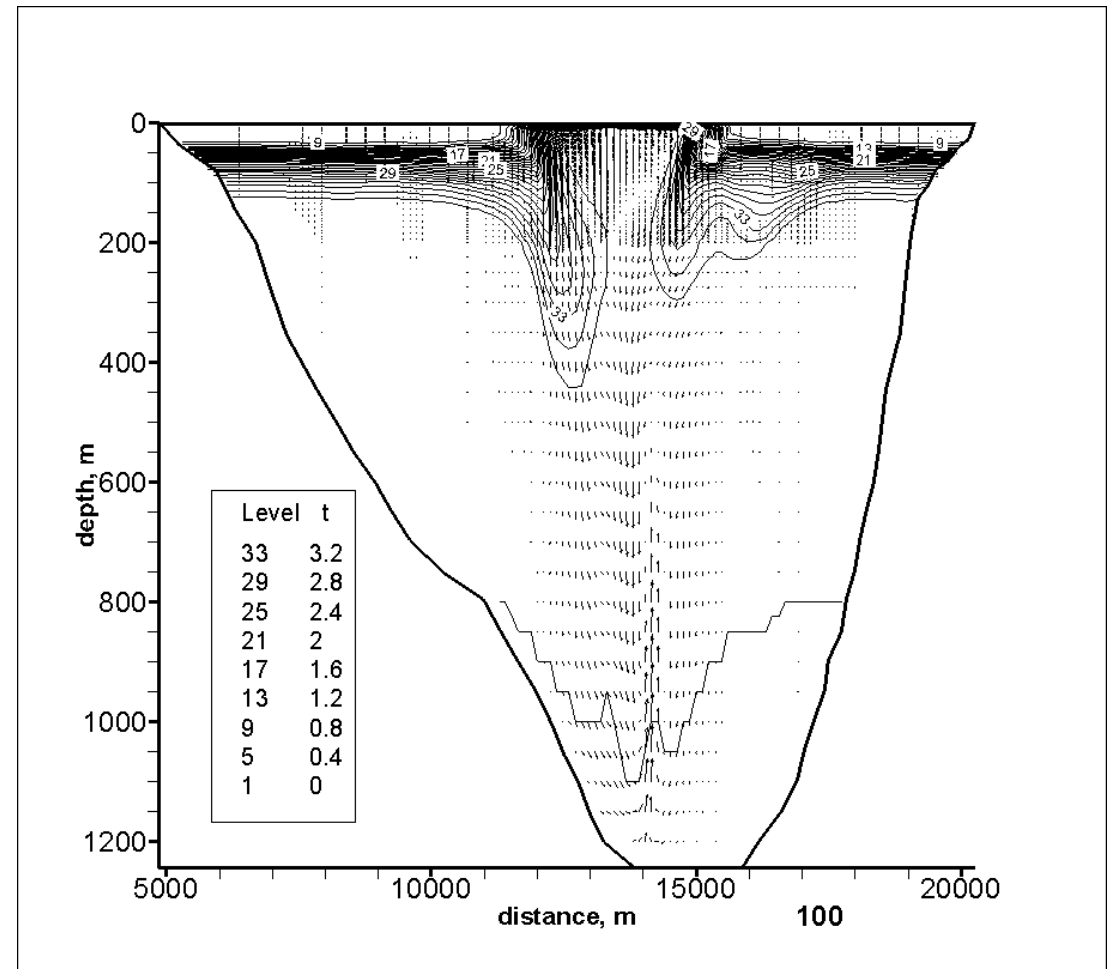
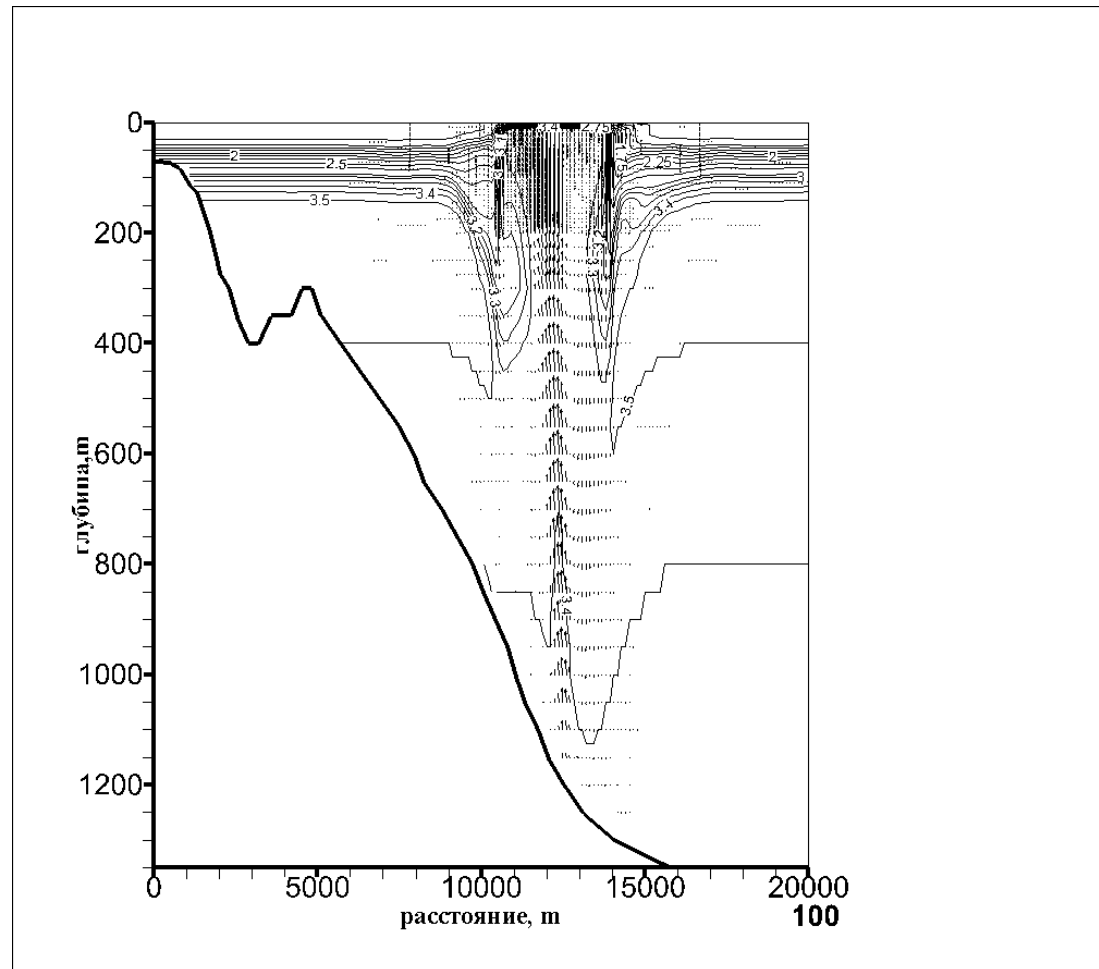
Примесь. Горизонтальное сечение на глубине 100м



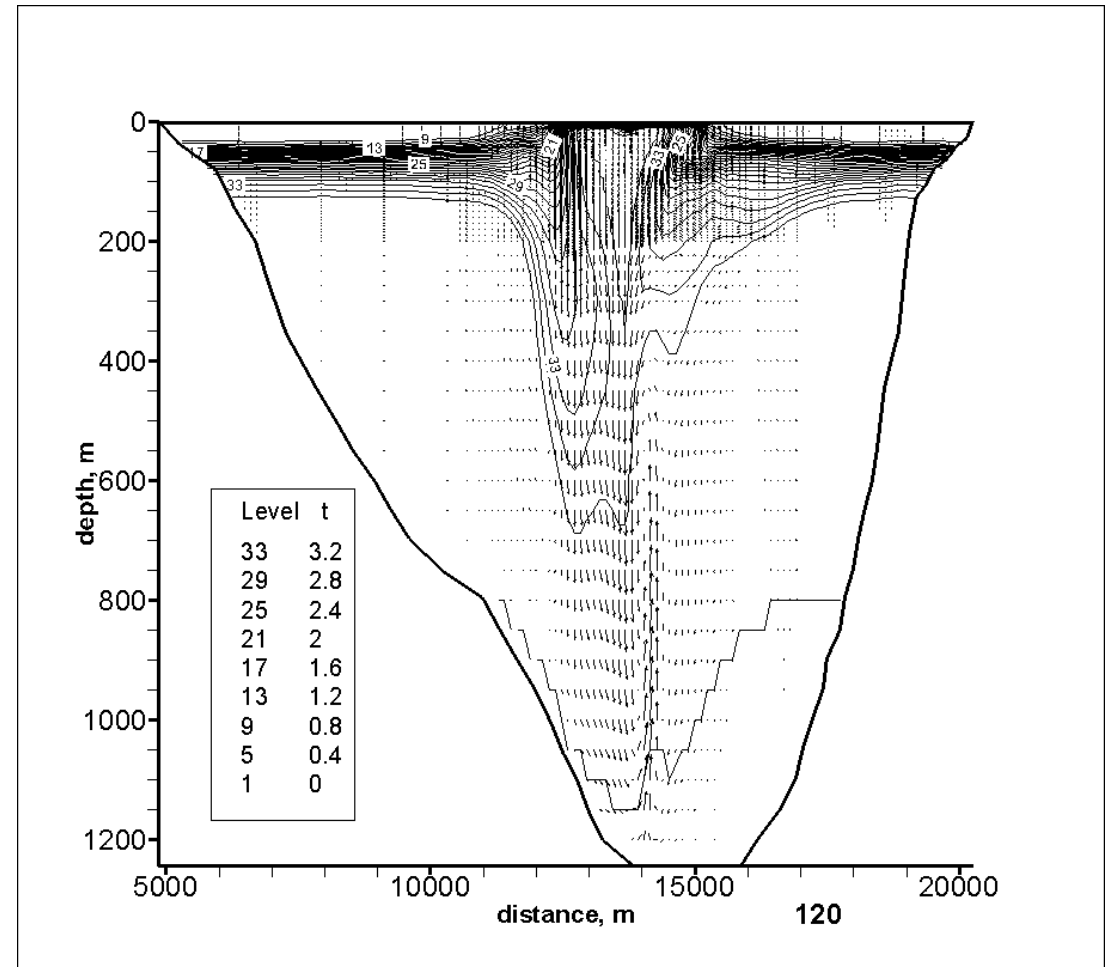
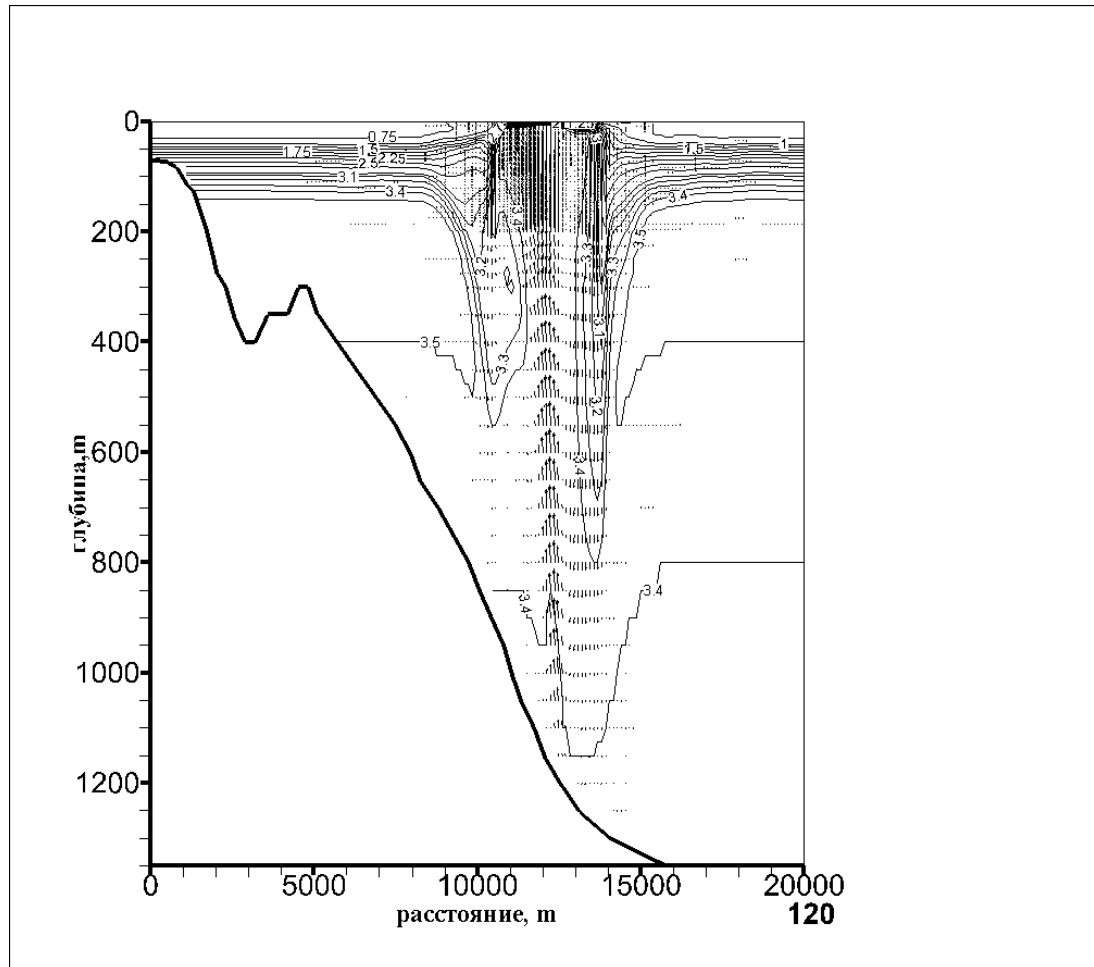
Изолинии температуры и скорости течений на поперечном сечении



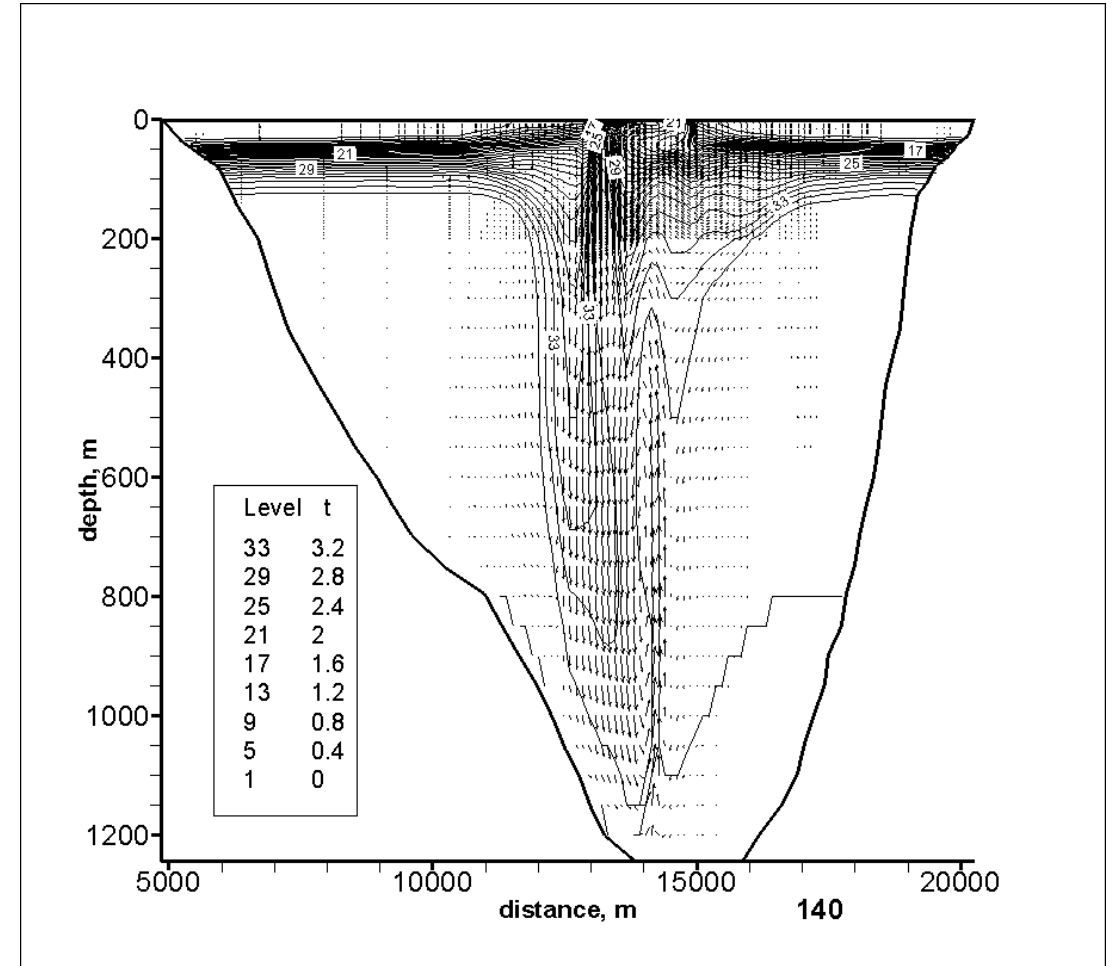
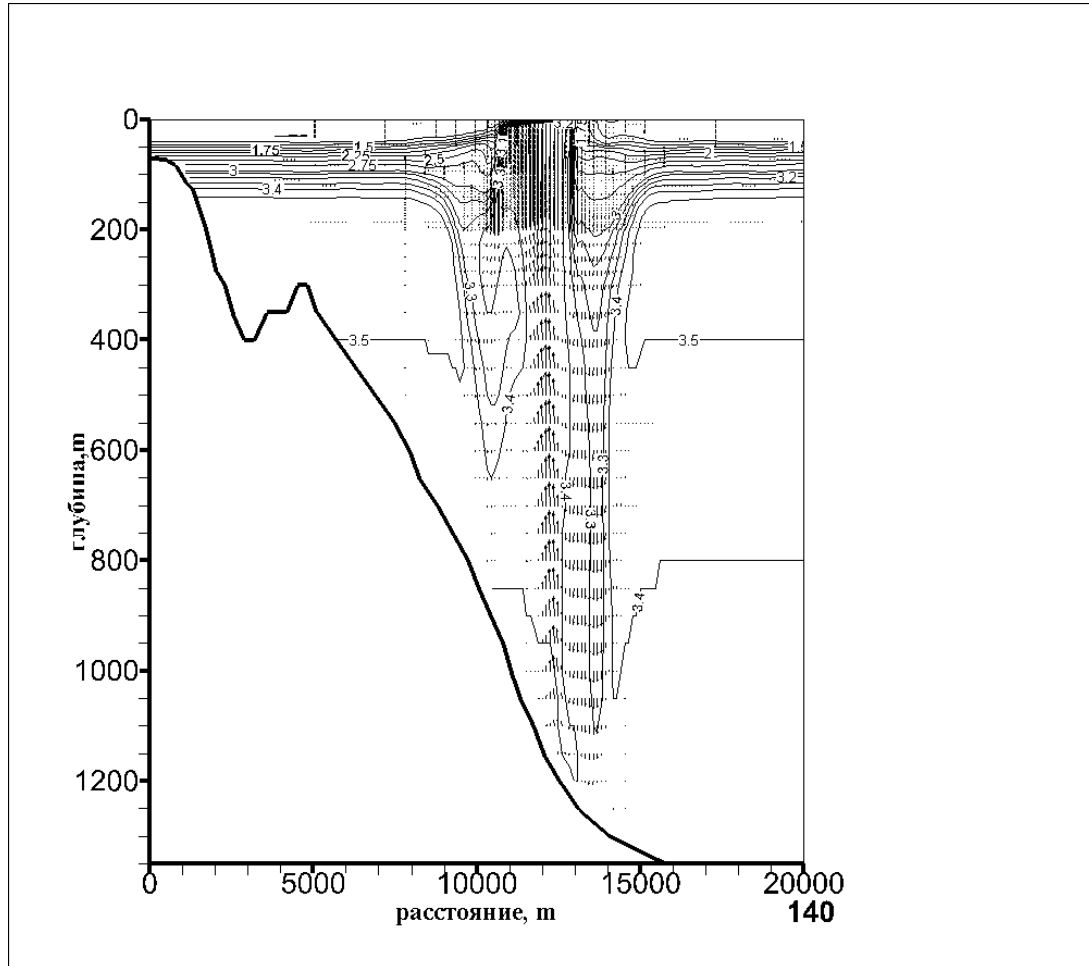
Изолинии температуры и скорости течений в продольном и поперечном сечениях



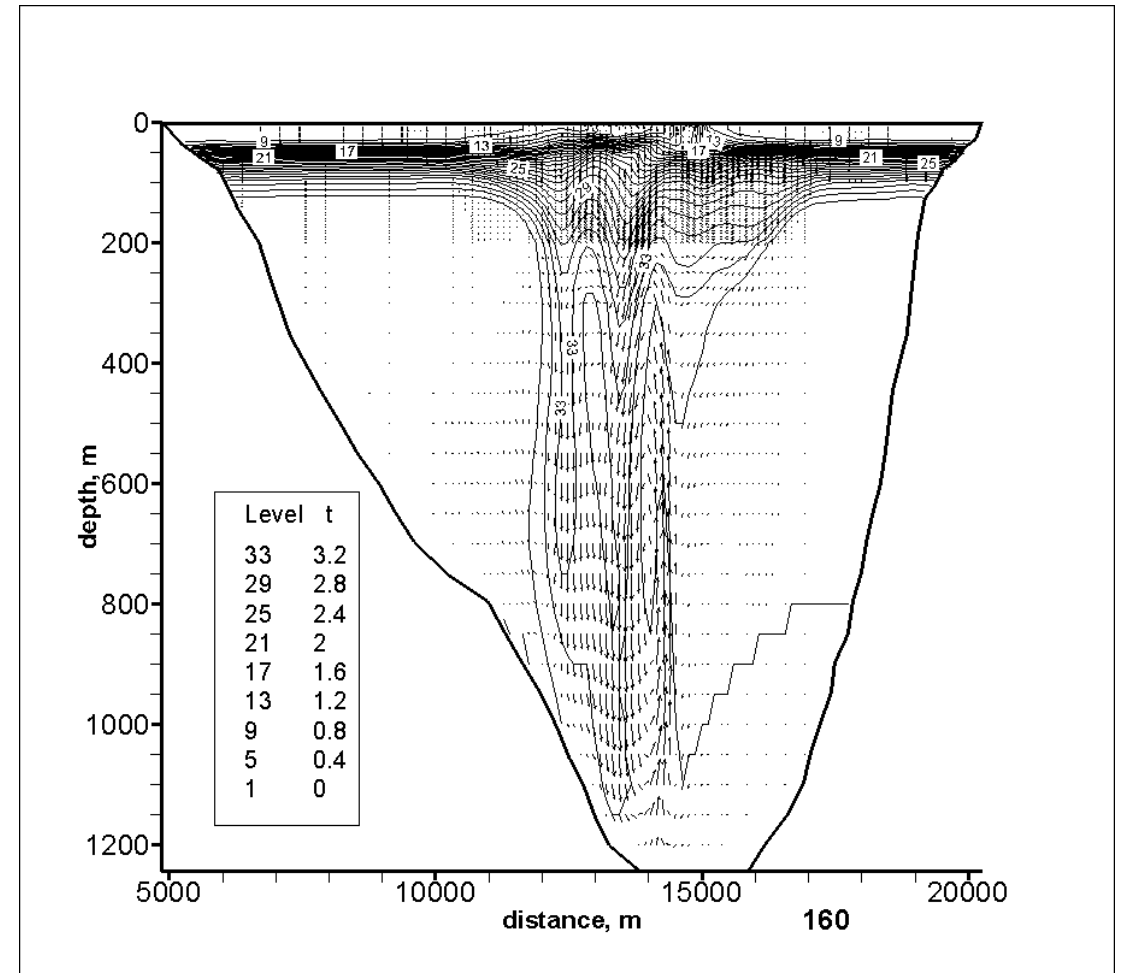
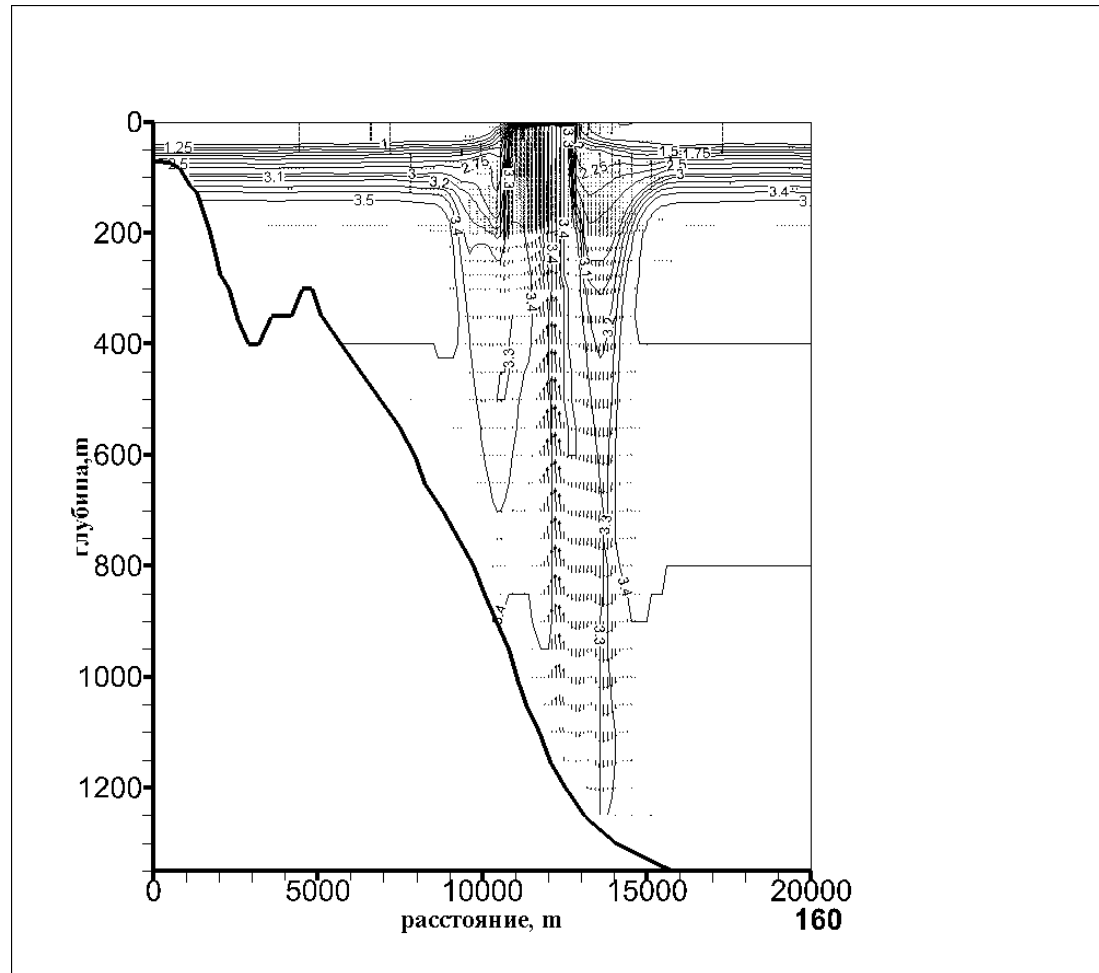
Изолинии температуры и скорости течений в продольном и поперечном сечениях



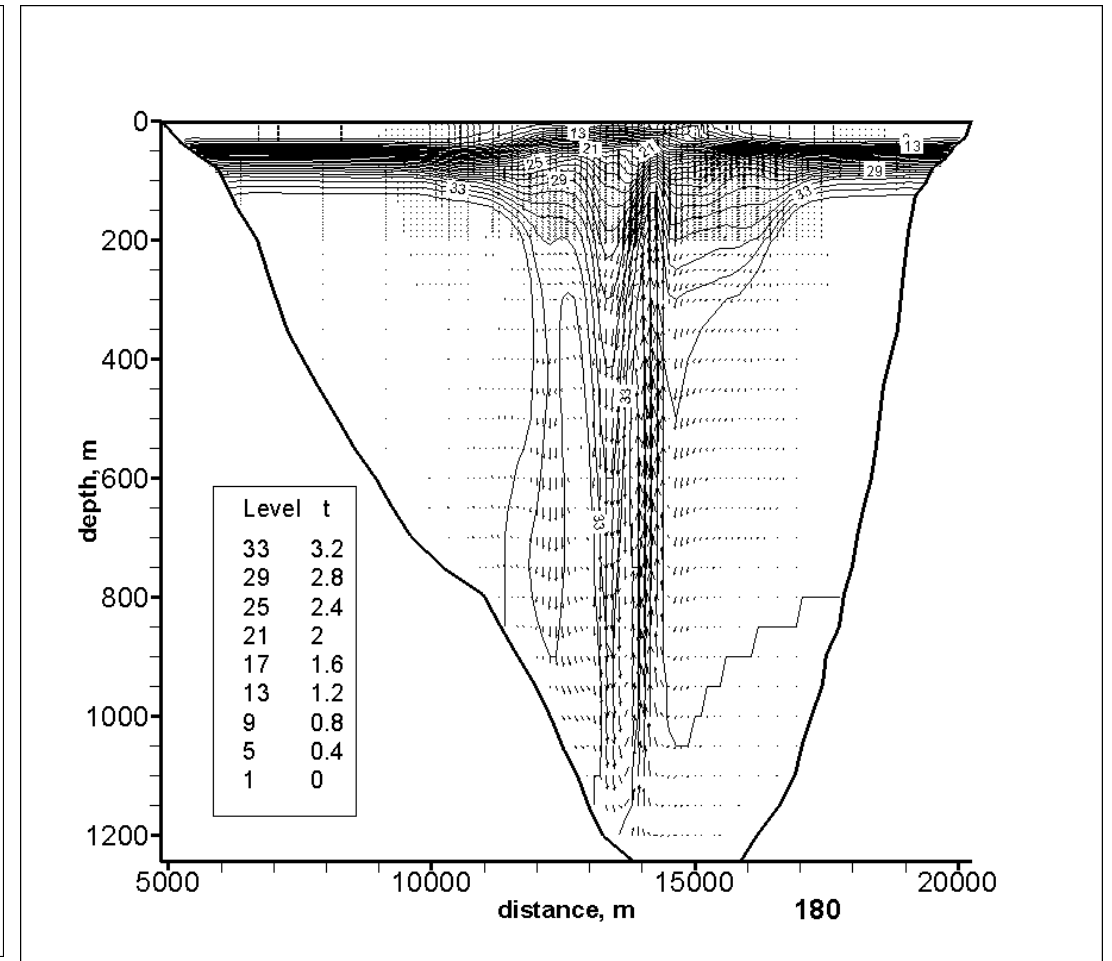
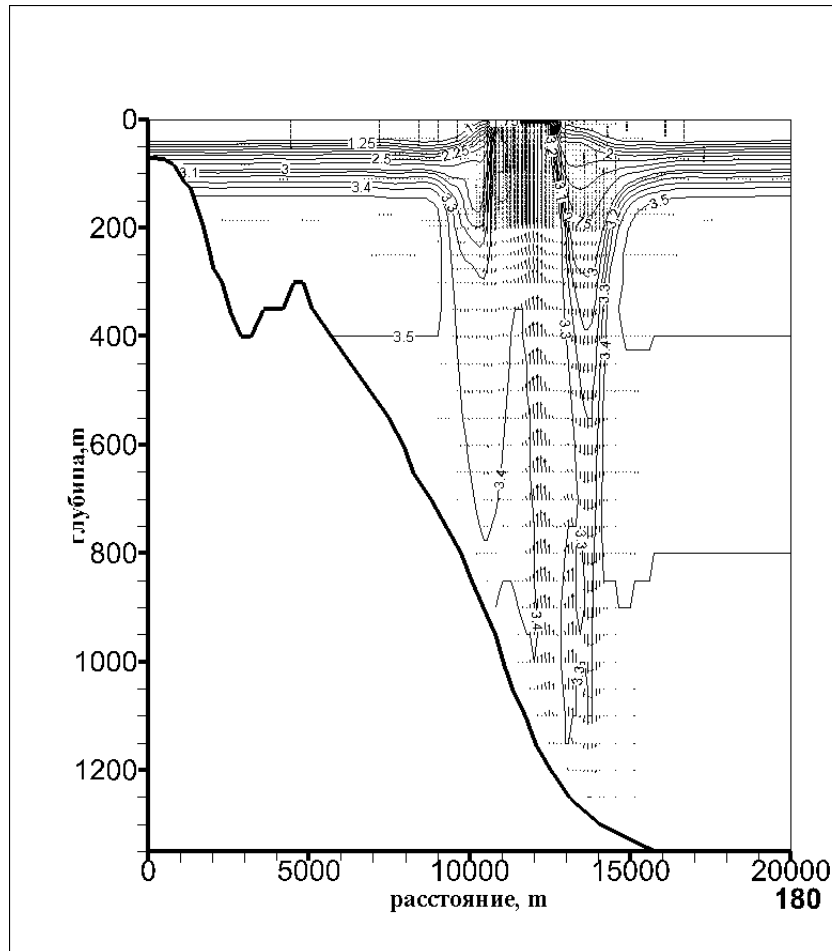
Изолинии температуры и скорости течений в продольном и поперечном сечениях



Изолинии температуры и скорости течений в продольном и поперечном сечениях



Изолинии температуры и скорости течений в продольном и поперечном сечениях



Заключение

С помощью численного моделирования изучается поведение двухфазной системы вода- твердые частицы в условиях глубокого водоема в устойчиво стратифицированной среде в типичных условиях зимнего сезона.

В расчетах проявилась изменчивость поведения системы при учете межфазного динамического взаимодействия.

Влияние всплывающей примеси на гидродинамические процессы выражается в организации вынужденной конвекции и в обновлении глубинных вод озера, что принципиально невозможно в условиях естественной конвекции в весенний и осенний периоды из-за уменьшения температуры максимальной плотности воды.

Спасибо за внимание!