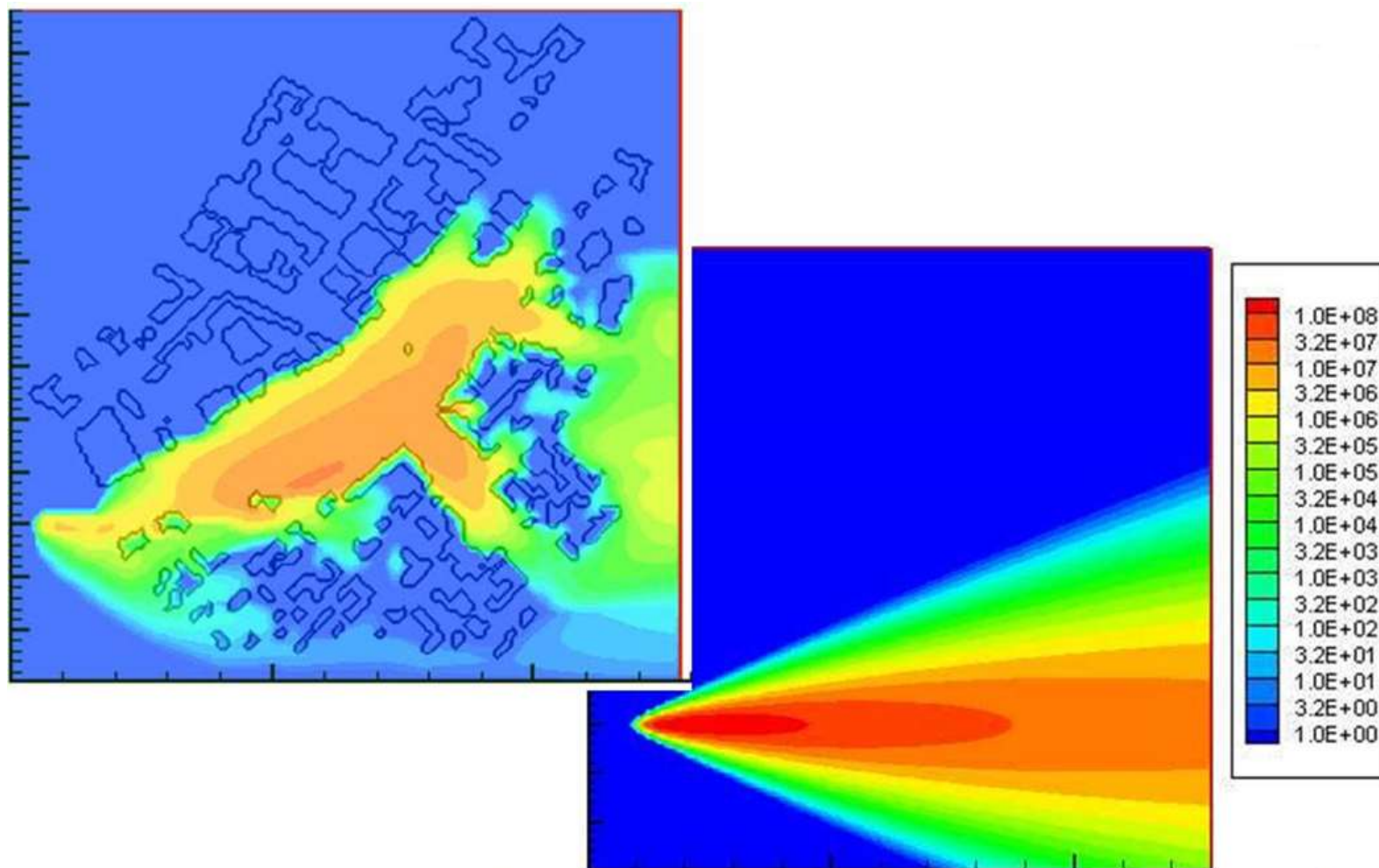


Специализированная робастная CFD RANS
микромасштабная метеорологическая
модель для моделирования атмосферных
процессов и переноса примеси в условиях
городской и промышленной застройки

Сороковикова О.С.
Дзама Д.В.
Асфандияров Д.Г.

Микромасштабные метеорологические модели



Описание модели. Основные предположения

- Использование уравнений Навье-Стокса в приближении Рейнольдса и несжимаемости. В пристеночном слое расчетных ячеек используется параметризация потоков тепла и импульса.
- Входные вертикальные профили скорости и температуры строятся в соответствии с моделью пограничного слоя атмосферы с использованием классификации классов устойчивости атмосферы по Тёрнеру.
- Все расчетные переменные рассматриваются как нарушения гидростатического состояния равновесия. Используется приближение Буссинеска.

Описание модели. Основные уравнения

Уравнение непрерывности

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

Уравнение
переноса импульса

$$\rho_0 \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \rho_0 (\vec{u} \vec{\nabla}) \vec{u} = -\vec{\nabla} \delta P + \vec{\nabla} (\rho_0 \nu_T \vec{\nabla}) \vec{u} + \rho_0 \vec{g} \frac{\delta \theta}{\theta_0} + \vec{f}$$

Уравнение переноса тепла

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{\partial \theta}{\partial t} + \vec{u} \vec{\nabla} \theta = \vec{\nabla} (\chi_T \vec{\nabla} \theta)$$

Уравнение переноса
пассивной примеси
(i-ого радионуклида)

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + (\vec{u} + \vec{w}_i) \vec{\nabla} C_i = \vec{\nabla} (D_T \vec{\nabla} C_i) + Q_{C_i}$$

Описание модели. Двуслойная модель турбулентности

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \vec{\nabla}(k \vec{u}) = \vec{\nabla} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \vec{\nabla} k \right) + S + G - \varepsilon$$

$$-\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = S = \nu_T \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \frac{\partial u_i}{\partial x_j}, \quad \frac{\vec{g}}{\theta} \overline{(\vec{u}' \theta')} = G = \frac{\nu_T}{\sigma_\theta} \frac{\vec{g}}{\theta} \vec{\nabla} \theta$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \vec{\nabla}(\varepsilon \vec{u}) = \vec{\nabla} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \vec{\nabla} \varepsilon \right) + \frac{\varepsilon}{k} (C_{\varepsilon 1} S + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

$$\nu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}$$

Расчет k и ε в приповерхностных ячейках $k = \frac{u_*^2}{C_\mu^{1/2}}, \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa \Delta}$

$$\sigma_\theta = 0.9, \quad \sigma_k = 1, \quad \sigma_\varepsilon = 1.3, \quad C_{\varepsilon 1} = 1.21, \quad C_{\varepsilon 2} = 1.92, \quad C_{\varepsilon 3} = 1.44, \quad C_\mu = 0.03$$

Описание модели. Расчет динамической скорости

Для неустойчивой
и нейтральной
стратификации

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{r} \right) - \left\{ \ln \left(\frac{1 + \xi^2}{2} \right) + 2 \ln \left(\frac{1 + \xi}{2} \right) - 2 \operatorname{arctg}(\xi) + \frac{\pi}{2} \right\} \right]$$

Для устойчивой
стратификации

$$U(z) = \frac{U_*}{\kappa} \left[\ln \left(\frac{z}{r} \right) + \frac{\beta z}{L} \right]$$

- $\xi = (1 - \gamma z / L)^{1/4}$ - безразмерный параметр;
- z – расстояние от точки измерения тангенциальной составляющей скорости течения до обтекаемой поверхности (м);
- $\gamma = 15$, $\beta = 4.7$;
- L – масштаб Монина-Обухова, который зависит от класса стабильности атмосферы (А – «-5»; В – «-25»; С – «-70»; D – «-500»; E – «55»; F – «5»; G – «1»);
- $U(z)$ – тангенциальная к обтекаемой поверхности составляющая скорости течения (м/с);
- U_* – динамическая скорость (м/с);
- $\kappa = 0.41$ – постоянная Кармана;
- r – шероховатость поверхности (м).

Описание модели. Параметризация турбулентного потока тепла

Для неустойчивой и
нейтральной стратификации

$$w'\theta' = -U_* \frac{\theta^{\text{воз}} - \theta^{\text{зем}}}{\frac{R}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{r} \right) - 2 \ln \left(\frac{1 + \eta^2}{2} \right) \right)}$$

Для устойчивой стратификации

$$w'\theta' = -U_* \frac{\theta^{\text{воз}} - \theta^{\text{зем}}}{\frac{R}{\kappa} \left(\ln \left(\frac{z}{r} \right) + \frac{\beta}{R} \frac{z}{L} \right)}$$

- $\theta^{\text{воз}}$ – потенциальная температура воздуха у поверхности земли,
- $\theta^{\text{зем}}$ – потенциальная температура земли.
- $\eta = (1 - \lambda z/L)^{1/4}$, $R = 0.74$, $\lambda = 9$, $\beta = 4.7$

Верификация и валидация. Статистические критерии оценки результатов расчета

$$FA-2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad \text{где} \quad N_i = \begin{cases} 1, & \text{если } 0.5 \leq C_{calc}^i / C_{obs}^i \leq 2.0 \\ 1, & \text{если } C_{obs}^i \leq W \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

$$HR = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i, \quad \text{где} \quad N_i = \begin{cases} 1, & \text{если } \left| \frac{C_{calc}^i - C_{obs}^i}{C_{obs}^i} \right| \leq D \\ 1, & \text{если } |C_{calc}^i - C_{obs}^i| \leq W \\ 0, & \text{иначе} \end{cases}$$

Верификация и валидация. Статистические критерии оценки результатов расчета

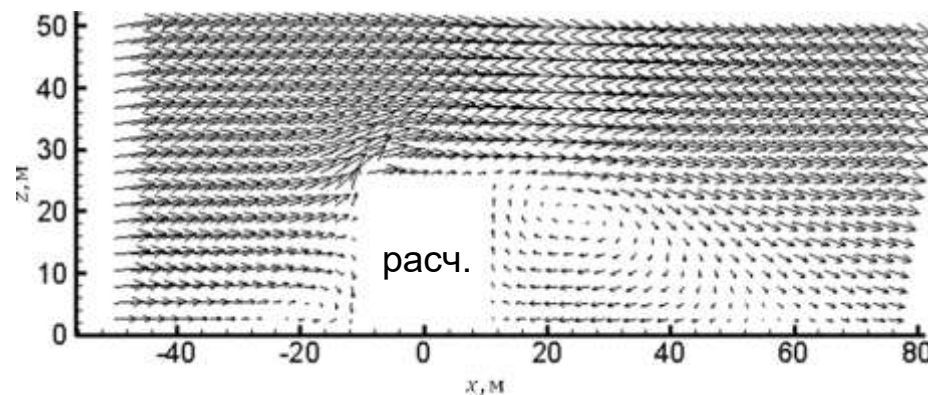
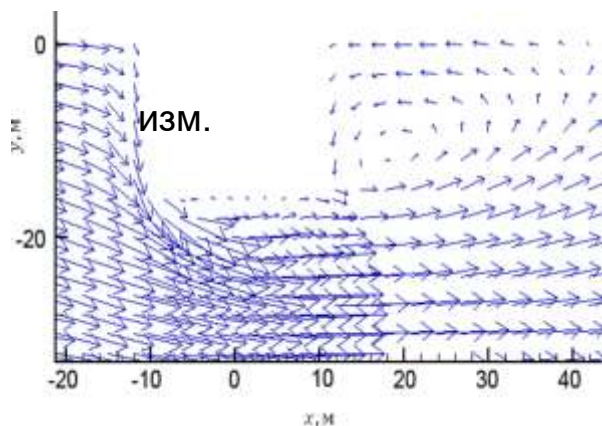
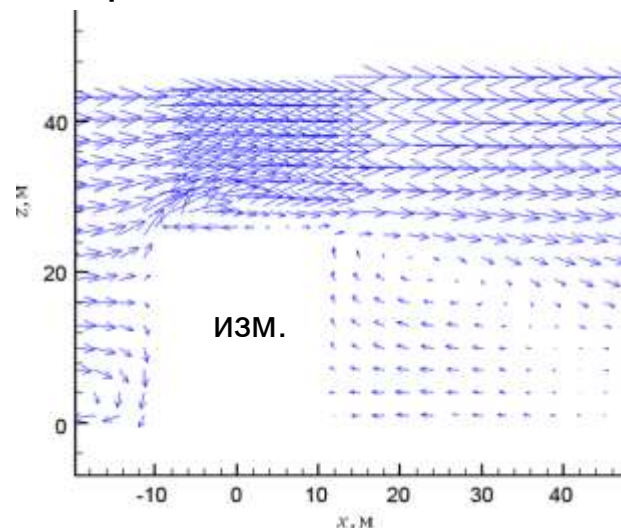
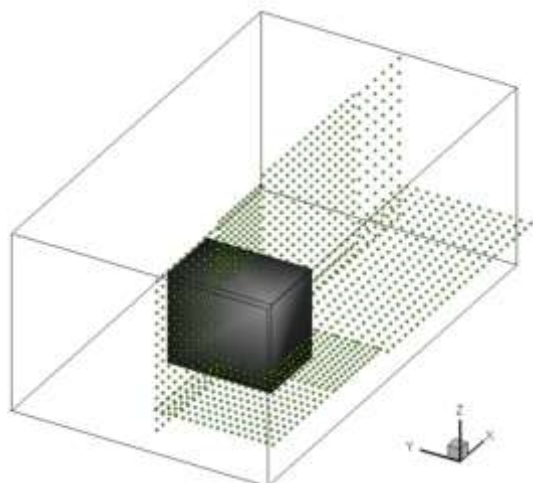
$$PCC = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{calc}^i - \bar{C}_{calc})(C_{obs}^i - \bar{C}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{calc}^i - \bar{C}_{calc})^2 \sum_{i=1}^N (C_{obs}^i - \bar{C}_{obs})^2}}$$

$$BIAS = \bar{C}_{calc} - \bar{C}_{obs} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (C_{calc}^i - C_{obs}^i)$$

$$SAA = \frac{\sum_{i=1}^N |U_i| |\varphi_i|}{\sum_{i=1}^N |U_i|}$$

Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов A1. Примеры расчетов

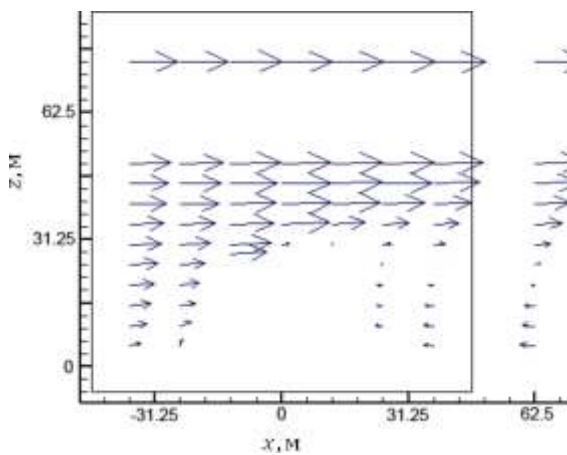
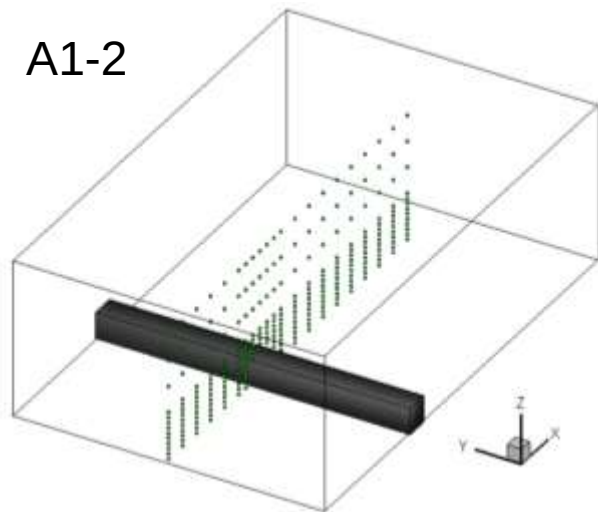
A1-1 – фронтальное обтекание параллелепипеда



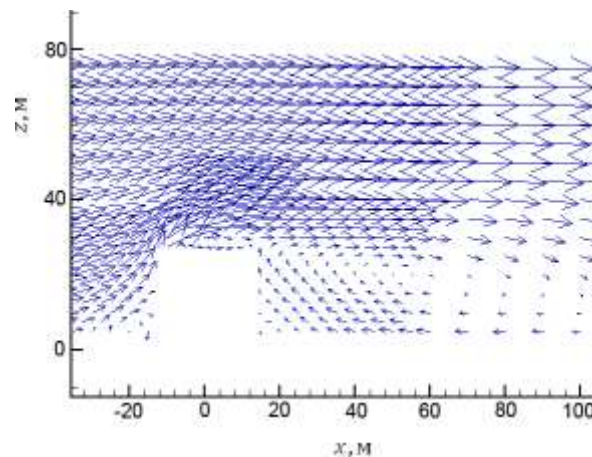
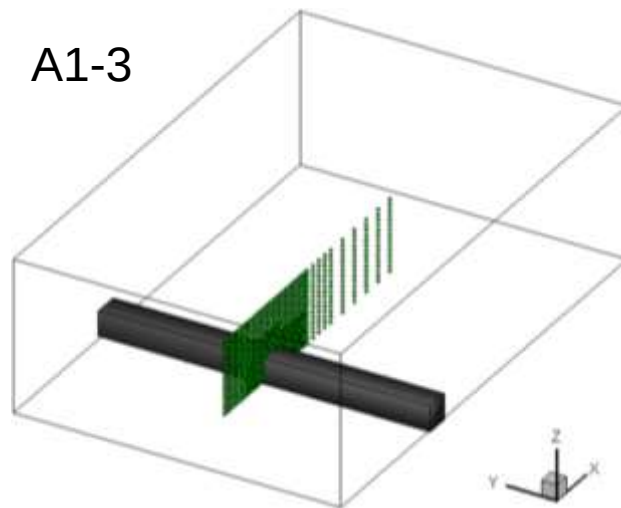
Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов A1. Примеры расчетов

Квазидвумерное фронтальное обтекание параллелепипеда

A1-2



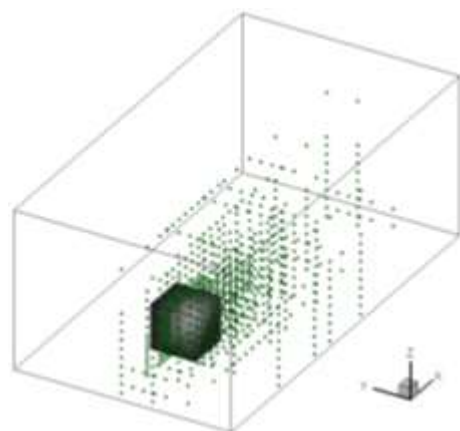
A1-3



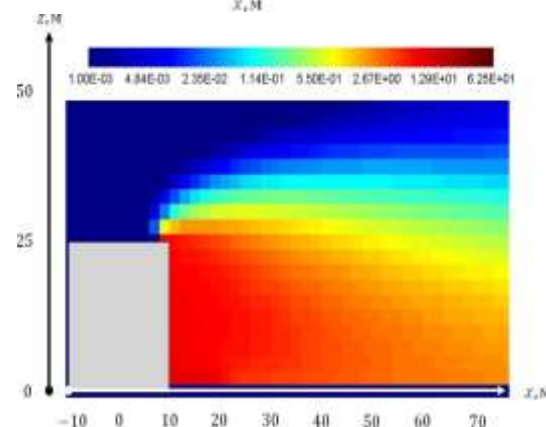
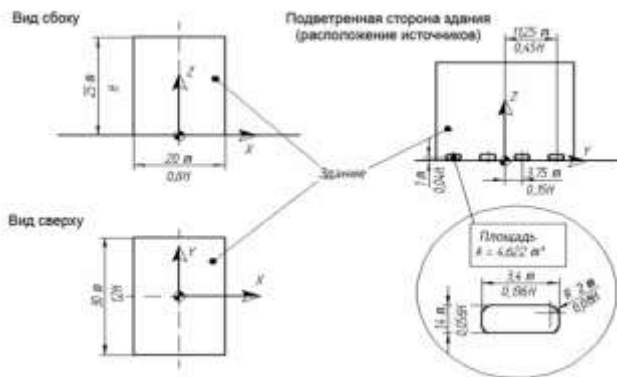
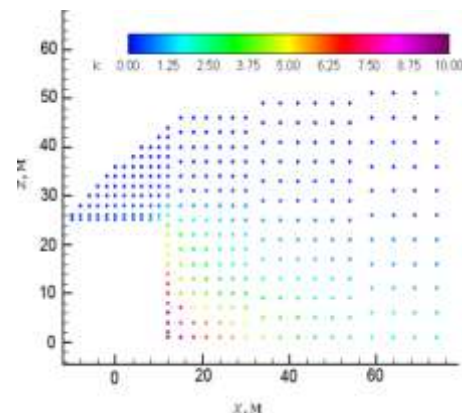
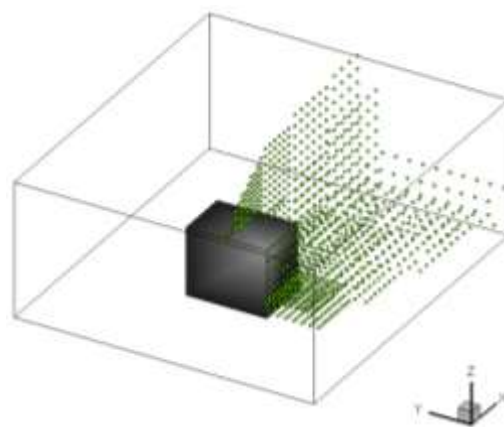
Открытая конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова.
2018

Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов A1. Примеры расчетов

A1-4 – фронтальное обтекание кубического препятствия



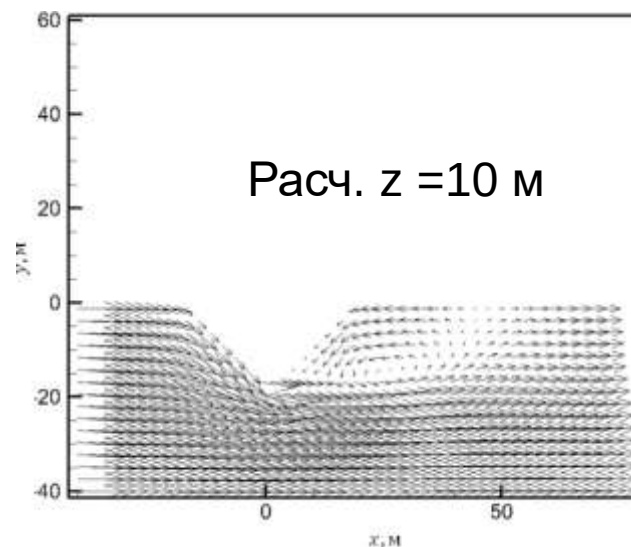
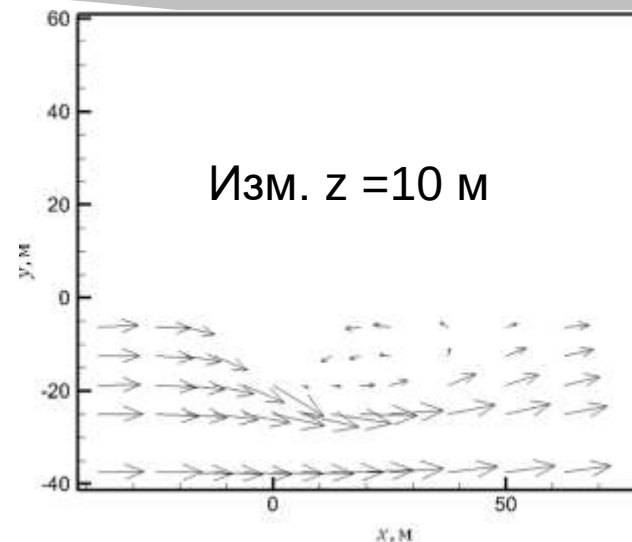
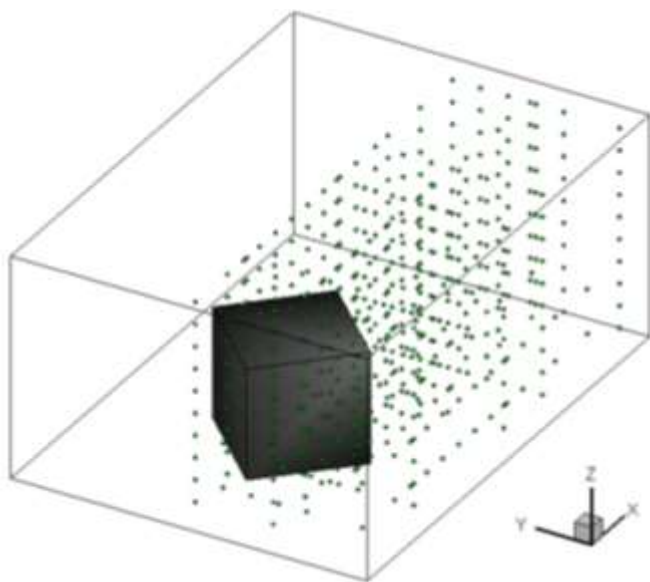
A1-5 – фронтальное обтекание кубического препятствия, распространение примеси



Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов

A1. Примеры расчетов

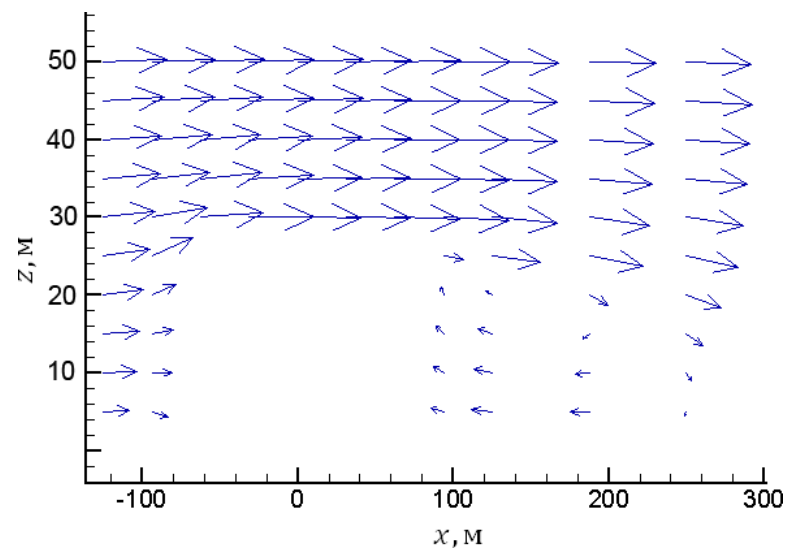
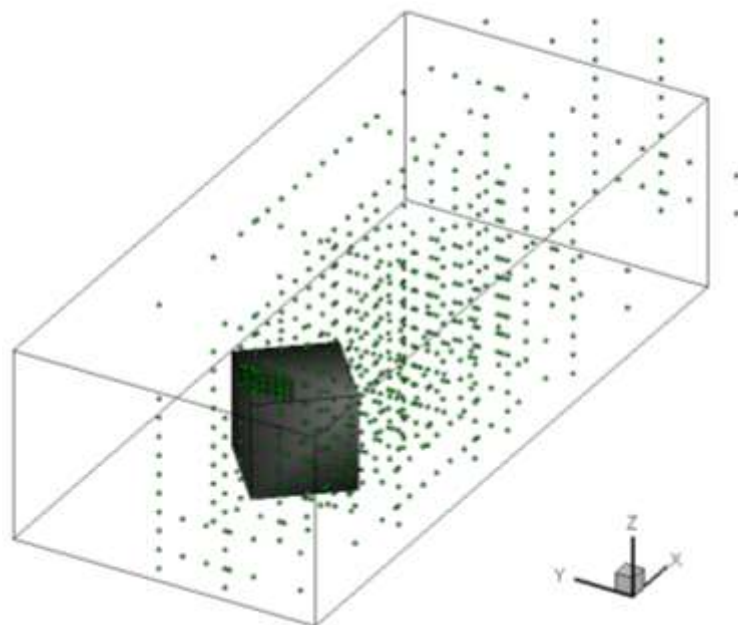
A1-6 обтекание кубического препятствия под углом 45°



Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов

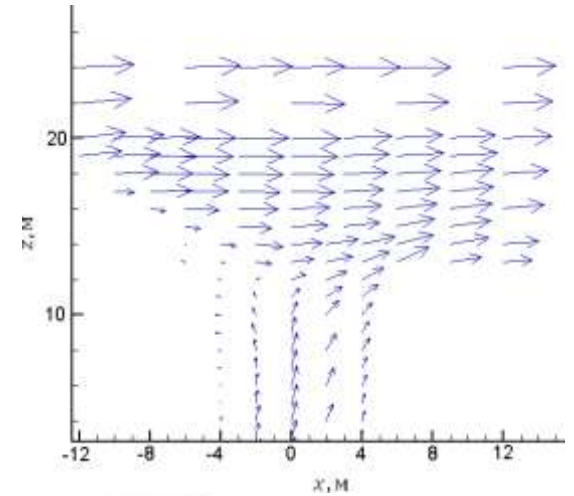
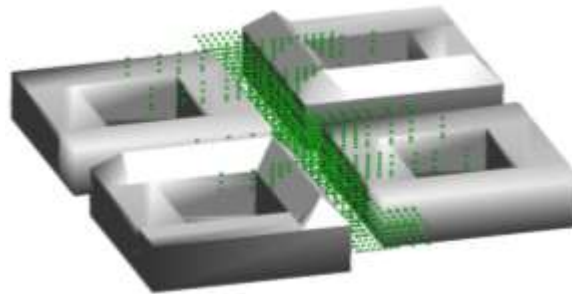
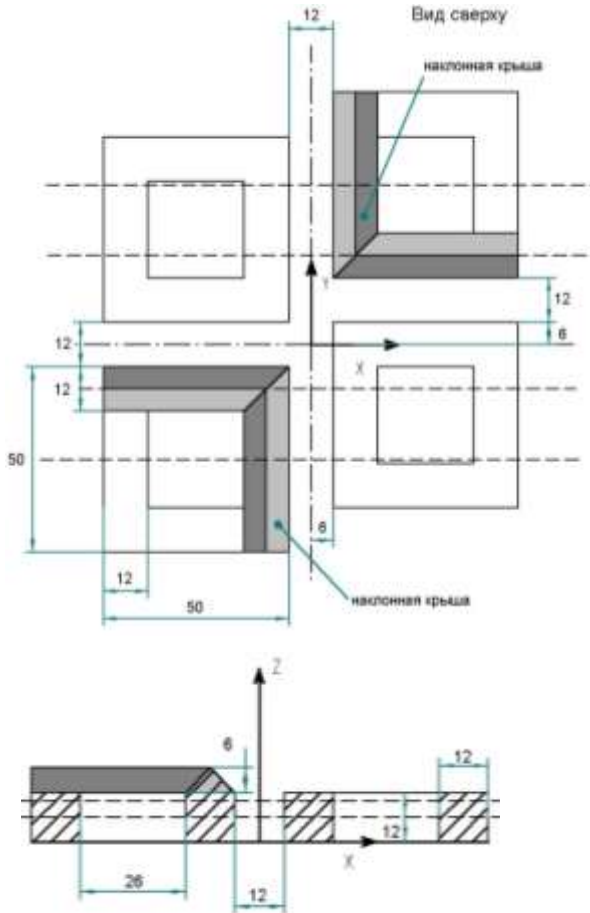
A1. Примеры расчетов

A1-7 обтекание кубического препятствия под углом 40°

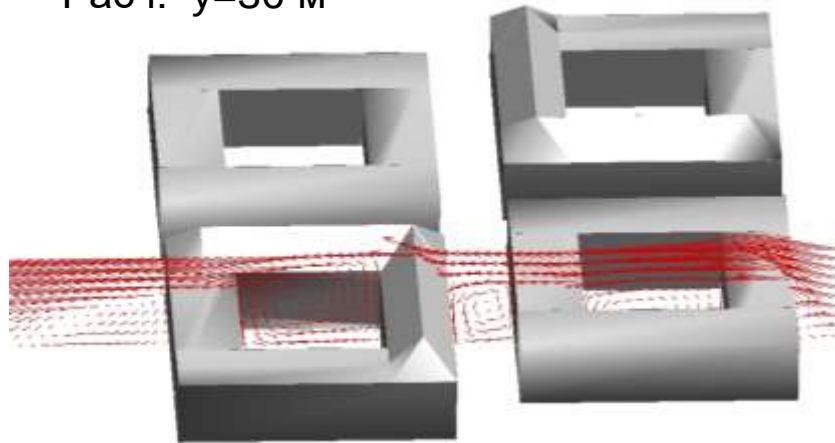


Матрица валидации. CEDVAL / серия экспериментов B1

B1-4



Расч. $y=36$ м



Суммарные значения статистических параметров FA-2 и Hit-rate по экспериментам A1 и B1

Критерий	Значение
FA-2 (U)	87%
FA-2 (V)	96%
FA-2 (W)	93%
Hit-rate (U)	76%
Hit-rate (V)	82%
Hit-rate (W)	75%

Приемочный критерий для МММ равен 66% и 55% для FA-2 и Hit-rate соответственно

Значения статистических критериев для эксперимента A1-1

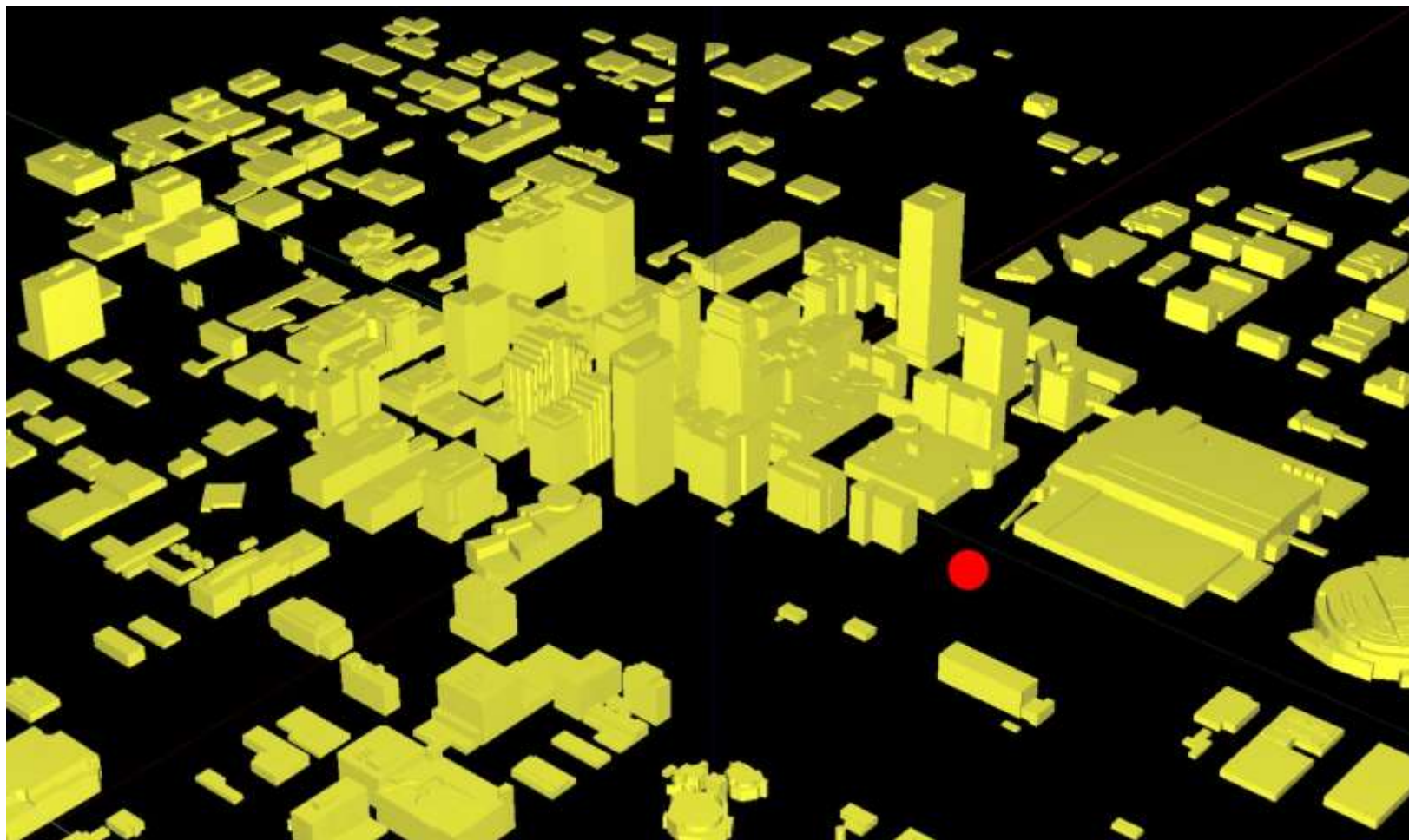
Статистические критерии для продольной компоненты скорости (вдоль основного течения). Вертикальное сечение. Эксперимент A1-1.

Критерий	Значение	Наилучшее значение
FA-2	98%	100%
HR	90%	100%
BIAS	-0.09260	0
PCC	0.96194	1
SAA	6.85260	0

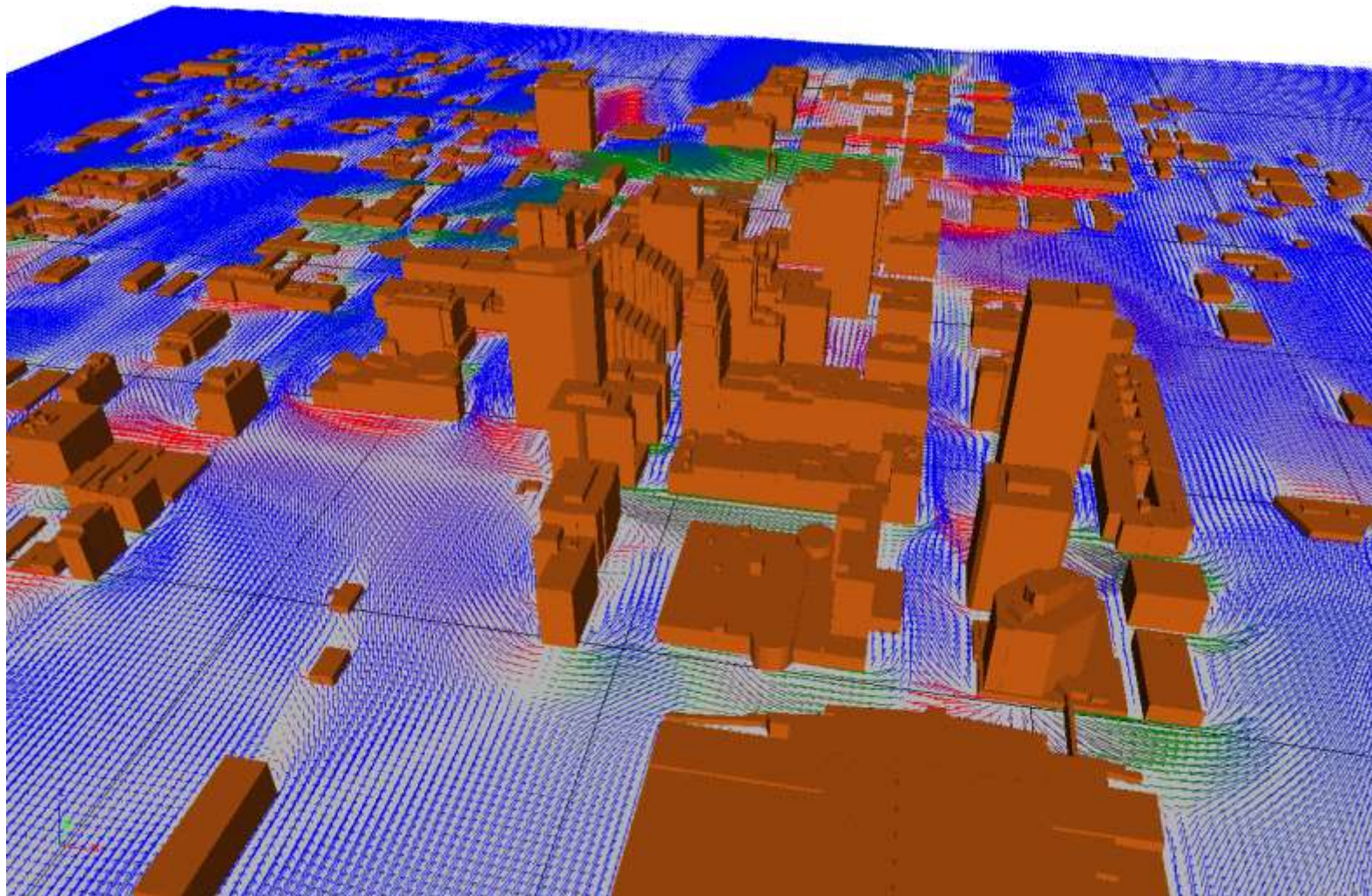
Статистические критерии для вертикальной компоненты скорости. Вертикальное сечение. Эксперимент A1-1.

Критерий	Значение	Наилучшее значение
FA-2	98%	100%
HR	71%	100%
BIAS	-0.03204	0
PCC	0.83054	1
SAA	6.85260	0

Трёхмерная модель центра города Оклахома. Крупномасштабный полевой эксперимент (JOINT URBAN 2003)

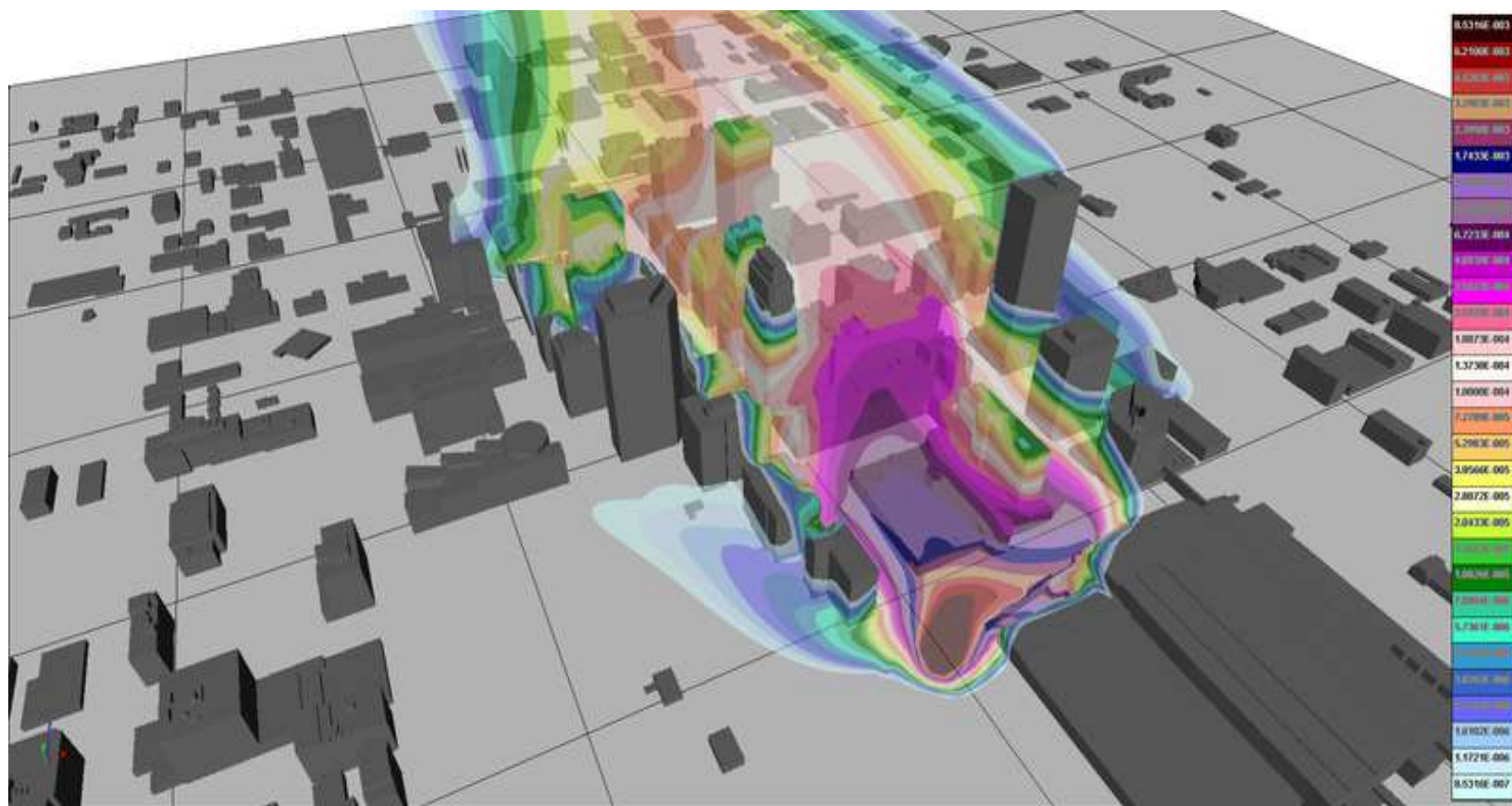


Поле ветра на высоте 5 м

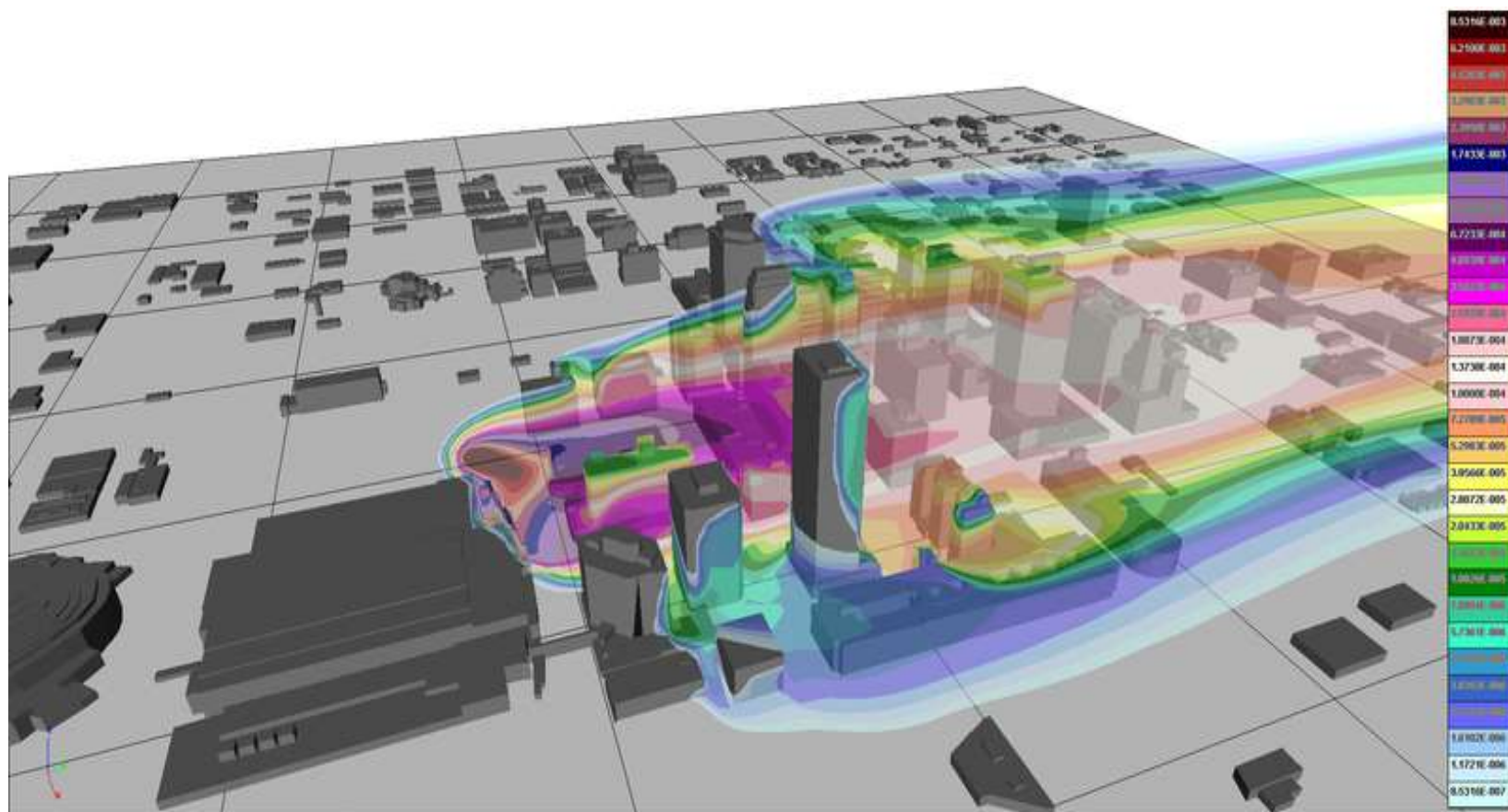


Открытая конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова.
2018

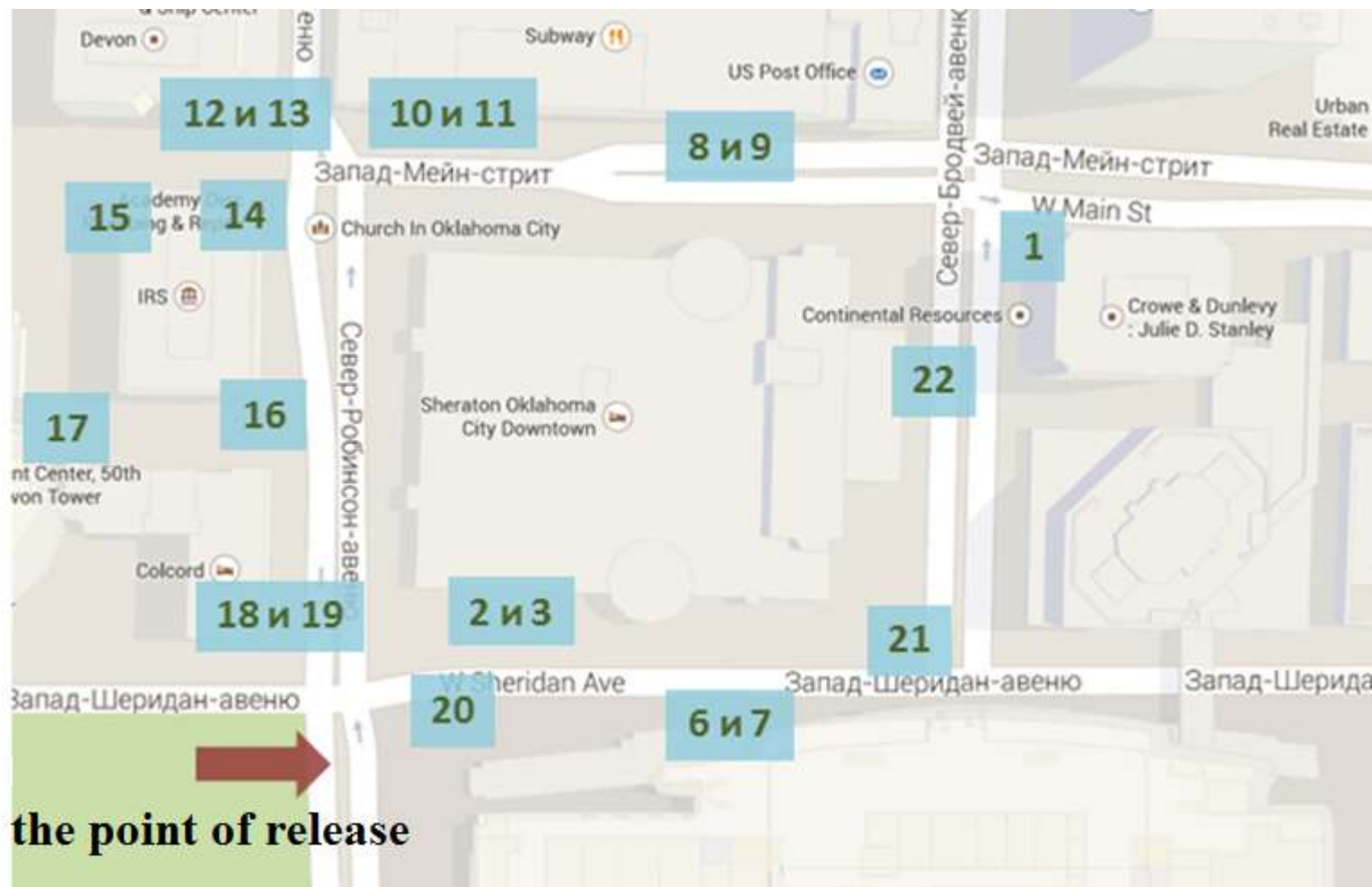
Изоповерхности концентрации (результат моделирования)



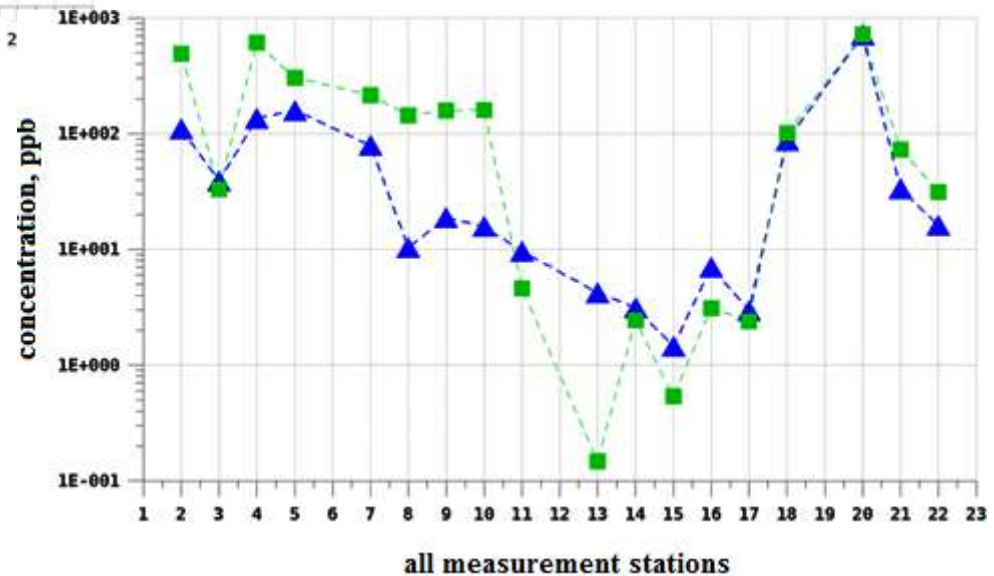
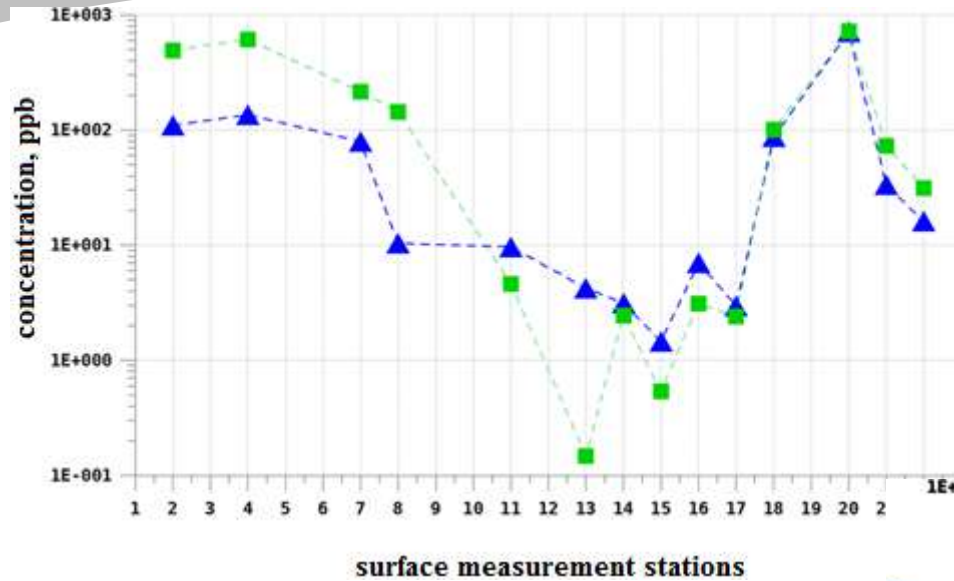
Изоповерхности концентрации (результат моделирования)



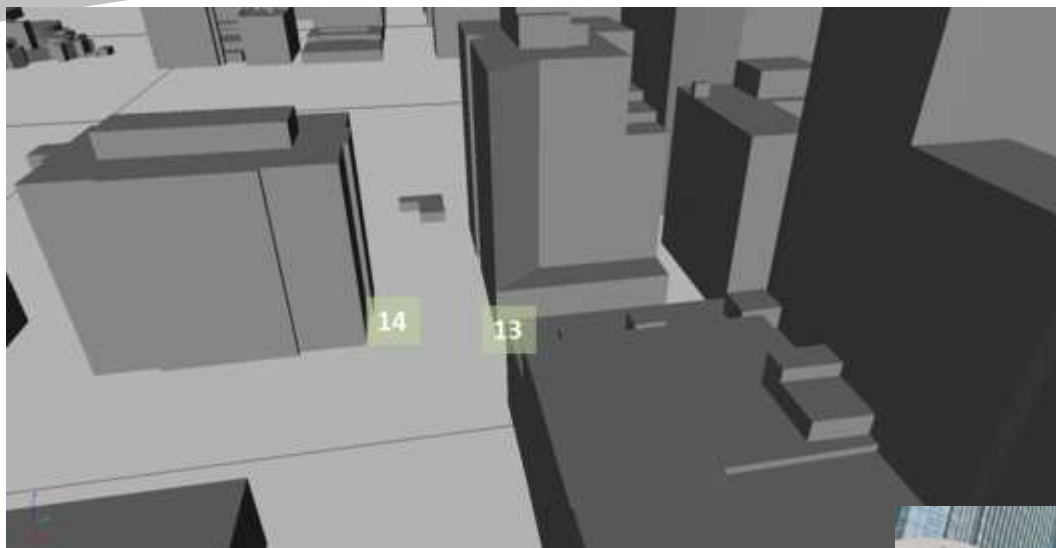
Точки измерения



Концентрации, полученные с помощью разработанной модели и данные измерений

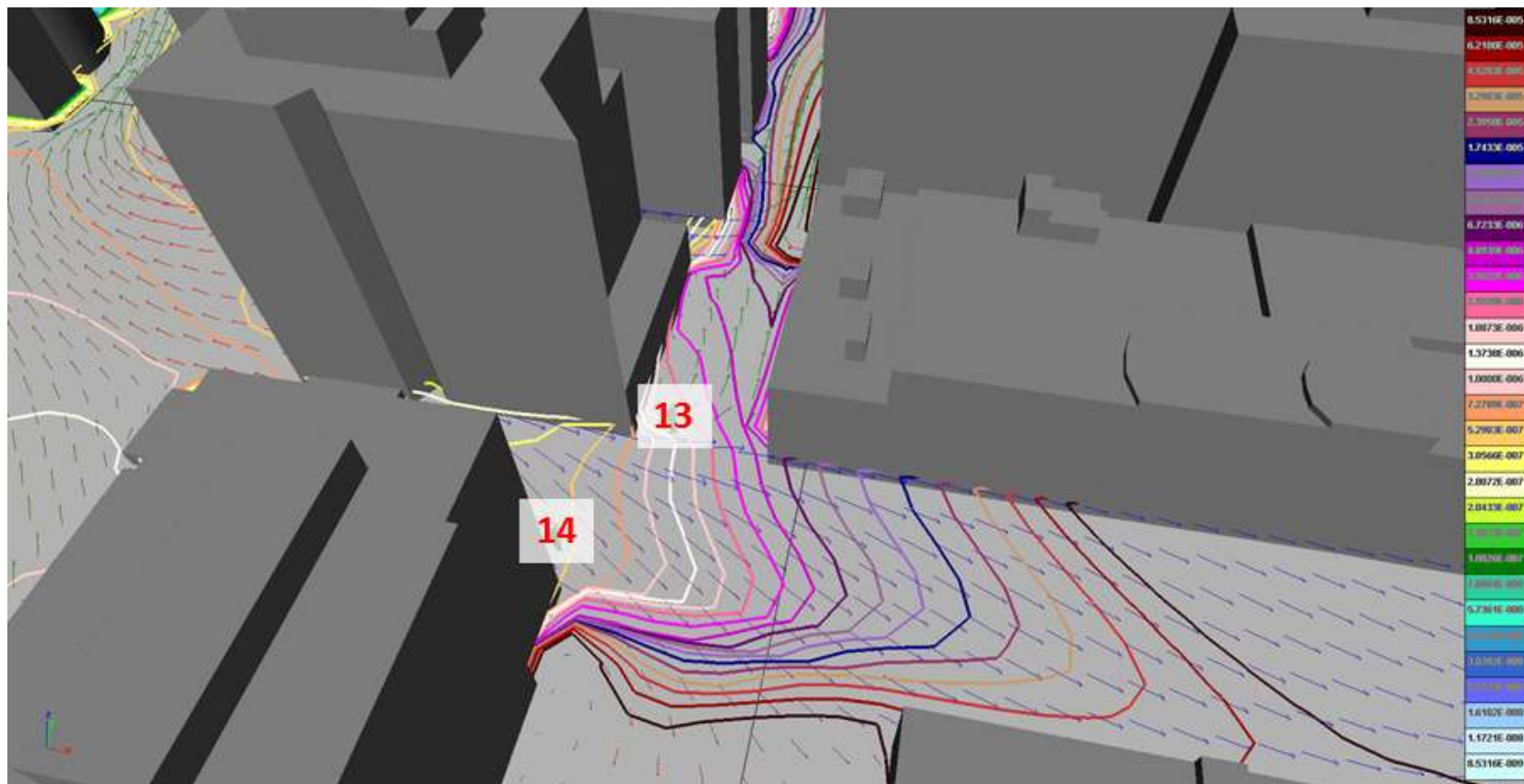


3D модель и реальная застройка



Открытая конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова.
2018

Изолинии концентрации вблизи точек измерения 13 и 14

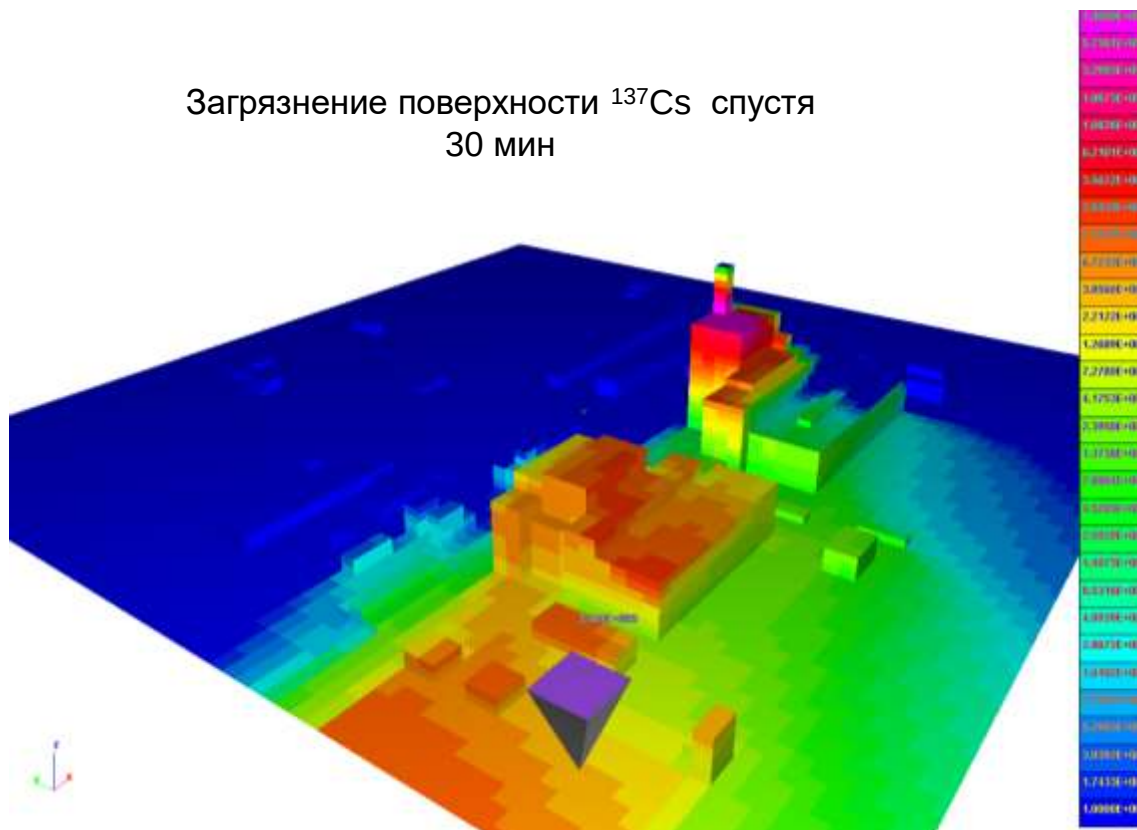


Открытая конференция ИСП РАН им. В.П. Иванникова.
2018

Гипотетическая авария на Белоярской АЭС «Потеря системного и надёжного электроснабжения (отказ активных систем остановки реактора, отказ САОТ)»

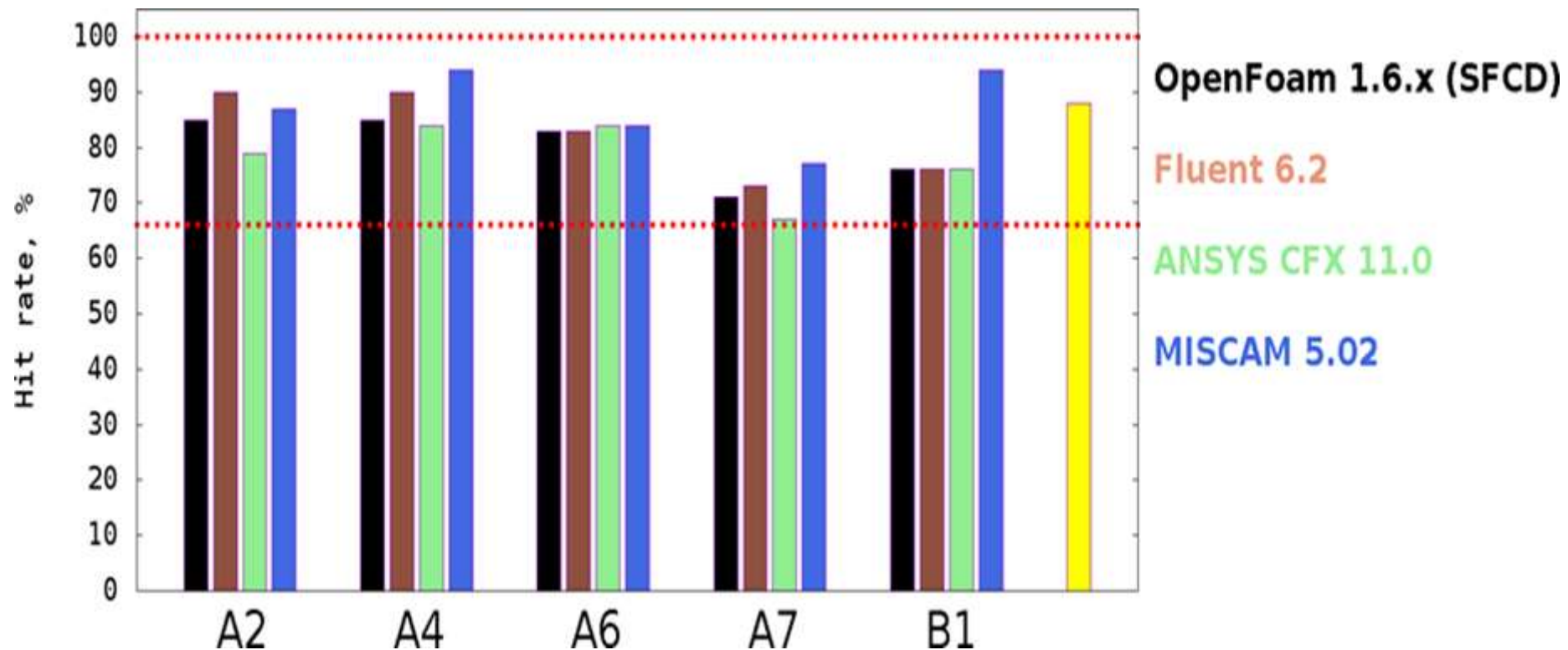
Разгерметизация **25 %** твэлов АЗ, которые имеют максимальное выгорание.
Выброс в атмосферу ^{137}Cs - $5 \cdot 10^{13}$ Бк, ^{133}Xe – $9.5 \cdot 10^{14}$ Бк, ^{135}Xe – $7 \cdot 10^{11}$ Бк.

Загрязнение поверхности ^{137}Cs спустя
30 мин



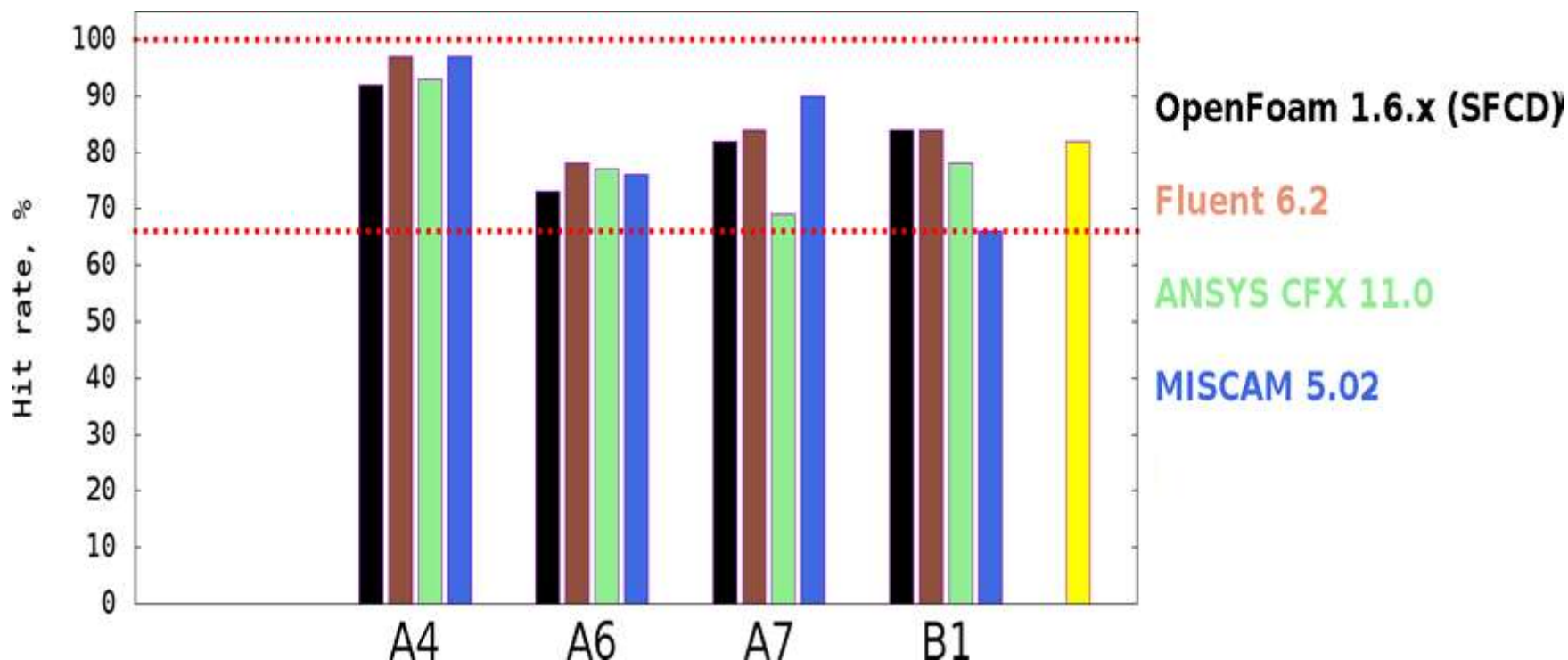
Кросс-верификация с зарубежными расчетными кодами

Сравнение критерия Hit-Rate для продольной компоненты скорости ветра в экспериментах серии A и B между различными моделями



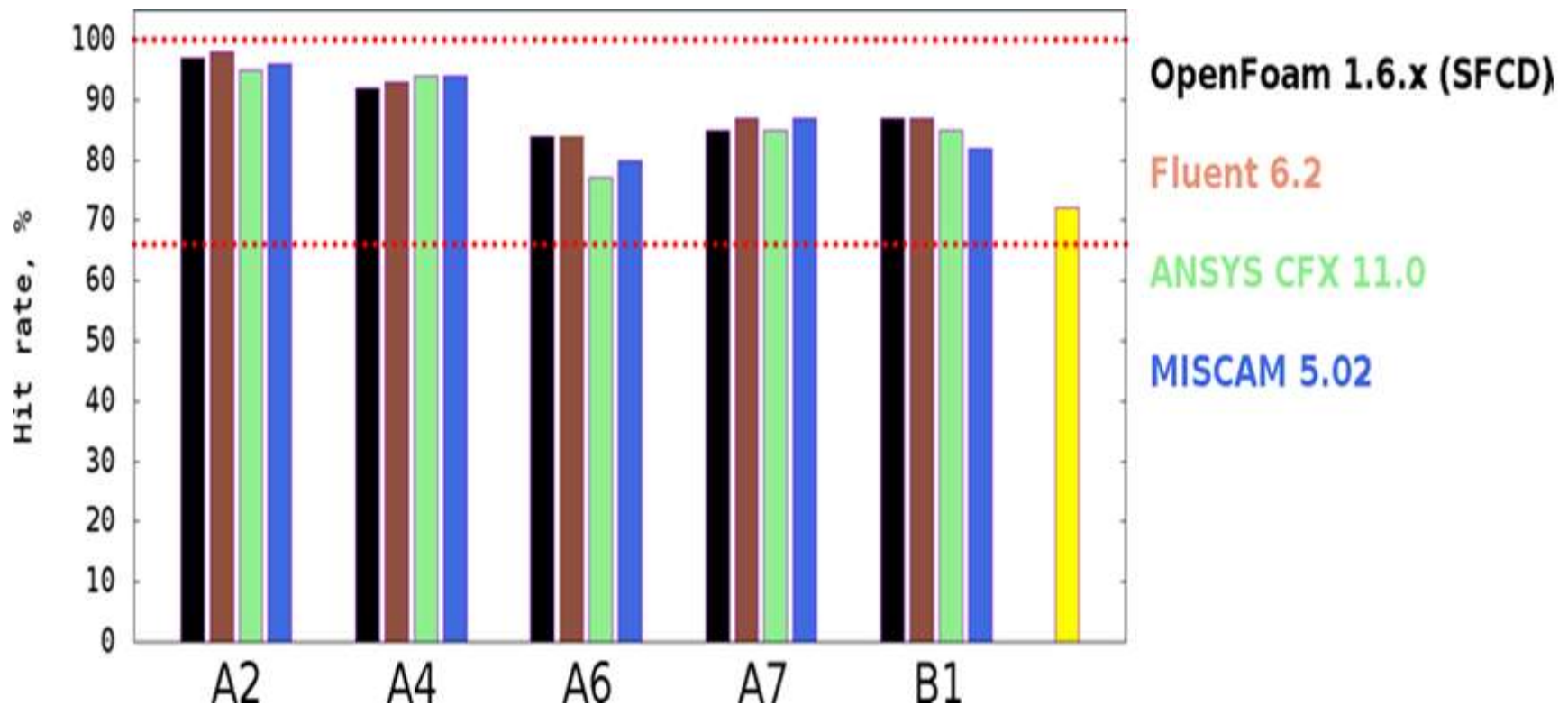
Кросс-верификация с зарубежными расчетными кодами

Сравнение критерия Hit-Rate для поперечной компоненты скорости ветра в экспериментах серии A и B между различными моделями



Кросс-верификация с зарубежными расчетными кодами

Сравнение критерия Hit-Rate для вертикальной компоненты скорости ветра в экспериментах серии A и B между различными моделями



Заключение

- В соответствии с современными тенденциями в прикладной вычислительной метеорологии была разработана надежная CFD модель.
- Матрица верификации разработанной модели и расчётного кода содержит различные данные, полученные как из крупномасштабных натурных экспериментов в условиях реального города (Оклахома-сити), так и из данных лабораторных экспериментов.
- Показано, что разработанная модель удовлетворяет критериям качества моделирования, определенным экспертным сообществом для моделей такого же класса