

RANS модель атмосферной дисперсии для
оценки радиационной обстановки в
условиях сложной трехмерной геометрии
объекта. Некоторые другие модели и
программные комплексы в задачах
радиоэкологии.

Сороковикова О.С., Семенов В.Н.

Дзама Д.В.

ИБРАЭ РАН

RANS модель атмосферной дисперсии для оценки радиационной обстановки в условиях сложной трехмерной геометрии объекта.

С 90-х годов стало бурно развиваться 3D моделирование распространения примеси (в том числе радиоактивной) в условиях сложной геометрии промышленного объекта или города (опасность ядерного терроризма).

Долгие годы для этой цели использовались классические подходы RANS модели с пристеночными функциями и сильным сгущением расчетной сетки (LOS ALOMOS).

Расчеты с помощью LES модели (Livermore) .

В отличие от классических инженерных задач решаемых с использованием этих методов сам объект можно представить довольно приближенно.

Введение



Oklahoma-city – место проведение крупнейшего эксперимента по распространению примеси в условиях городской застройки (Livermore).

Эксперимент по распространению загрязнения в окрестности здания (Livermore).

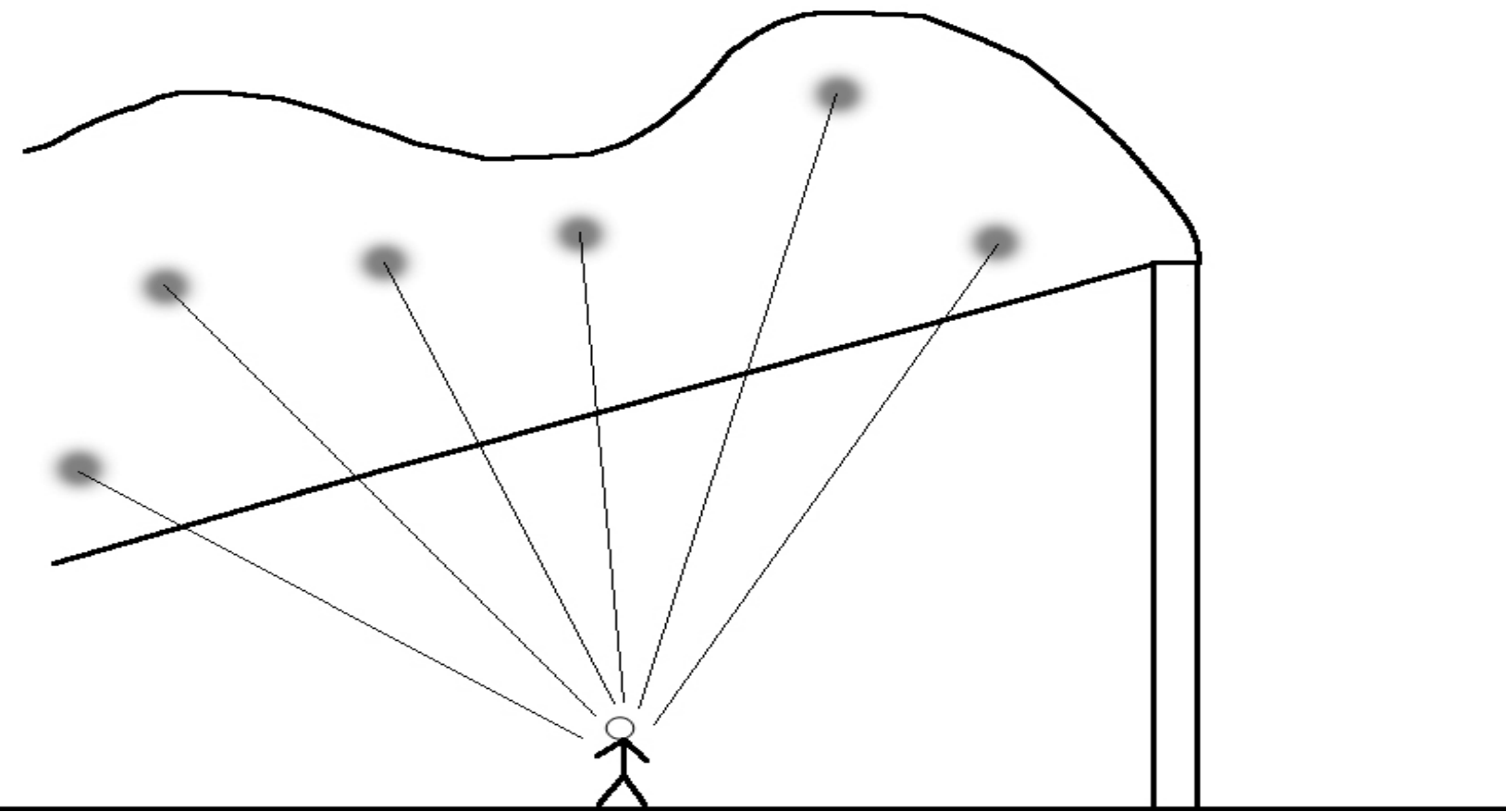


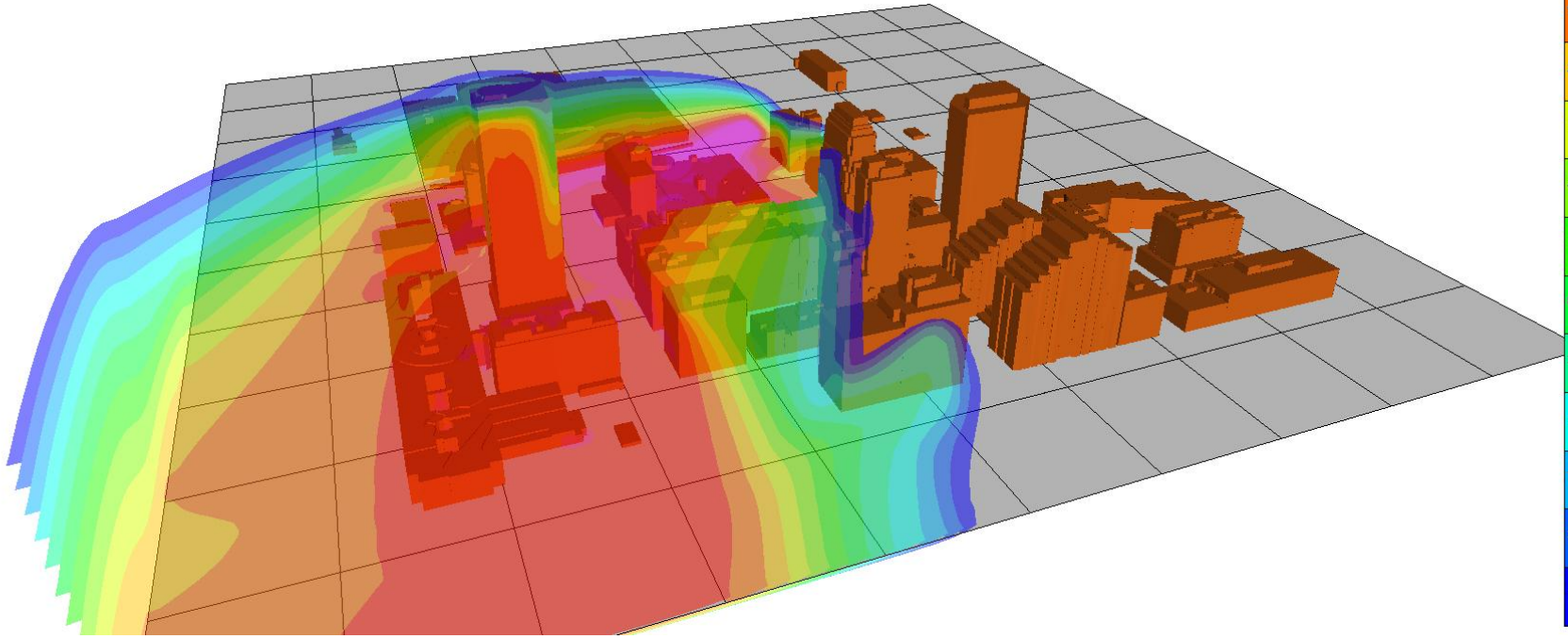
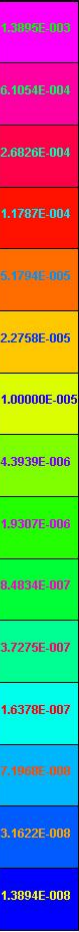
Примерно к 2005-2010 годам возникло понимание, что классические подходы решения инженерных задач в данном случае есть «стрельба из пушки по воробьям».

Ведущие (упомянутые выше) коллективы приступили к разработке специальных моделей для этого круга задач.

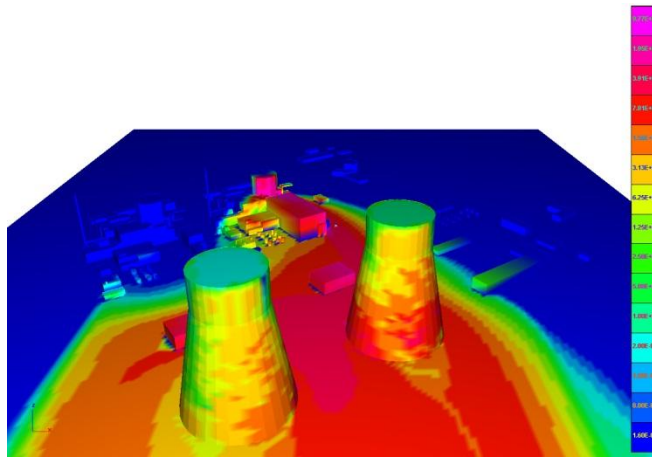
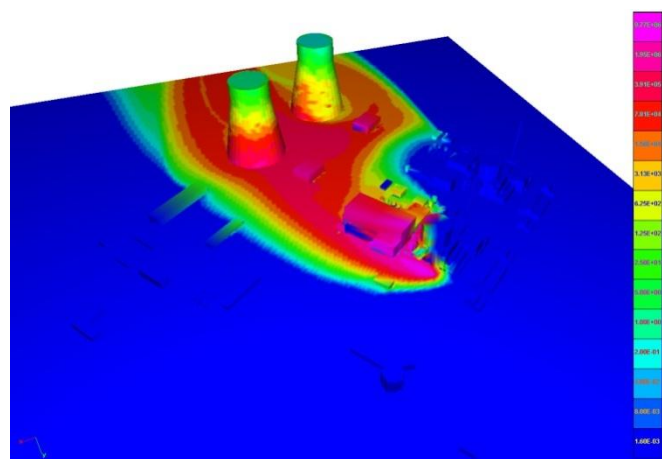
Общая постановка задачи

- ✓ Разработка моделей распространения радионуклидов в условиях сложной 3D-мерной геометрии объекта (в том числе городской застройке) приемлемой точности исходя из специфики задачи.
- ✓ Разработка сопряженных с ними моделей облучения персонала и населения по разным путям, в том числе от облака сложной 3D-геометрии и осадений на поверхность здания разной ориентации.
- ✓ Создание на основе разработанных моделей программного комплекса, позволяющего отчуждение от разработчика.

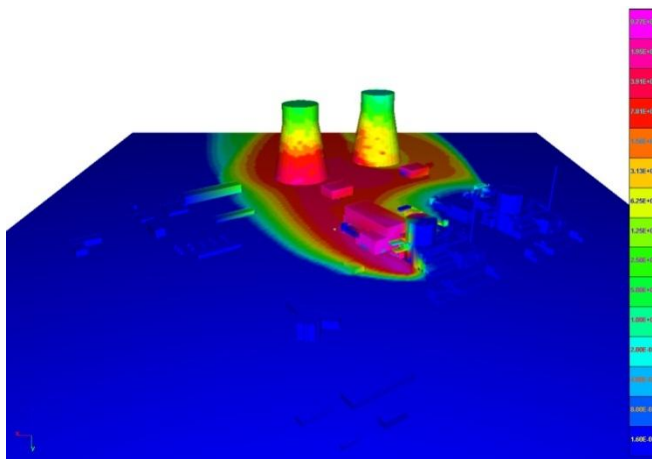
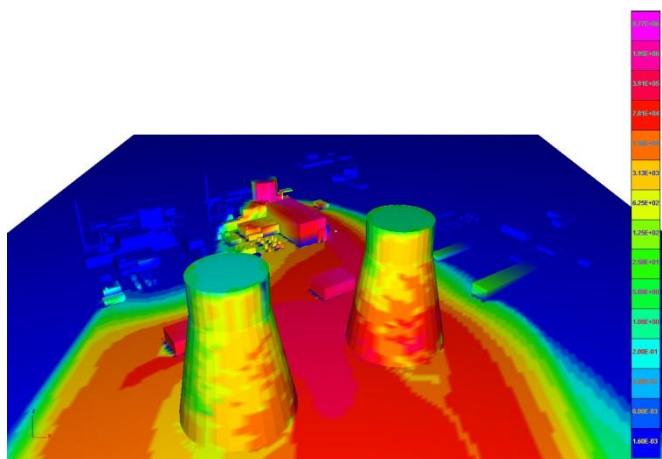




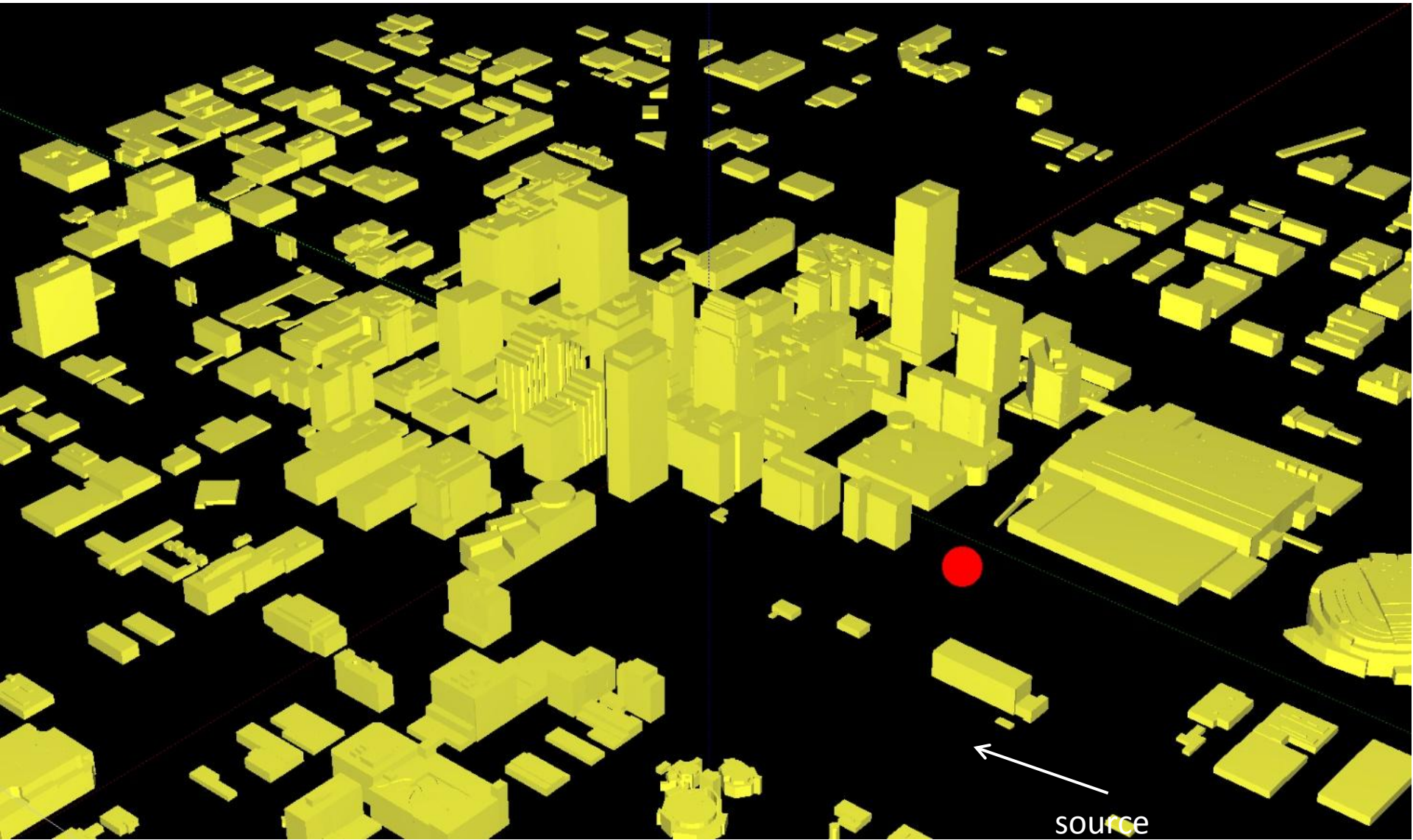
Пример расчета по обоснованию безопасности Балтийской АЭС



Осаждения



скорости осаждения на горизонтальную и вертикальную поверхности:
 $2e-4$ и $2e-4$ соответственно



Основные уравнения:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left(\frac{(\mu + \mu_t) \partial \rho}{\sigma_\rho \partial x_i} \right)}{\partial x_i} \quad \frac{\partial \rho u_j}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_j u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right]}{\partial x_i} - \frac{\partial P}{\partial x_j} + \rho g_j$$

$$\frac{\partial \rho \theta}{\partial t} + \frac{\partial \rho \theta u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\rho \frac{\mu + \mu_t}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + Q_\theta \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{Pr} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + Q_C$$

В этих уравнениях: ρ – плотность; \mathbf{u} – скорость; μ, μ_t – молекулярная и турбулентная кинематическая вязкость; P – давление; \mathbf{g} – ускорение свободного падения; θ – потенциальная температура; Q_θ, Q_C – источник тепла и загрязнения соответственно; Pr – число Прандтля.

Для воздуха при $M \ll 1$ хорошим приближением является
условие несжимаемости

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad \frac{\partial u_j}{\partial t} + \frac{\partial u_j u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[(\mu + \mu_t) \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right]}{\partial x_i} - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial x_j} + g_j$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{Pr} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + \frac{Q_\theta}{\rho} \quad \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial C u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{Pr} \frac{\partial C}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + Q_c$$

Кроме того предполагается небольшая разница между актуальной и
сухоадиабатической температурой (приближение Буссинеска)

$$\frac{\partial w}{\partial t} = \dots - \frac{1}{\rho} \frac{\partial P}{\partial z} - |\vec{g}| = \dots = \dots - \frac{1}{\rho_0} \frac{\partial P'}{\partial z} + \beta |\vec{g}| T' \quad P' \text{ и } T' \text{ – вариации давления и температуры соответственно}$$

$$\beta = - \frac{1}{\rho(\theta_0)} \frac{\partial \rho}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\theta_0} = 3.67 \cdot 10^{-3} K^{-1} \quad \text{– коэффициент теплового расширения воздуха}$$

Модель турбулентности $k-\varepsilon$ для любой температурной стратификации

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + S + G - \varepsilon \quad \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k} + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} S + C_{\varepsilon 3} G)$$

$$S = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad G = -\frac{\mu_T}{\sigma_t} \beta |\vec{g}| \frac{\partial \theta}{\partial z} \quad \mu_{t,k-e} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Константы модели

σ_t	σ_k	σ_ε	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$C_{\varepsilon 3}$	C_μ
0.9	1.0	1.3	1.44	1.92	1.44	0.09

Необходимо сгущение сетки + использование демпфирующих функций у поверхности

Интегральный учет неразрешенного подслоя ниже области развитой турбулентности

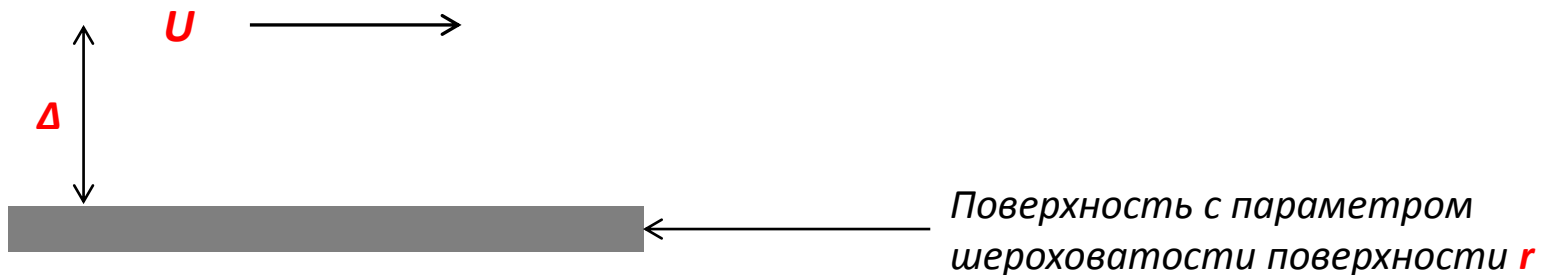
Характерный масштаб расстояний до поверхности где начинается логарифмический слой – *сантиметры*.

Первый расчетный уровень в наших задачах – *метры*.

Для атмосферы характерны незначительные перепады температур; согласно эмпирическим зависимостям вблизи поверхности на этом расстоянии профиль тангенциальной скорости – практически логарифмический:

$$u^* = \frac{\kappa U}{\ln\left(\frac{\Delta}{r}\right)}$$

κ - постоянная Кармана.

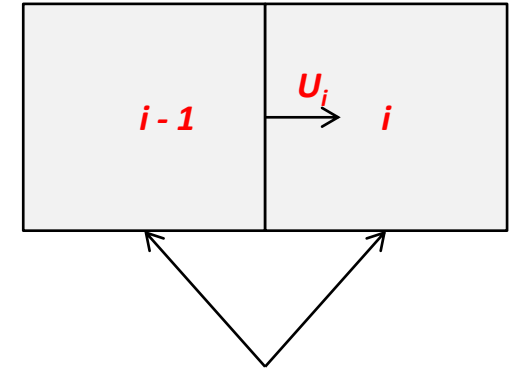


Интегральный учет напряжения трения у поверхности

Сила на единицу объема для x-компоненты скорости:

$$|f_{i,j,k}| = \frac{(F_{i,j-1,k} + F_{i-1,j-1,k})(u_{j-1}^*)^2 + (F_{i,j+1,k} + F_{i-1,j+1,k})(u_{j+1}^*)^2}{y_{j+1} - y_{j-1}} +$$

$$\frac{(F_{i,j,k-1} + F_{i-1,j,k-1})(u_{k-1}^*)^2 + (F_{i,j,k+1} + F_{i-1,j,k+1})(u_{k+1}^*)^2}{z_{k+1} - z_{k-1}}$$



Расчетная ячейка

$$u_{j-1}^* = \frac{\kappa|U_i|}{\ln\left(\frac{0.5(y_j - y_{j-1})}{r}\right)} \quad u_{j+1}^* = \frac{\kappa|U_i|}{\ln\left(\frac{0.5(y_{j+1} - y_j)}{r}\right)} \quad u_{k-1}^* = \frac{\kappa|U_i|}{\ln\left(\frac{0.5(z_k - z_{k-1})}{r}\right)} \quad u_{k+1}^* = \frac{\kappa|U_i|}{\ln\left(\frac{0.5(z_{k+1} - z_k)}{r}\right)}$$

$F_{i,j,k}$ в этой формуле принимает значение 0 или 1 и показывает является ли ячейка с индексом i, j, k фиктивной.

Корректировка модели турбулентности в приповерхностных расчетных ячейках

Поле динамической скорости так же используется в модели k-ε для параметризации кинетической энергии турбулентности и её диссипации в пристеночной ячейке:

$$k = \frac{(u^*)^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{(u^*)^3}{\kappa \cdot \Delta}$$

*коэффициент турбулентной
диффузии в пристеночной ячейке*

$$\mu_{t,k-\varepsilon} = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = \kappa u^* \Delta$$

Гибридная модель турбулентности вне приповерхностных ячейках

Согласно Прандтлю, величина турбулентной вязкости равна (с учётом стратификации):

$$\mu_{t,pr} = \frac{\kappa u^* \Delta}{\varphi(\Delta, L)} \quad \varphi(\Delta, L) = \begin{cases} 1 + 5\Delta / L, & L > 0 \\ 1, & L = 0 \\ 1 / \sqrt{1 + 16\Delta / |L|}, & L < 0 \end{cases} \quad L(p, r) = A(s) r^{\alpha(s)}$$

Здесь φ – функция-поправка на стратификацию, зависящая от расстояния до поверхности Δ и масштаба Монина-Обухова L , зависящего от температурной стратификации p (класса устойчивости) и шероховатости r .

Гибридная модель турбулентности вне приповерхностных ячейках (Прандтль + k-ε)

В качестве динамической скорости используется некоторая, усредненная по площади, динамическая скорость, являющаяся интегральной характеристикой задачи:

$$\langle u^* \rangle = \sqrt{\frac{1}{\rho} \frac{\int \tau dS}{\int dS}}$$

В гибридной модели турбулентности осуществляется плавный переход от модели Прандтля к модели k-ε.

$$\mu_t = \lambda_{\Delta} \cdot \mu_{t,pr} + (1 - \lambda_{\Delta}) \cdot \mu_{t,k-\epsilon}$$

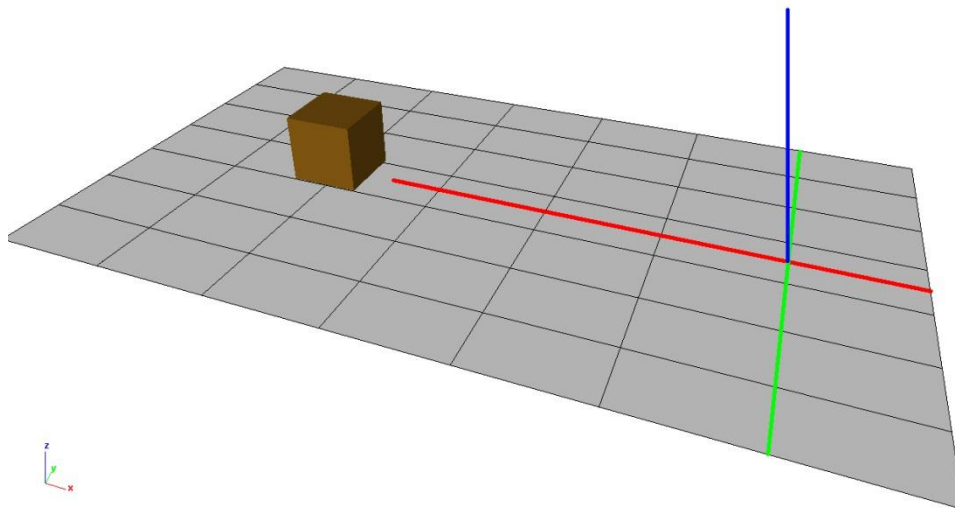
Здесь λ_{Δ} – плавная функция перехода от модели Прандтля к модели k-ε, зависящая от расстояния до ближайшей поверхности:

$$\lambda_{\Delta} = \frac{e^{-\frac{2\Delta}{h}}}{e^{-\frac{2\Delta}{h}} + \left(1 - e^{-\frac{\Delta}{h}}\right)^2} \quad h = \Omega \langle u^* \rangle \quad \Omega = const \sim 10^2$$

Верификация новой версии RANS модели

В университете Los Alamos-а (США) проводились численные и натурные эксперименты по обтеканию кубического препятствия. А именно: фронтальное обтекание кубического препятствия (высота H_b) постоянным потоком при разных температурных стратификациях (задаваемых числом Fr).

Как в численном, так и в натурном эксперименте со стороны аэрологической тени находился точечный приземный постоянный источник примеси, концентрация которого измерялась вдоль 3 линий:

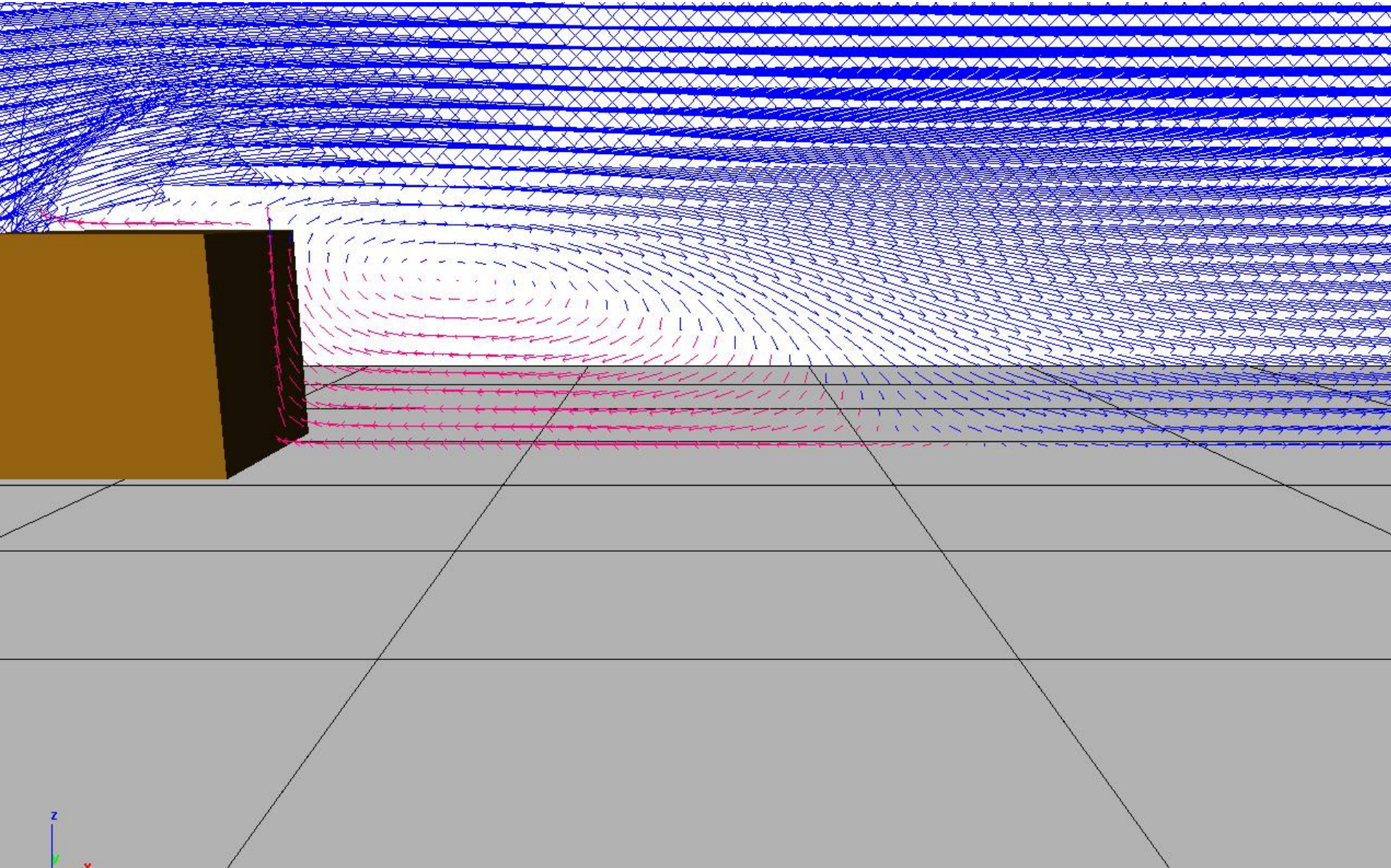


высота препятствия $H_b = 60$ м.

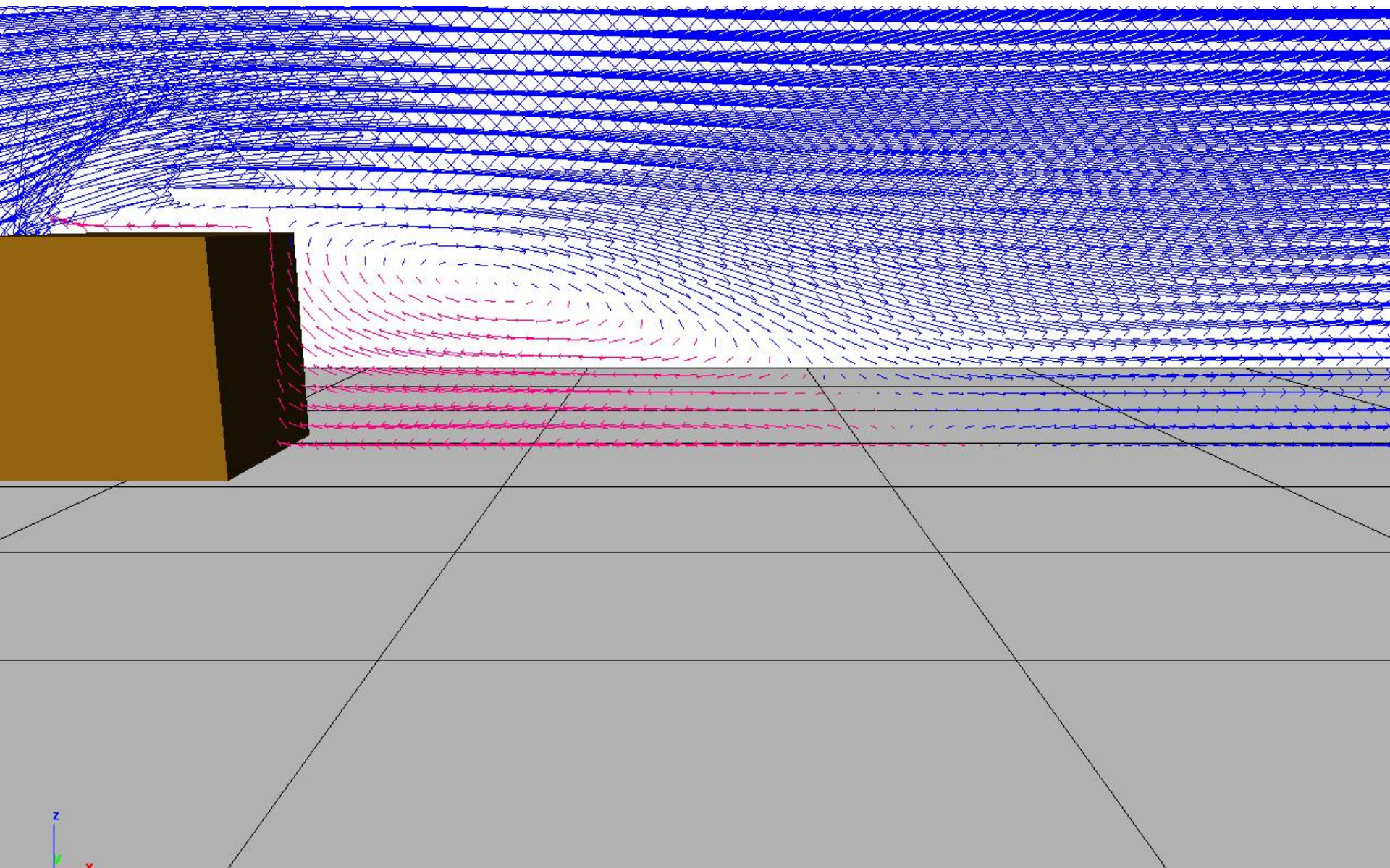
Скорость набегающего потока – 7 м/с
(вдоль оси x).

Центр дома $(0, 0, 30)$

Скорость в сечении $Y = 0$, $Fr = \infty$

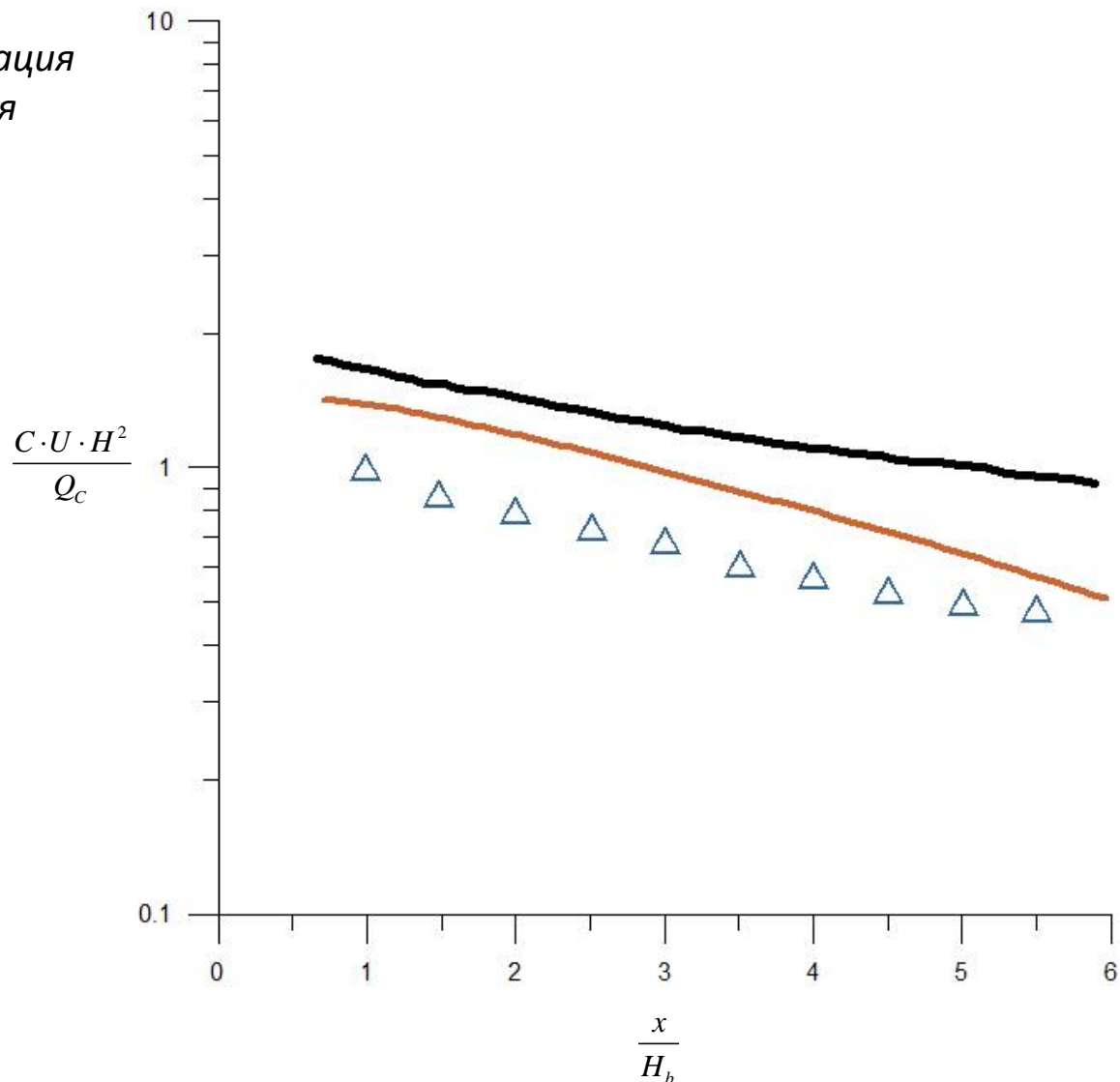


Скорость в сечении $Y = 0$, $Fr = 3$



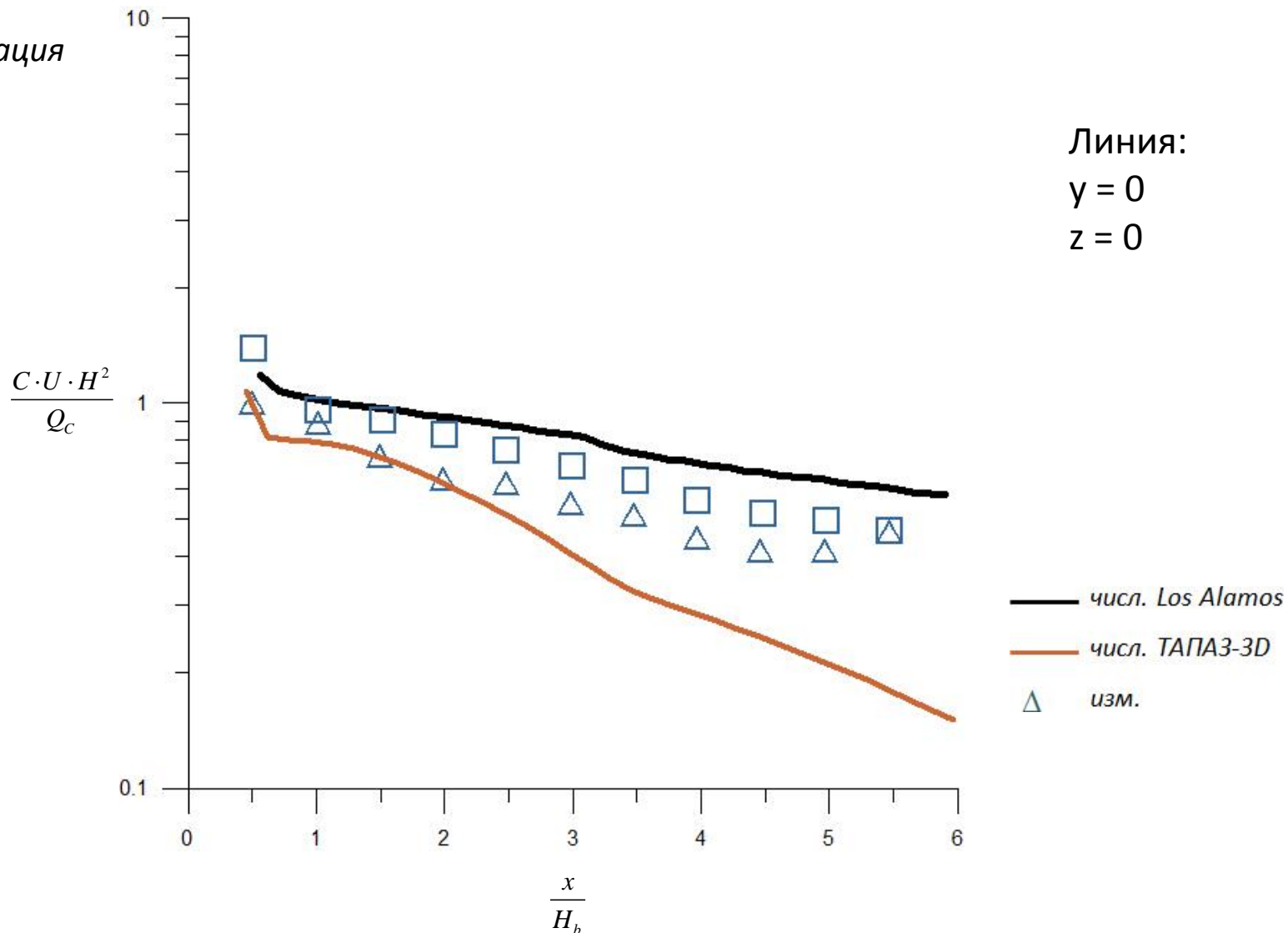
Концентрация примеси, $\text{кг}/\text{м}^3$

стратификация
нейтральная
 $Fr = \infty$



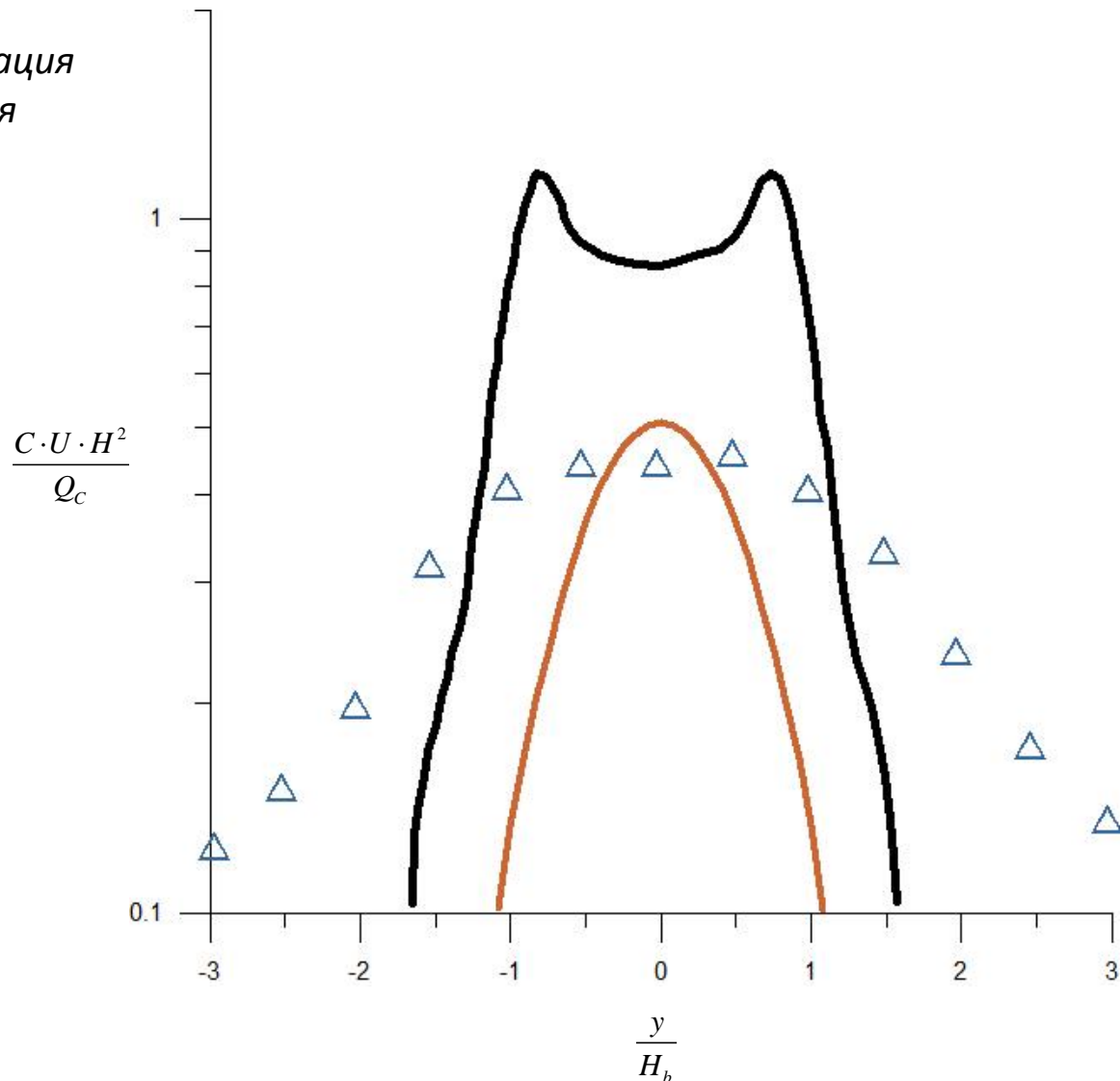
Концентрация примеси, $\text{кг}/\text{м}^3$

стратификация
устойчивая
 $Fr = 3$



Концентрация примеси, $\text{кг}/\text{м}^3$

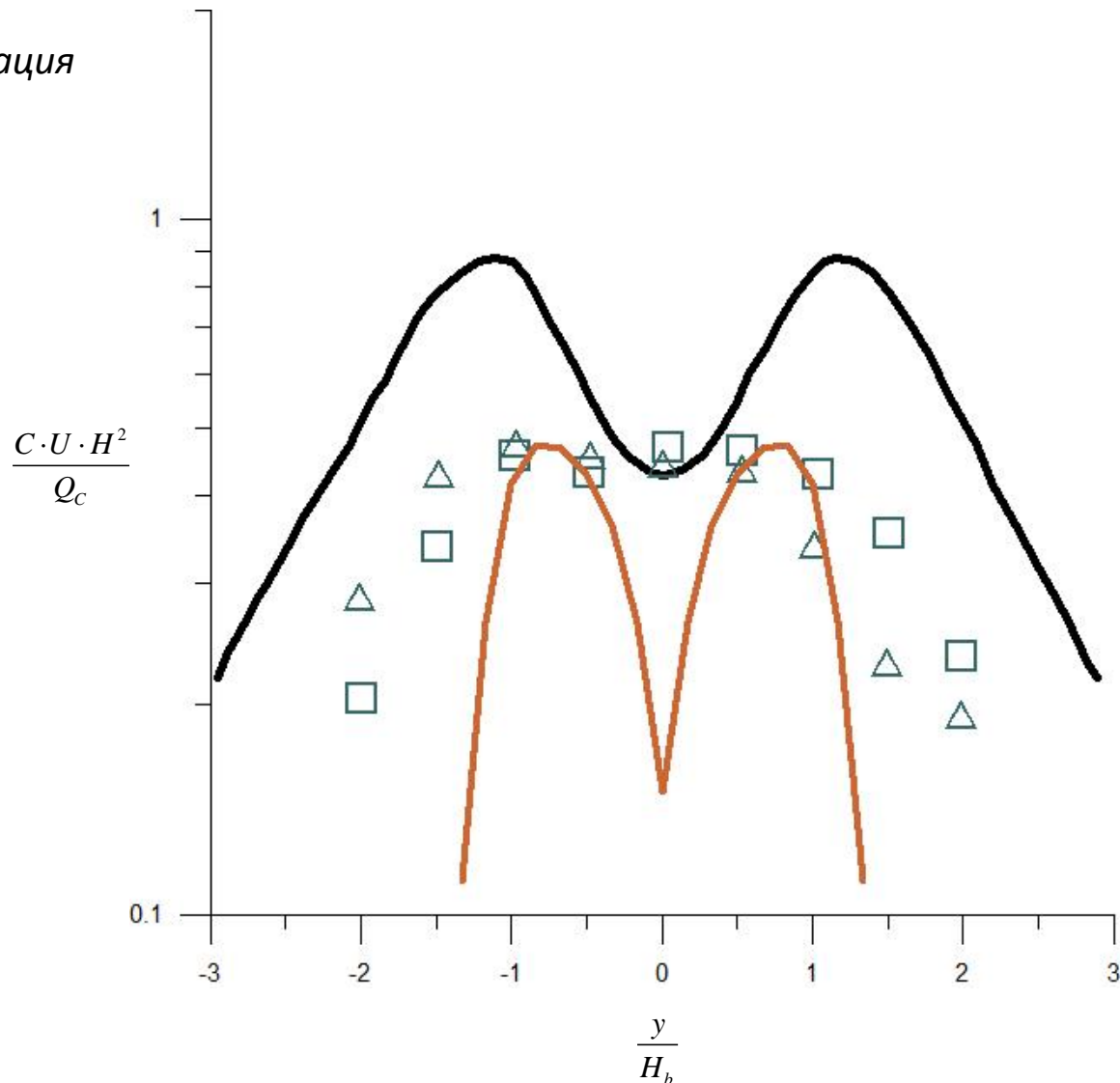
стратификация
нейтральная
 $Fr = \infty$



Линия:
 $x = 6.5H_b$
 $z = 0$

Концентрация примеси, $\text{кг}/\text{м}^3$

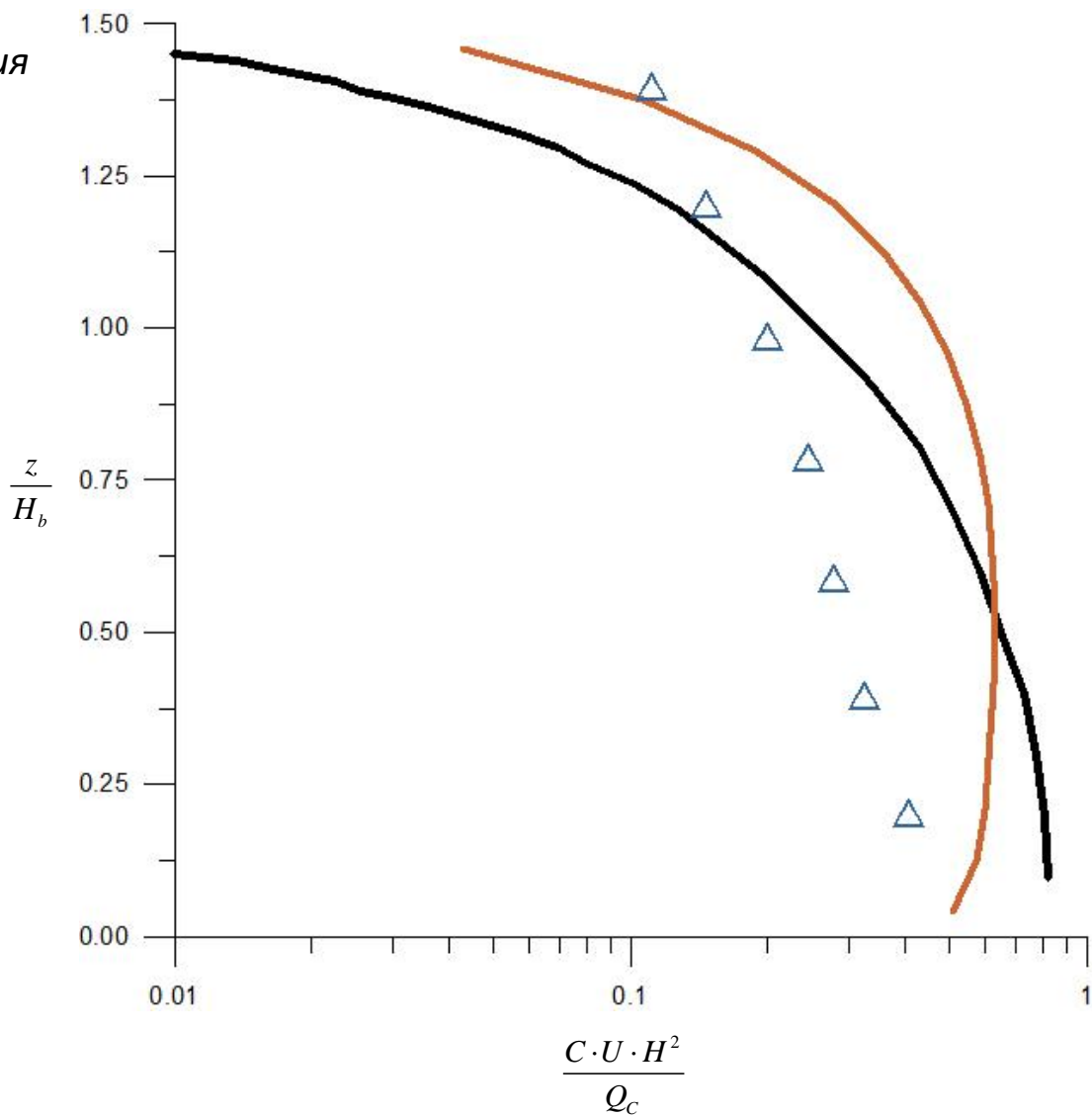
стратификация
устойчивая
 $Fr = 3$



Линия:
 $x = 6.5H_b$
 $z = 0$

Концентрация примеси, $\text{кг}/\text{м}^3$

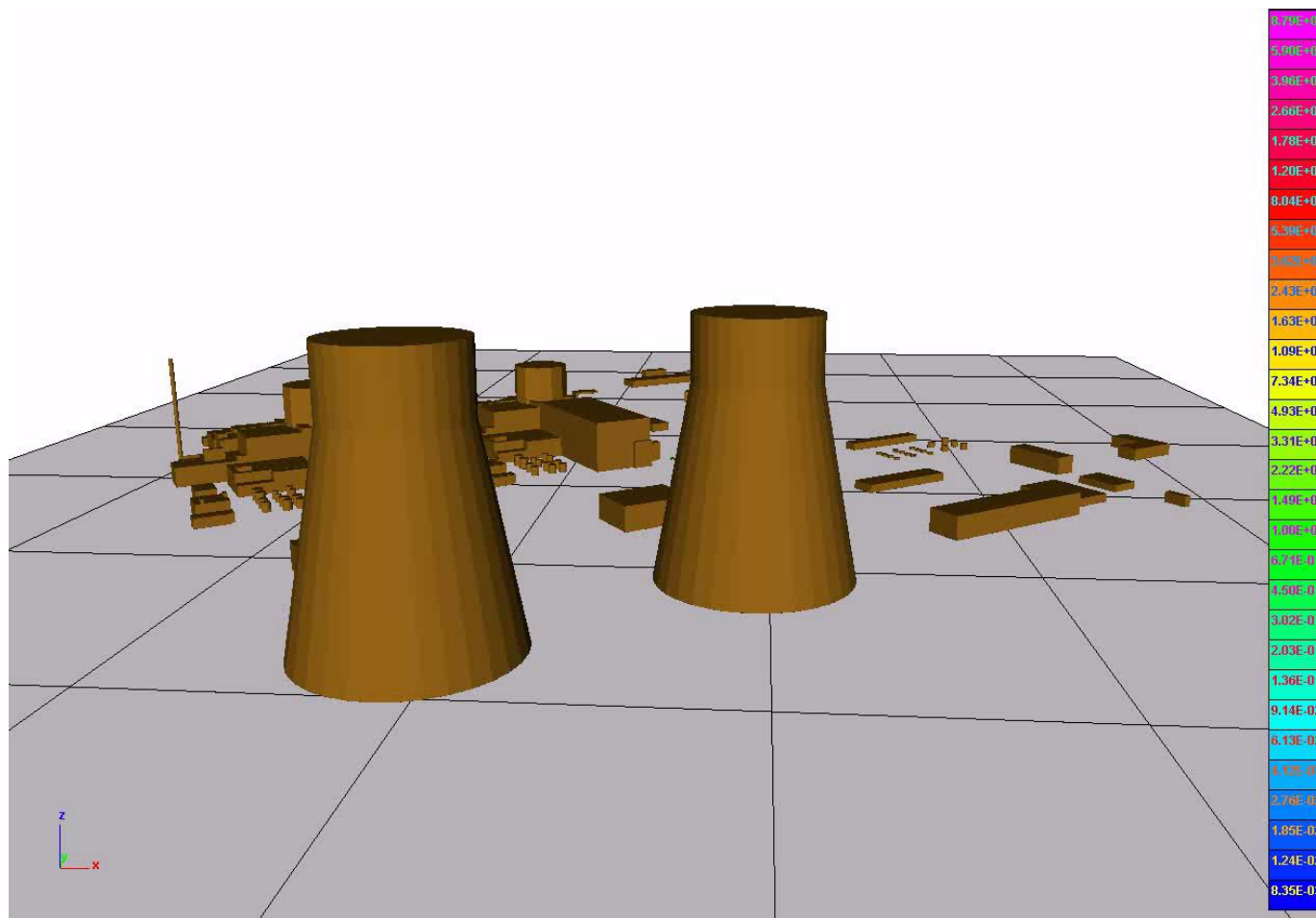
стратификация
нейтральная
 $Fr = \infty$



Линия:
 $x = 6.5H_b$
 $y = 0$

- числ. Los Alamos
- числ. ТАПА3-3D
- △ изм.

Некоторые новые возможности просмотра результатов расчета программного комплекса ТАПАЗ-3D



Разработана версия модели RANS для произвольной стратификации (в пределах наблюдаемой в атмосфере), позволяющая получать приемлемые результаты при моделировании распространения радионуклидов, в условиях сложной геометрии объекта на относительно грубых равномерных сетках.

Некоторые другие модели и программные комплексы ИБРАЭ РАН в задачах радиоэкологии.

ТАПАЗ 3D (**Т**рехмерный **А**тмосферный **П**еренос **А**ктивности в
промышленной **З**астройте)

ПАРРАД (**П**рогноз **А**тмосферного **Р**аспространения **Р**адионуклидов в
Аварийных ситуациях для **Д**ействующих российских АЭС)

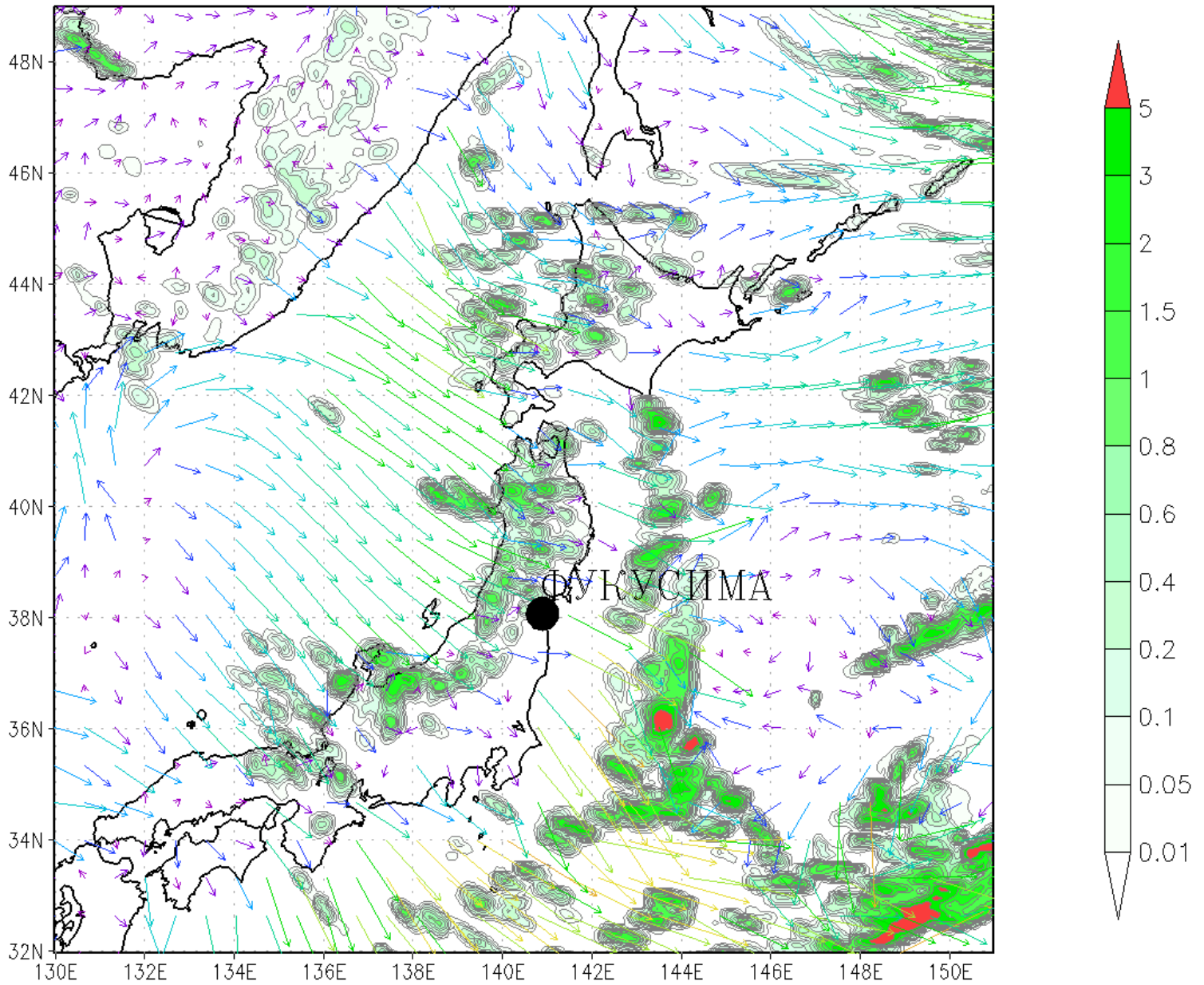
КОРАДО (Комплекс для Оценки РАДиационной Обстановки)

НЕПТУН 1,2

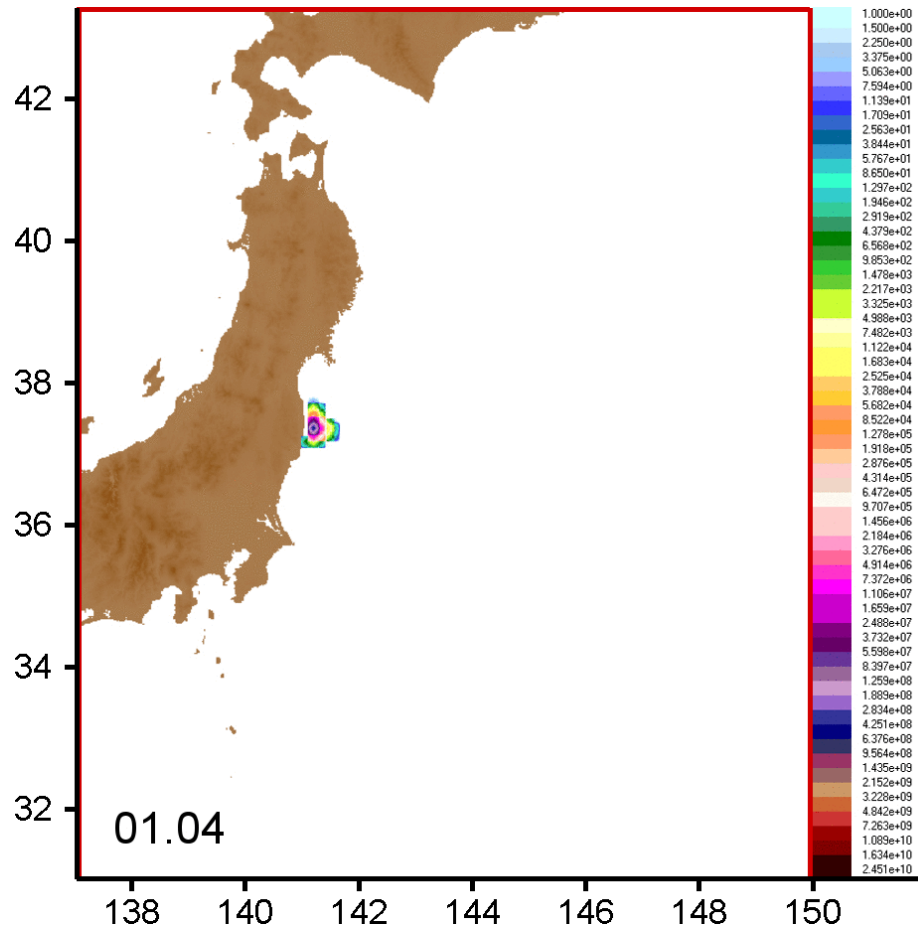
The examples of application of the PARRAD System

Fukushima and NPPs in the territory of Russia

Осадки (мм/час) и ветер на 10 м. 12 часов 11 марта 2011 г. (Гринвич)



Computational region:
137.04°– 149.96° E
31.03° – 43.29° N



Time integrated concentration, Bq·s/m³

Спасибо
за внимание!



Литература

1. Фукусима. Опыт реагирования и уроки. Под редакцией Большова Л.А., Арутюняна Р.В. Наука 2013, 214 стр.