

**Микромасштабные
метеорологические модели
атмосферной циркуляции и
распространения
радиоактивного загрязнения
в условиях городской или
промышленной застройки.
Интегрированные коды
нового поколения.
Сорокикова О.С.,
ИБРАЭ РАН, г. МОСКВА**

Коды нового поколения для РОСАТОМА

- Цели создания

До настоящего времени для обоснования безопасности проектируемых и строящихся АЭС используют довольно простые коды.

Приемочные критерии обоснования безопасности ужесточаются.

Есть научно – производственные предприятия с фактором радиационного риска в черте города.

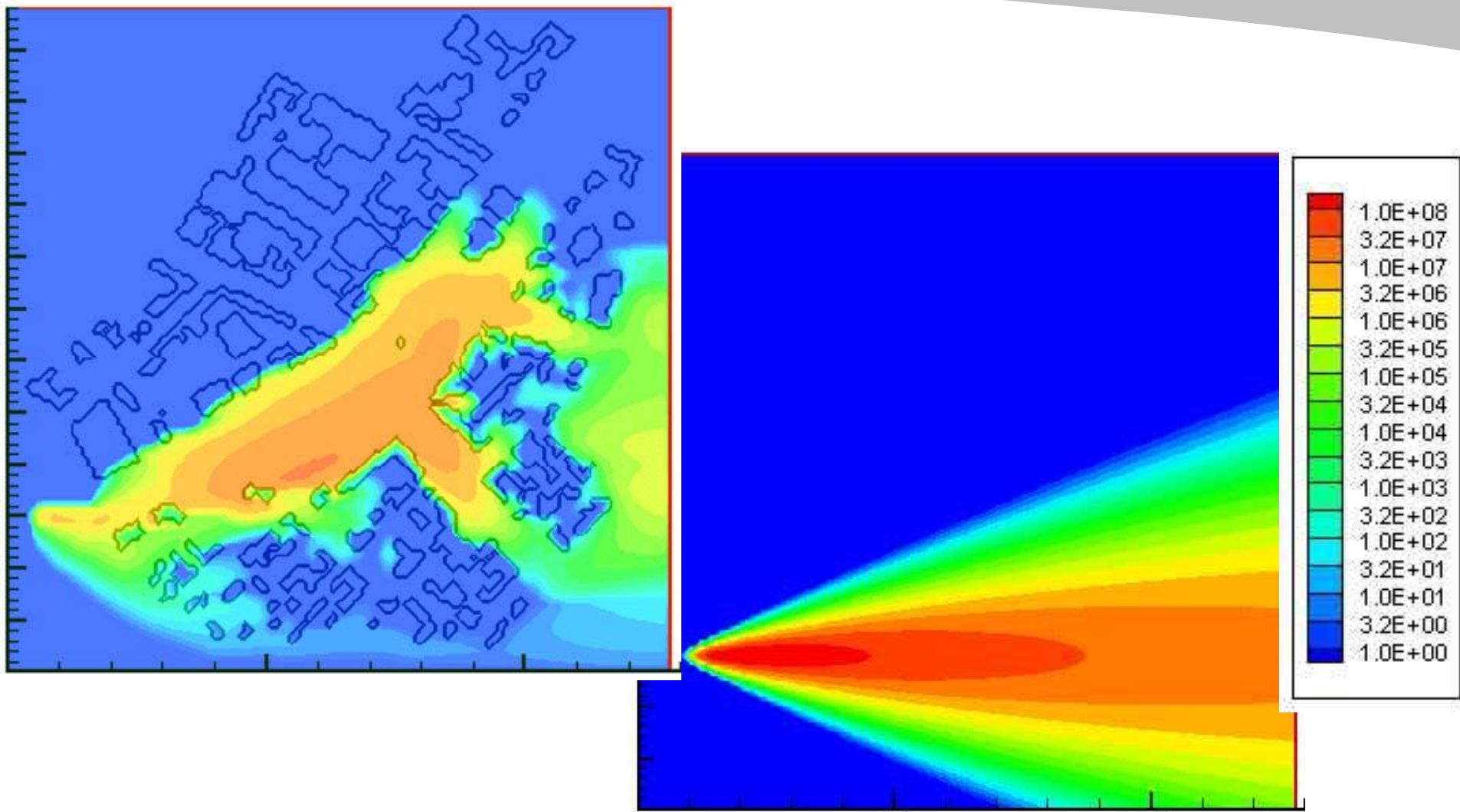
Необходимо улучшать качество моделирования, за счет снятия излишней консервативности, более точных и детальных прогнозов.

Коды нового поколения для РОСАТОМА

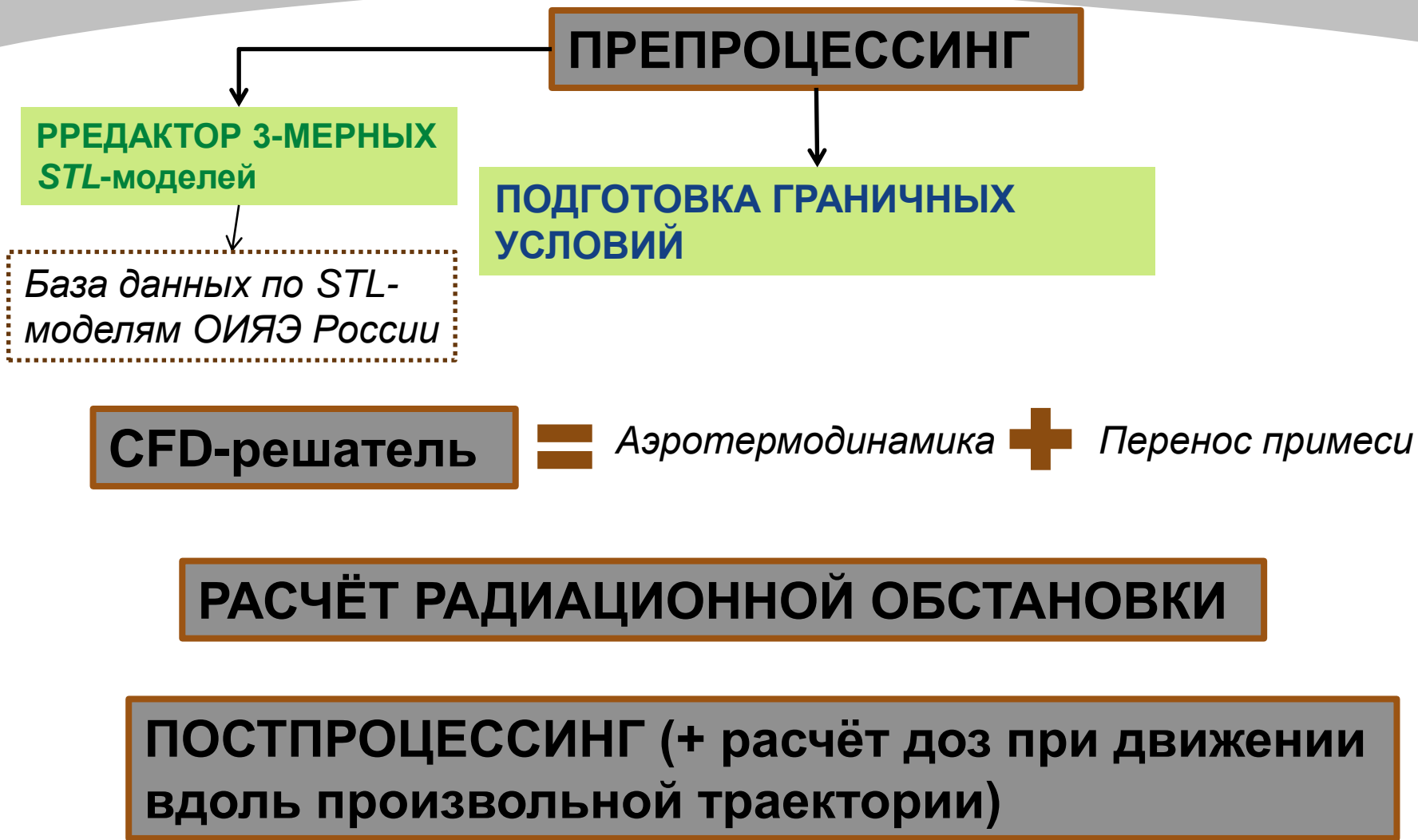
Молодежный коллектив разработчиков:

- Дзама Д.
- Благодатских Д.
- Лозинг Н.
- Устинов Г.

Концентрации. Гауссова и 3D модели



Интегральный код расчёта радиационной обстановки на промплощадке



Требования к интегральным кодам нового поколения

Код должен быть доведён до состояния отчуждаемого от разработчика.

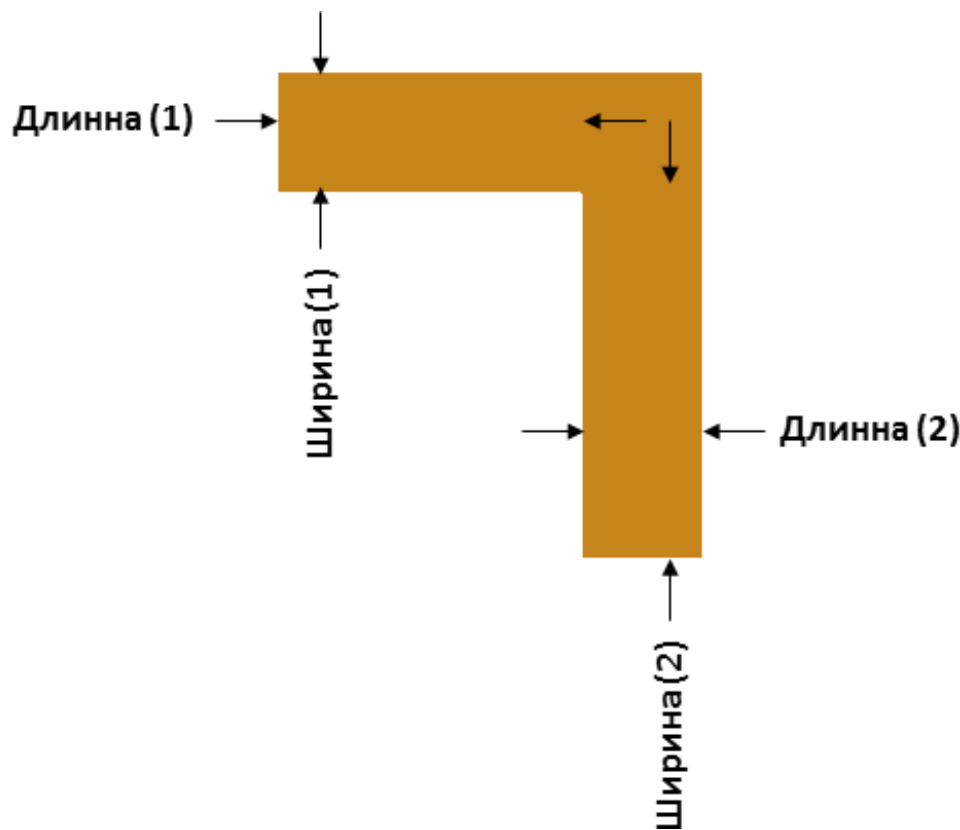
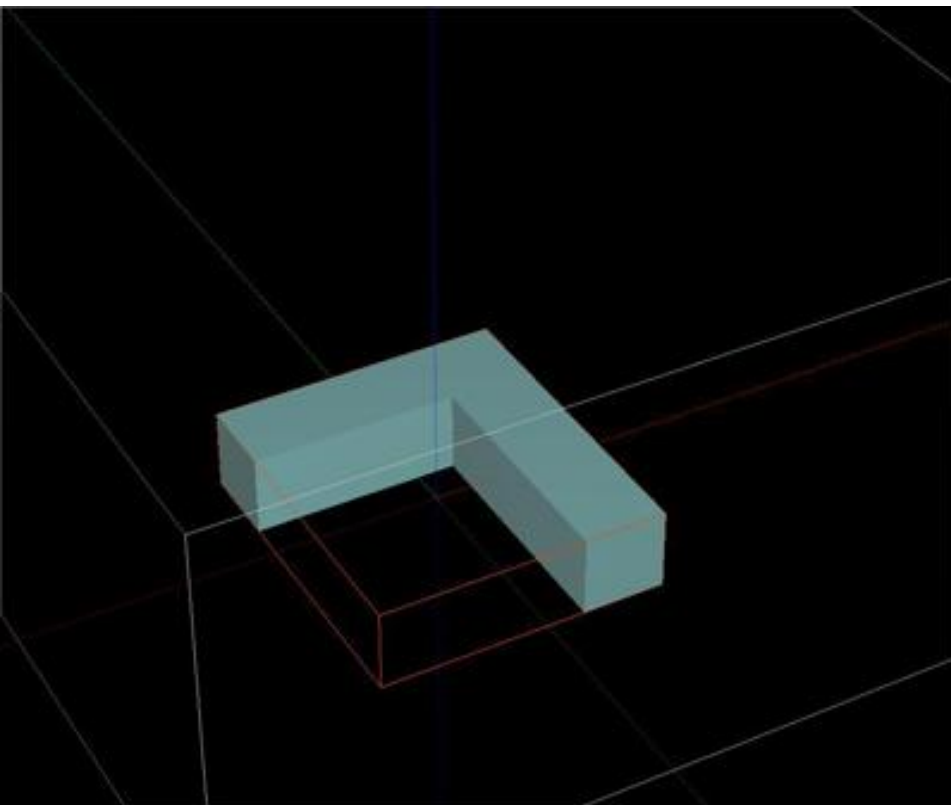
Должен быть снабжён полным пакетом необходимой документации:

- 1) руководство пользователя;
- 2) описание и обоснование используемых моделей;
- 3) верификационный отчёт, включая статистические характеристики оценки качества результатов расчёта на основе сравнения с экспериментальными данными
- 4) кросс-верификация с наиболее известными мировыми аналогами (если они есть)
- 5) аттестация интегрального кода, проведение экспертизы РОСТЕХНАДЗОРОМ

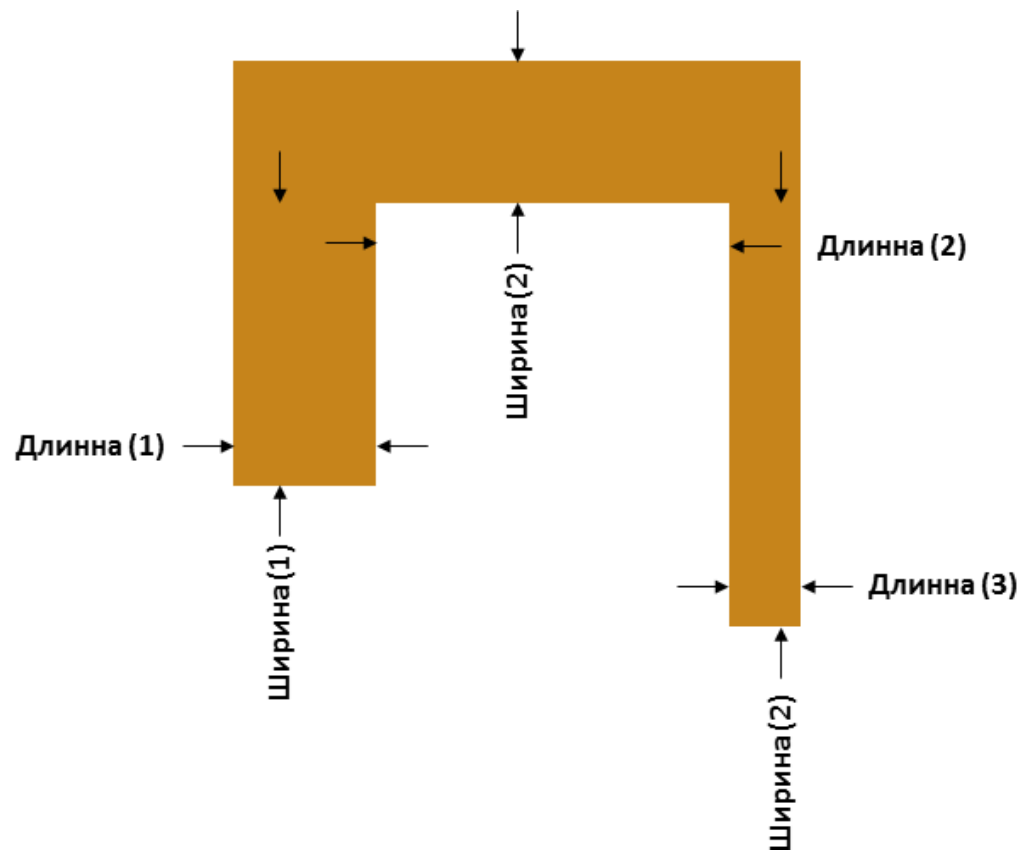
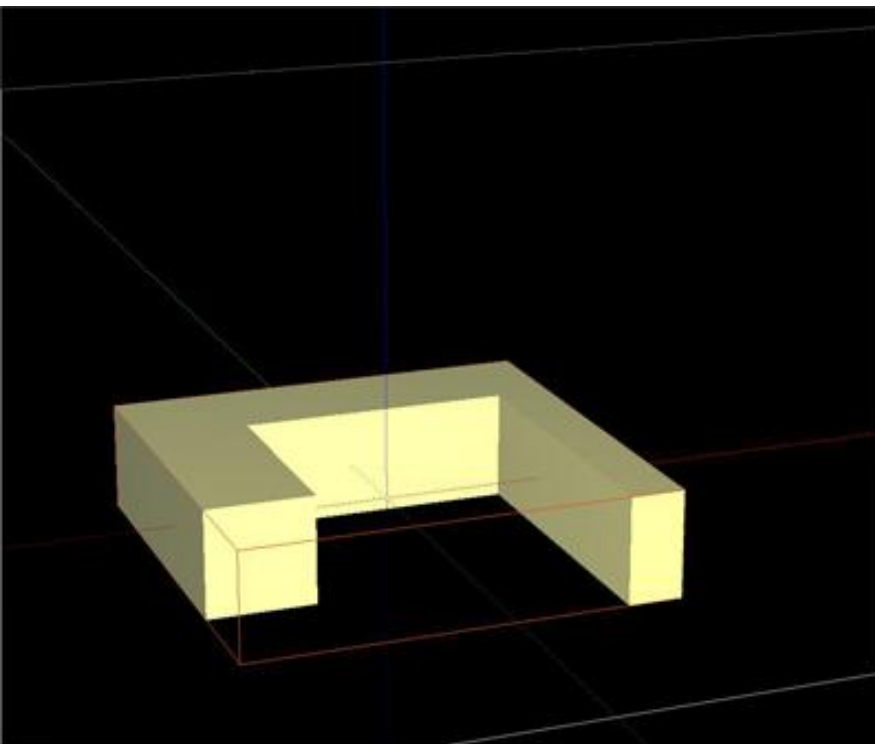
Имеющийся в ИБРАЭ РАН задел на начало работ

- Код разрабатывался в части аэротермодинамики частично на основе кода CONV-3D (LES версии), который был при помощи создания новых модулей преобразован в RANS модель атмосферных процессов в условиях застройки с новыми моделями турбулентности применительно к конкретным атмосферным задачам.
- Использовались имеющиеся в ИБРАЭ РАН модели дозовых нагрузок, по разным путям облучения.

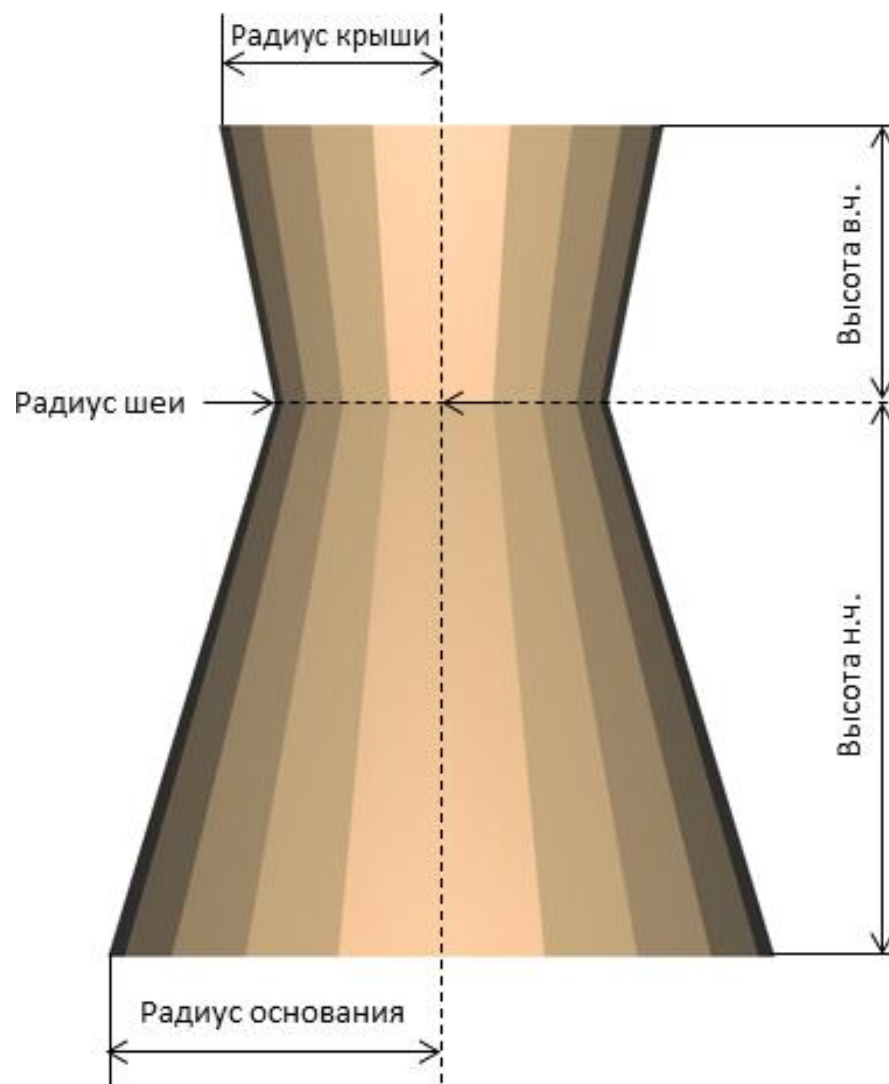
Пример типовой заготовки (элемент здания)



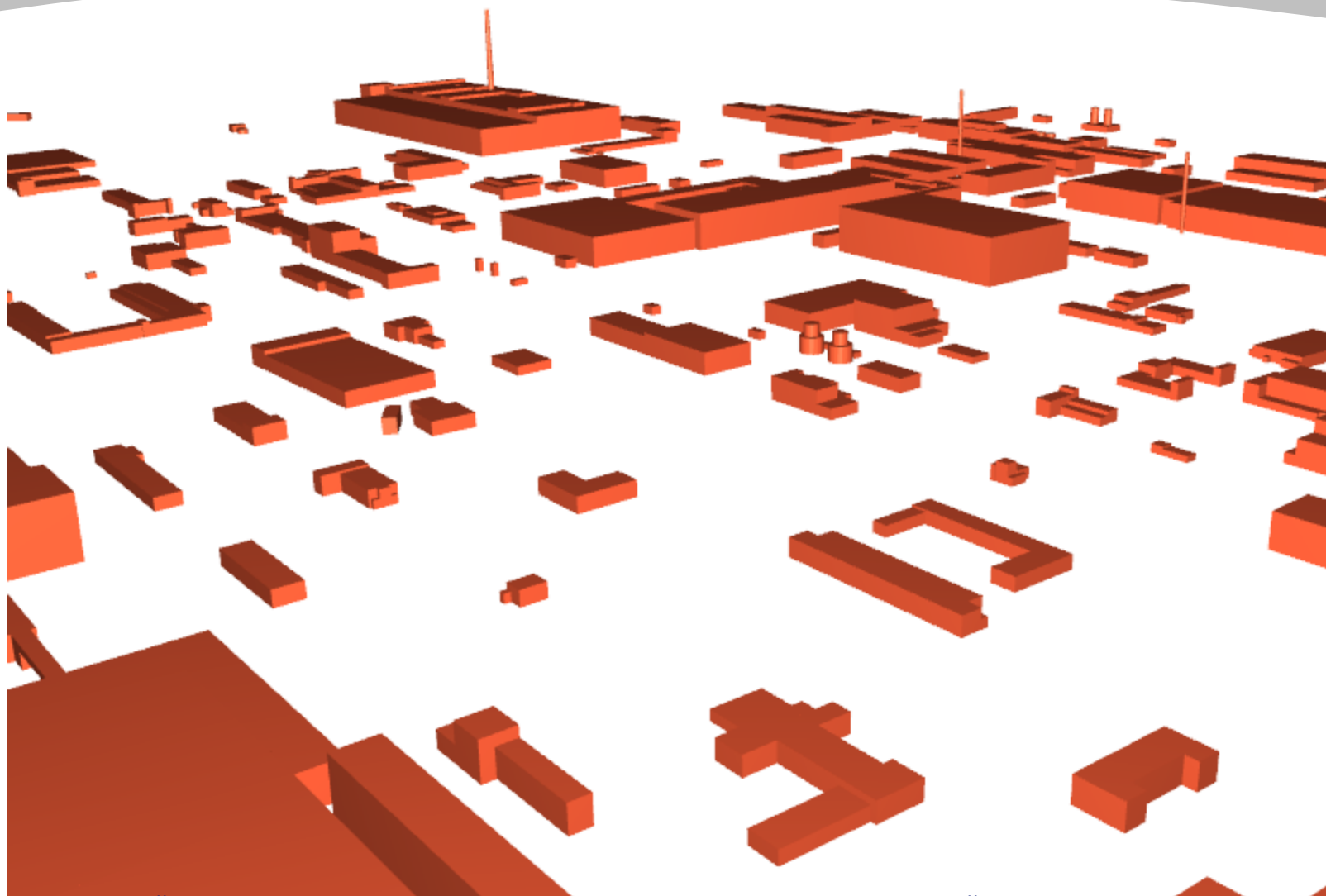
Пример типовой заготовки (элемент здания)



Пример типовой заготовки (элемент здания)

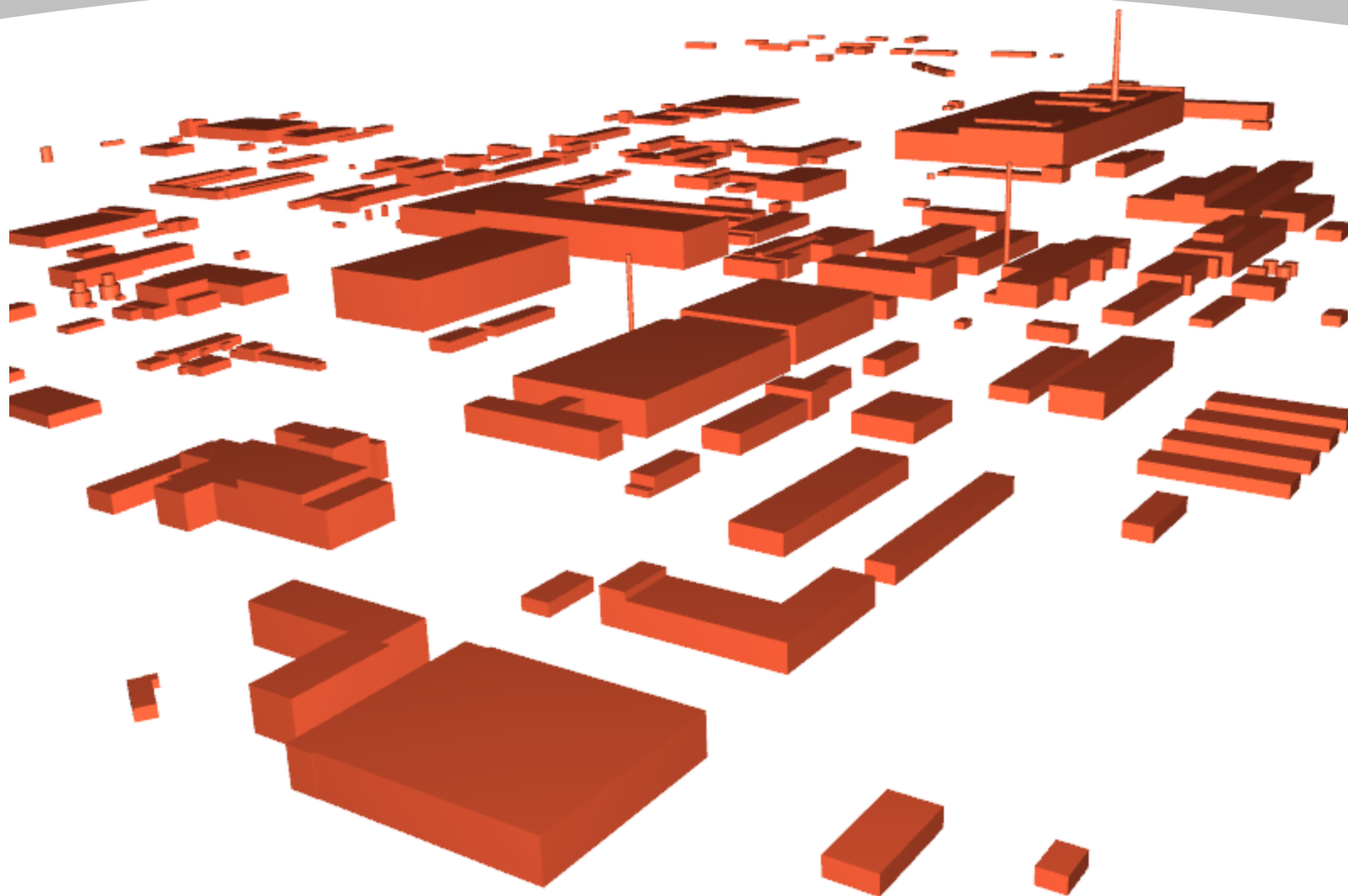


МАШ Электросталь



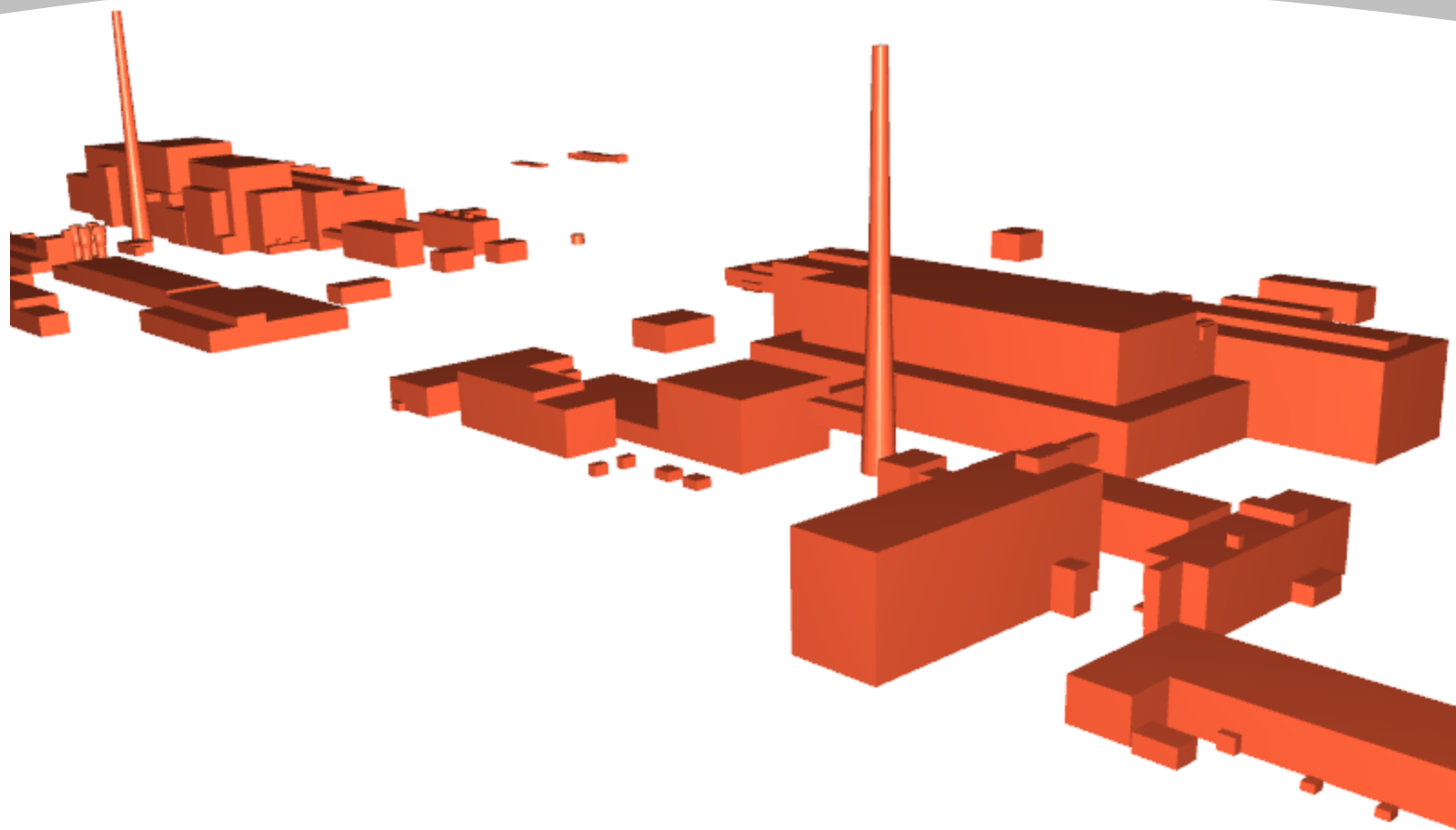
XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

МАШ Электросталь

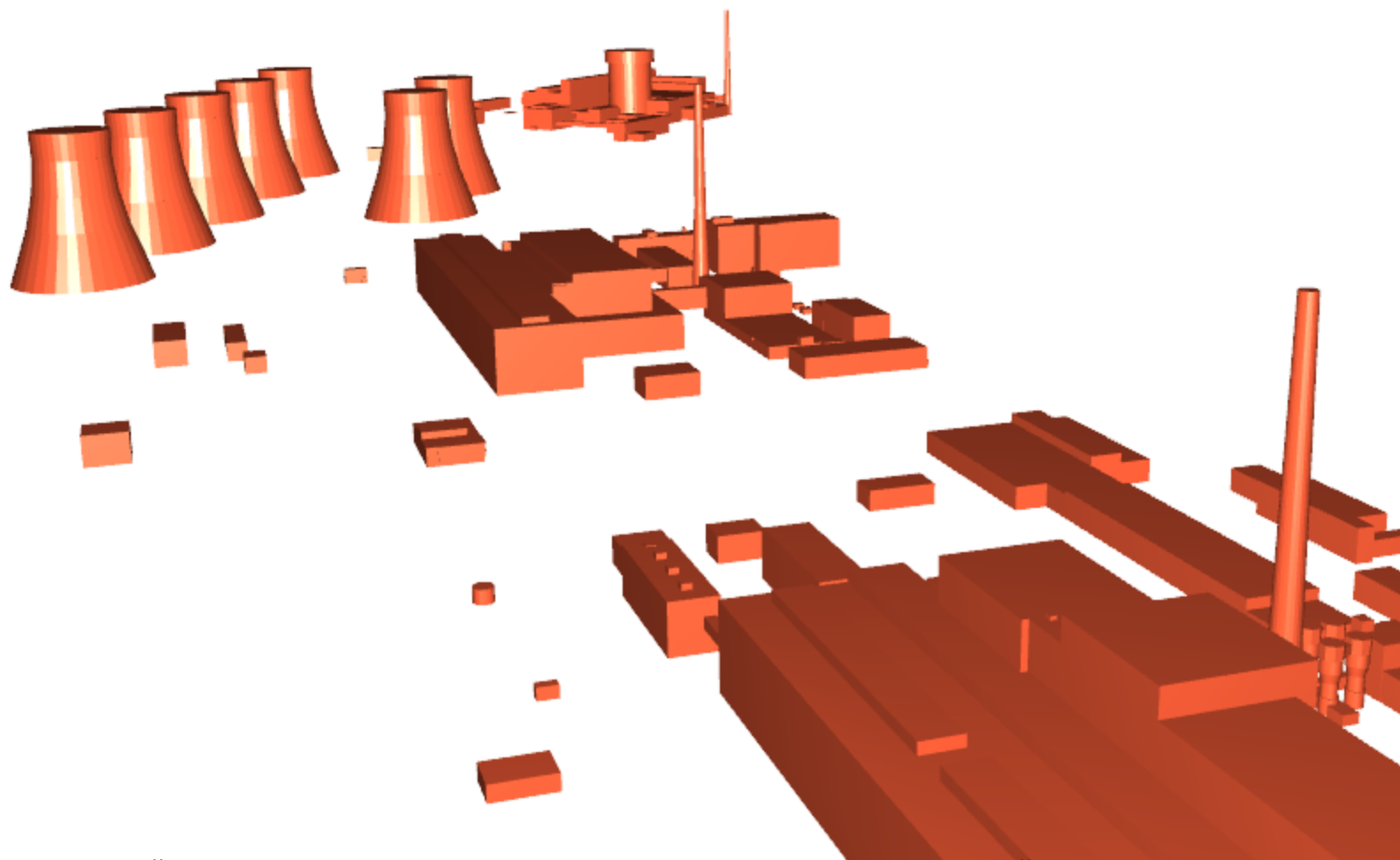


XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

Нововоронежская АЭС

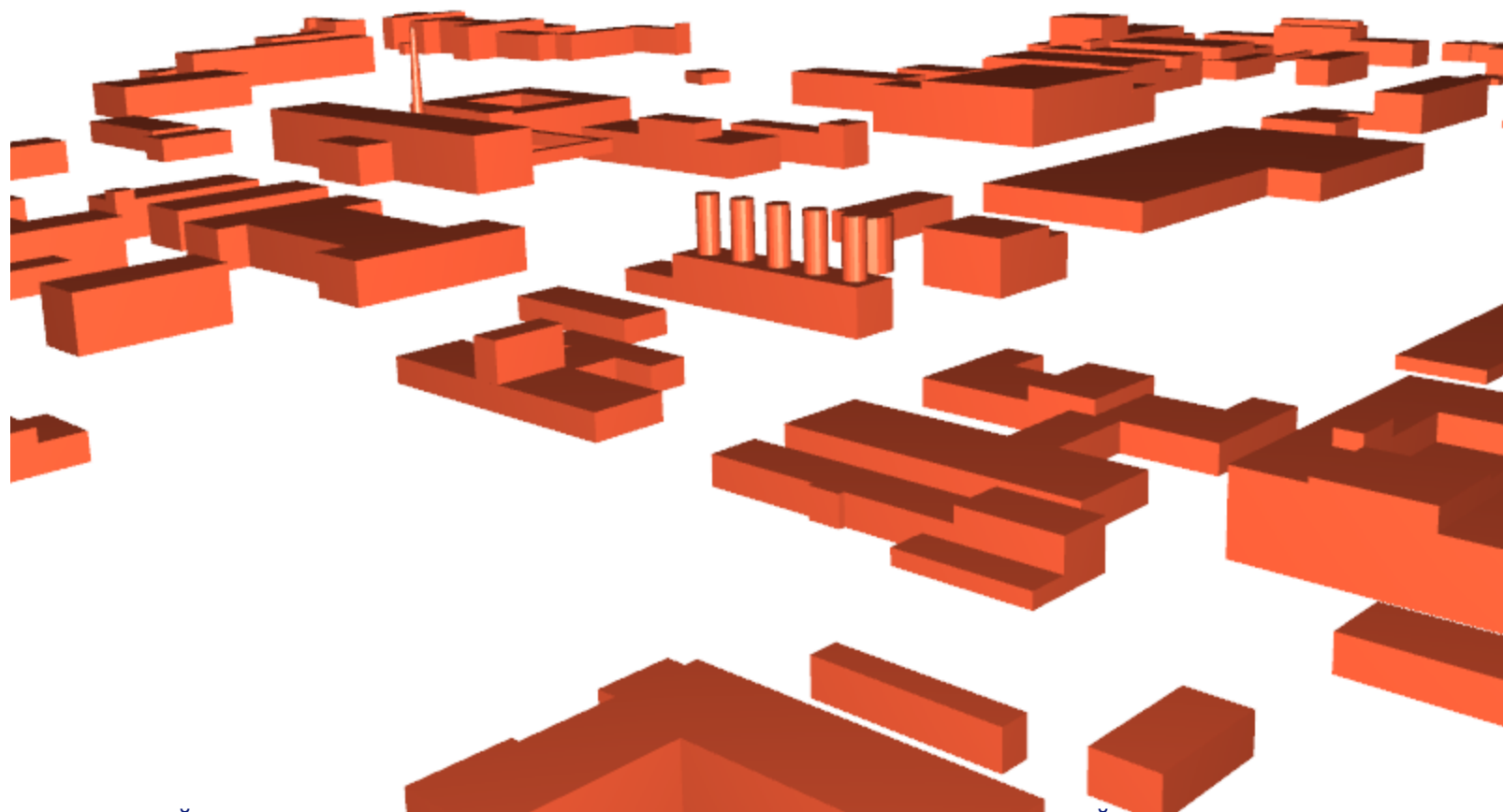


Нововоронежская АЭС



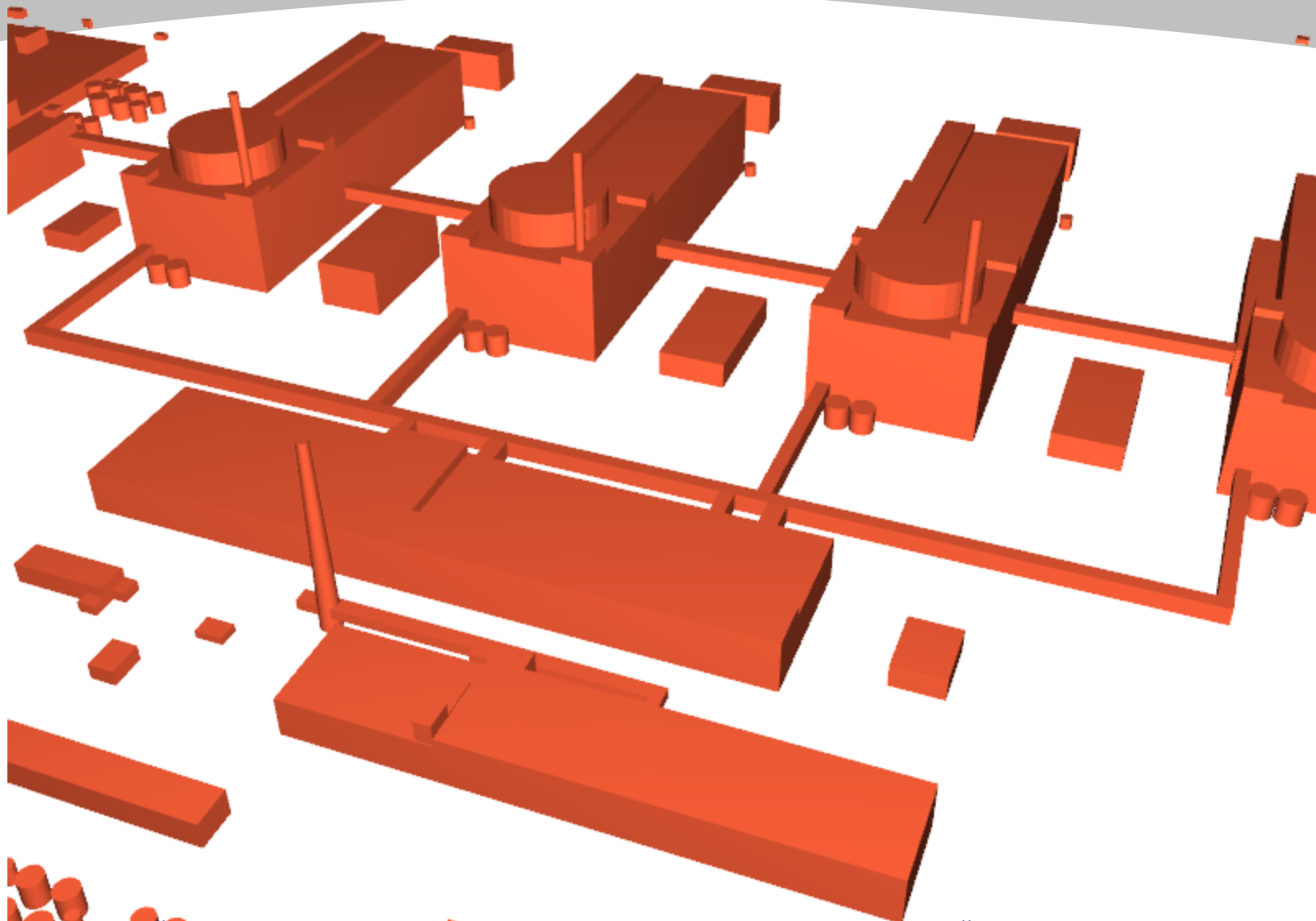
XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ"

Курчатовский институт



XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

Балаковская АЭС



XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ "СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ"

Основные уравнения вычислительной гидродинамики для несжимаемой жидкости

Закон сохранения массы $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial \rho u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{(\mu + \mu_t)}{\sigma} \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i}$

$\rho = \text{const} \quad \frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0$

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

Закон сохранения энергии $\frac{\partial \theta}{\partial t} + \frac{\partial \theta u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma} \frac{\partial \theta}{\partial x_i} \right]}{\partial x_i} + Q'_\theta$

ρ — плотность

μ, μ_t — кинетическая и турбулентная вязкость

u_i — вектор скорости потока

P — давление

g_i — вектор гравитации $(0, 0, -g)$

θ — потенциальная температура

Q_θ — источники тепла

σ — константа, соответствующая модели турбулентности

P_0 — давление у поверхности земли (обычно 100 кПа)

T — температура воздуха в данной точке пространства.

$$\theta = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{R/c_p} = T \left(\frac{P_0}{P} \right)^{0,2857}$$

Модель турбулентности

Турбулентная кинетическая энергия $\frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial k u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] + S + G - \varepsilon$

$$S = \mu_t \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad G = -\beta g \frac{\mu_T}{\sigma_t} \frac{\partial \theta}{\partial z}$$

Скорость диссипации ТКЭ $\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \frac{\partial \varepsilon u_i}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\frac{\mu + \mu_t}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] + \frac{\varepsilon}{k} (C_1 S + C_3 G) - C_2 \frac{\varepsilon^2}{k}$

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

Константы модели

$$\sigma_t = 0,9 \quad \sigma_k = 1 \quad \sigma_\varepsilon = 1,3 \quad C_1 = 1,21 \quad C_2 = 1,92 \quad C_3 = 1,44 \quad C_\mu = 0,03$$

Специальные граничные условия на энергию турбулентности и диссипацию в приповерхностных ячейках:

$$k = \frac{u_*^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad \varepsilon = \frac{u_*^3}{\kappa z} \quad u^* = \kappa \frac{u(z)}{\ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + \varphi(S)} \quad \mu_T = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} = \kappa z u^*$$

- u_* - оценка динамической скорости (напряжения трения в вязком подслое);
- $u(z)$ - скорость ветра на высоте z ;
- $\varphi(S)$ - поправка на стратификацию;
- κ - постоянная Кармана (0,41).

Робастные специализированные CFD модели

Разработана специализированная RANS CFD модель (использует теорию подобия Мони́на-Обухова с поправками на стратификацию). Она позволяет:

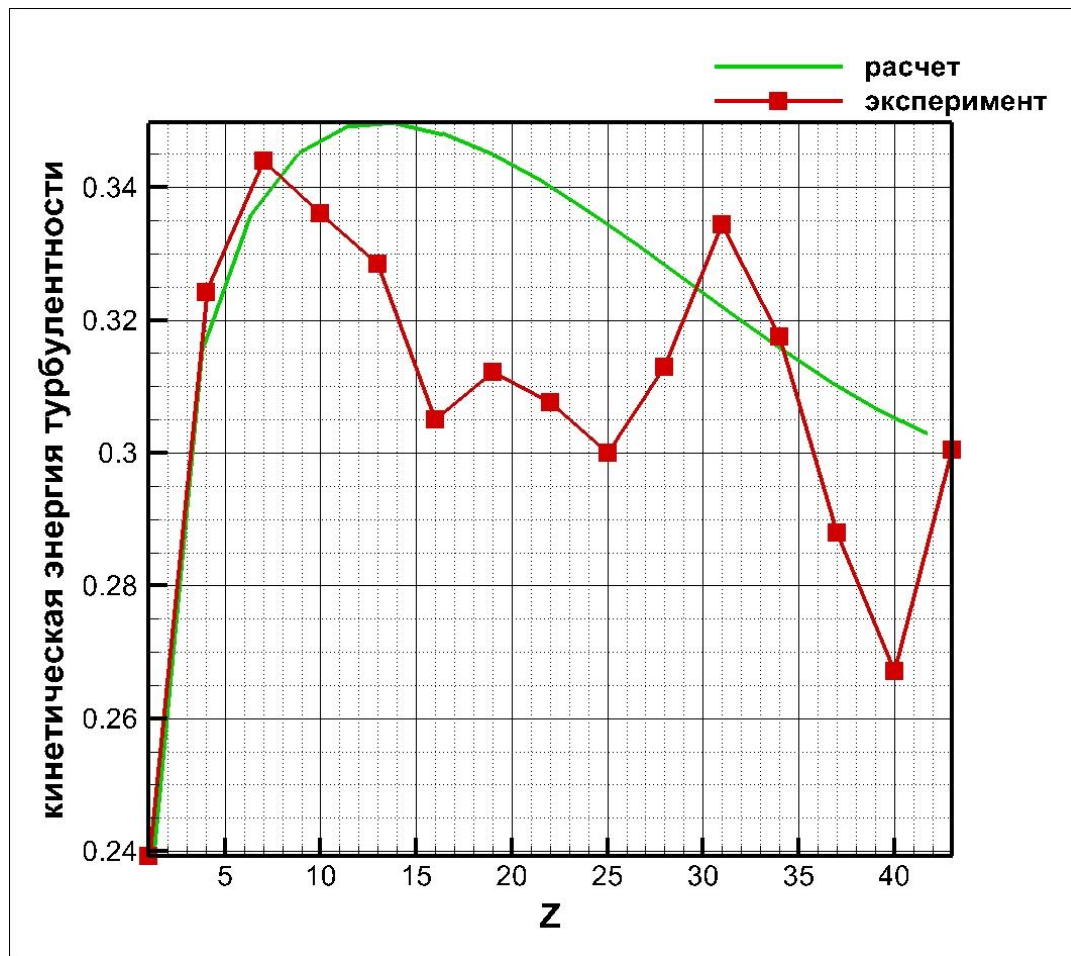
- учитывать стратификацию атмосферы (устойчивая, нейтральная, неустойчивая);
- использовать для расчета грубые сетки и избавиться от необходимости сгущения расчетной сетки около поверхности, что позволяет существенно ускорить счет.

1D модель турбулентности набегающего потока

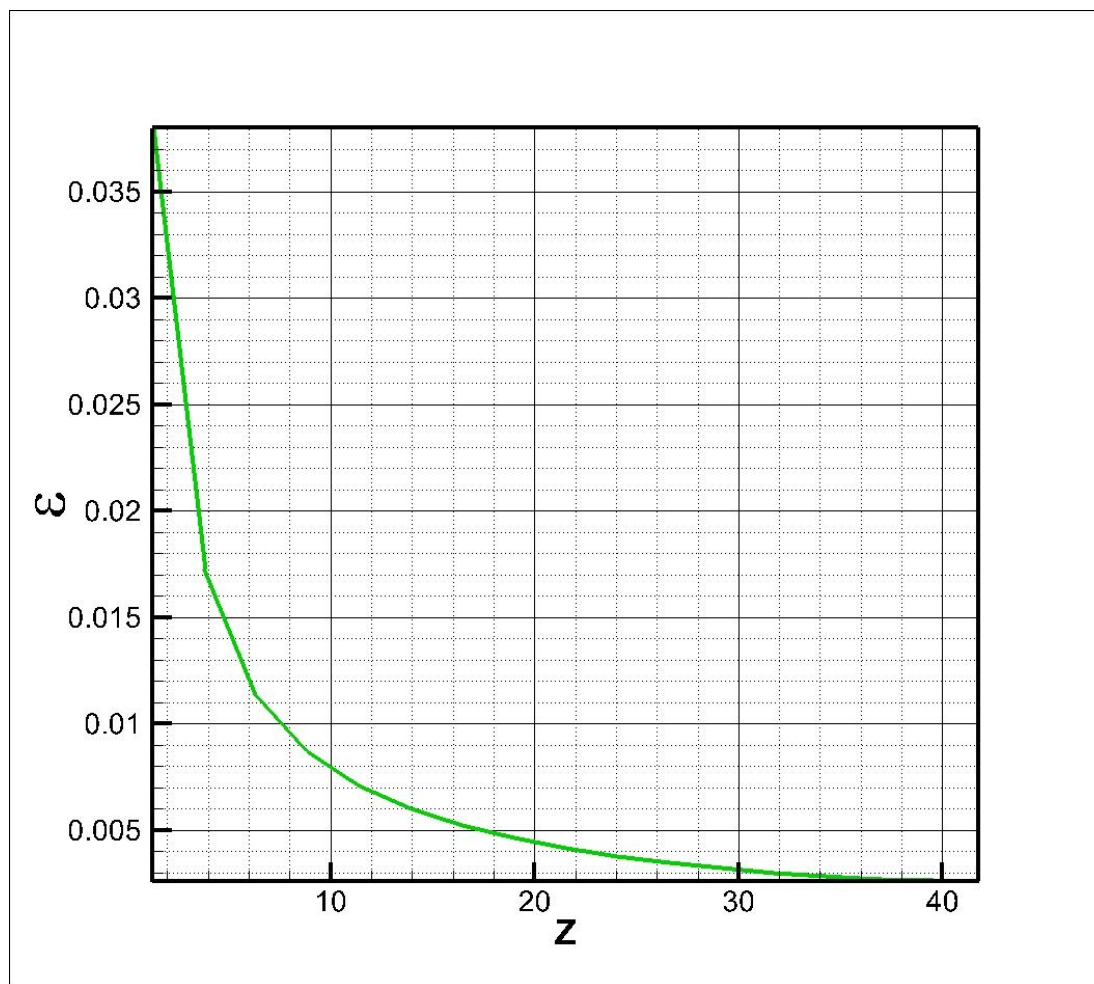
$$\frac{\partial k}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial z} \right] + S - \varepsilon$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right] + \frac{\varepsilon}{k} C_{\varepsilon 1} S - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}$$

Расчетный и измеренный профиль турбулентности



Профиль энергии диссипации



Матрица верификации

- Полевые и натурные эксперименты вплоть до крупномасштабных экспериментов в условиях реального современного города (оцифрованные базы данных).
- Лабораторные исследования, на специальных установках с моделями объектов, городов, строений разной степени сложности (оцифрованные базы данных).

В базе данных содержится более 15 тысяч измерений скорости ветра и более 3 тысяч измерений концентраций.

Источник информации – опубликованные в журналах данные, БД, доступные через интернет и базы данных переданные в ИБРАЭ РАН Ливерморской лабораторией

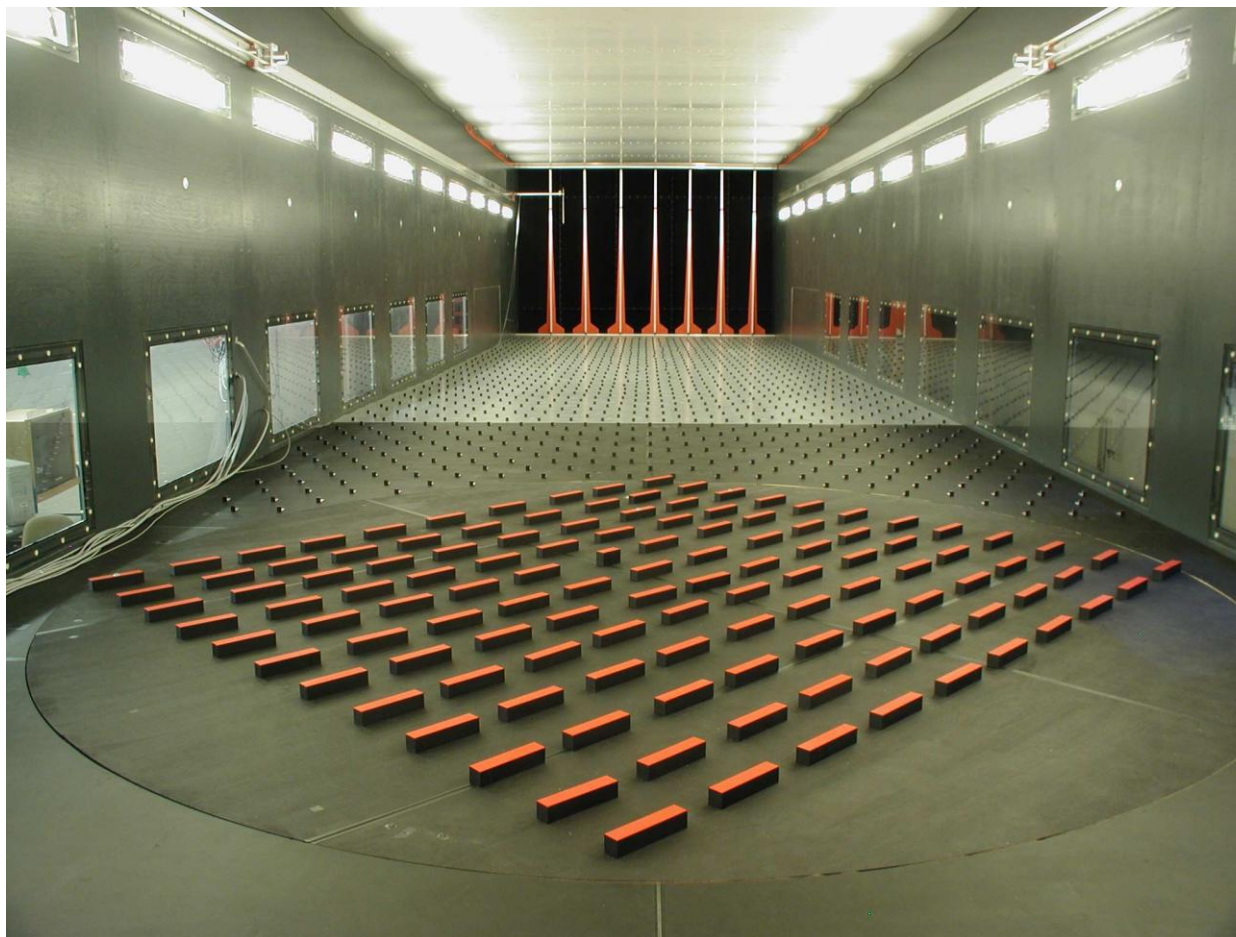
Матрица верификации

- Полевые и натурные эксперименты вплоть до крупномасштабных экспериментов в условиях реального современного города (оцифрованные базы данных).
- Лабораторные исследования, на специальных установках с моделями объектов, городов, строений разной степени сложности (оцифрованные базы данных).

В базе данных содержится более 15 тысяч измерений скорости ветра и более 3 тысяч измерений концентраций.

Источник информации – опубликованные в журналах данные, БД, доступные через интернет и переданные в ИБРАЭ Ливерморской лабораторией

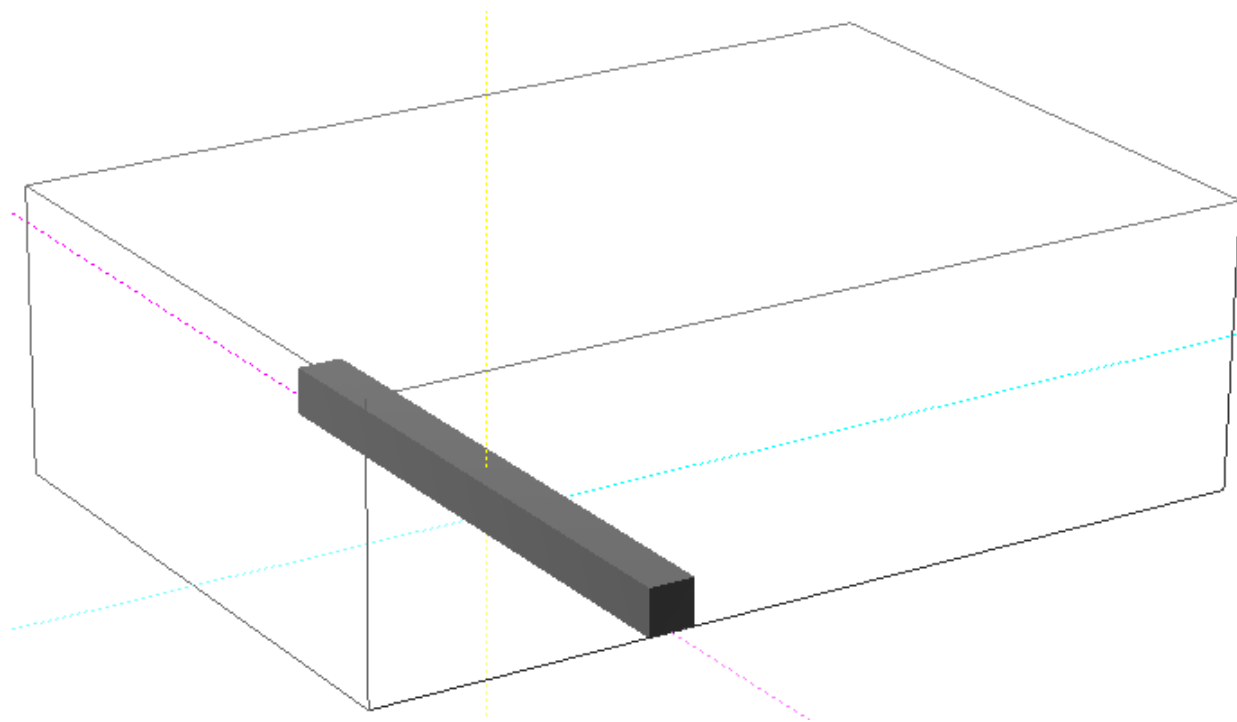
Лабораторный аналог COST-MUST



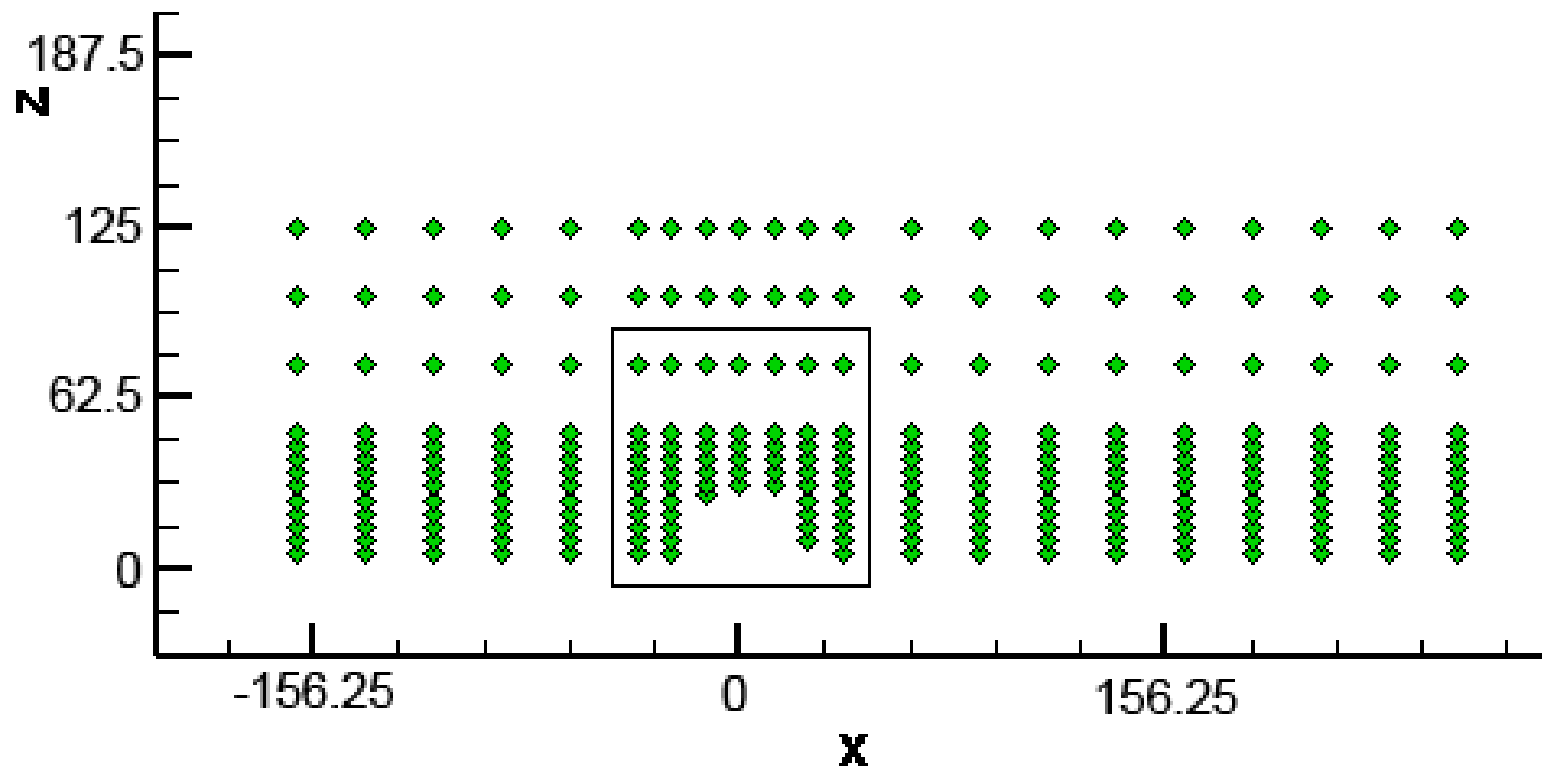
Установка «WOTAN», Гамбург, Германия.

XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

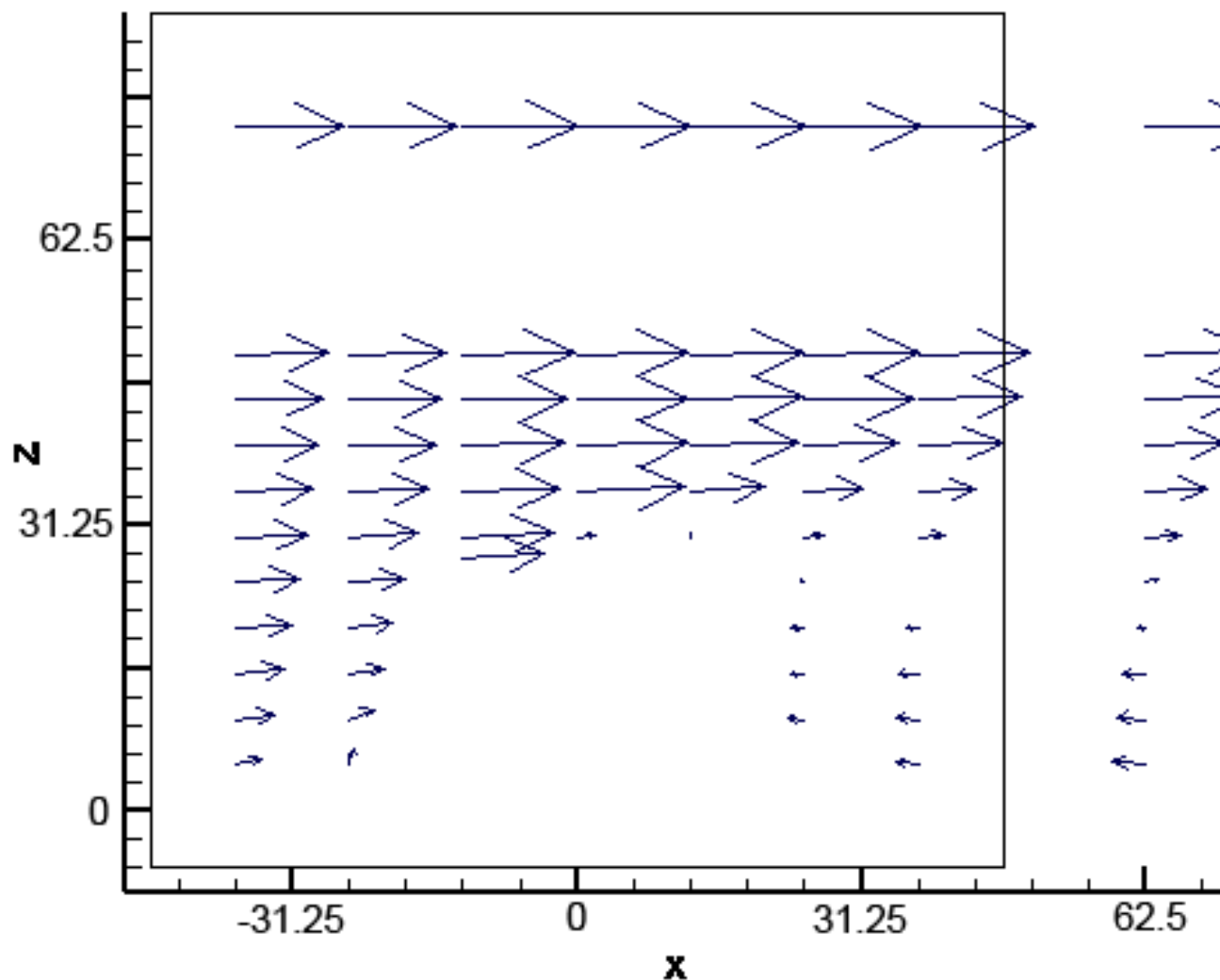
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (препятствие)



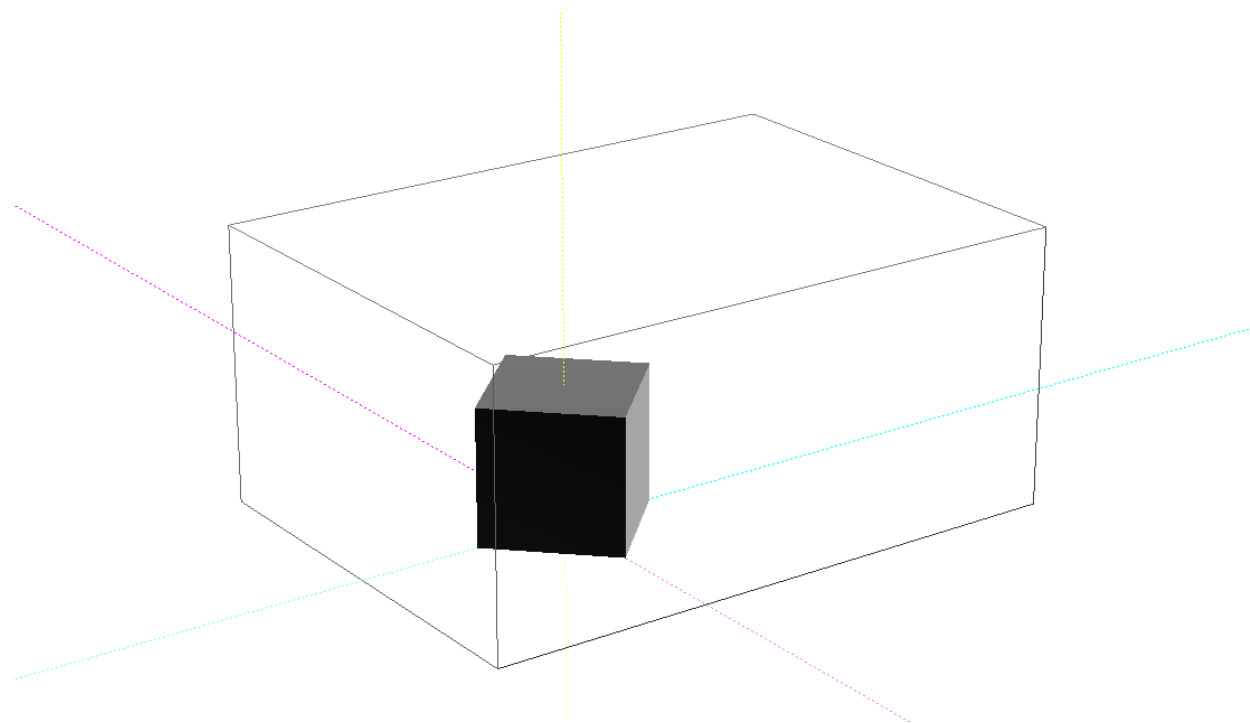
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (измерительная сеть скоростей потока)



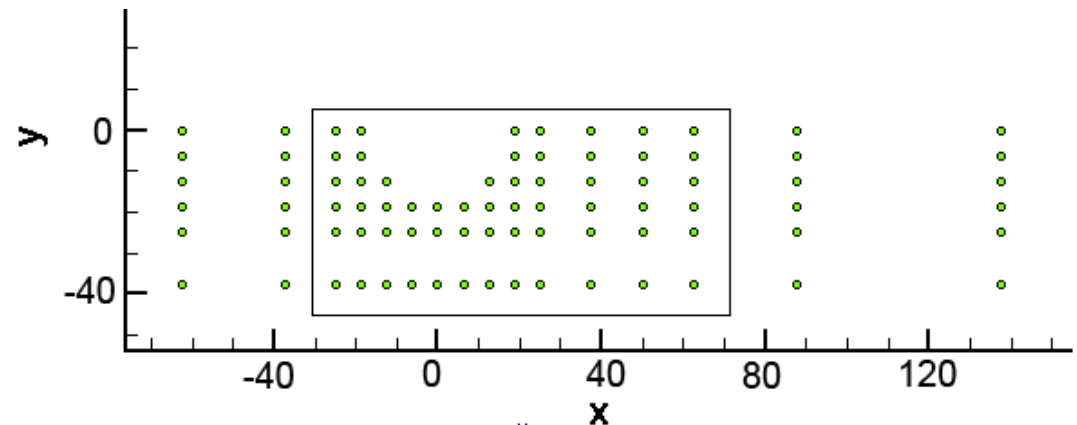
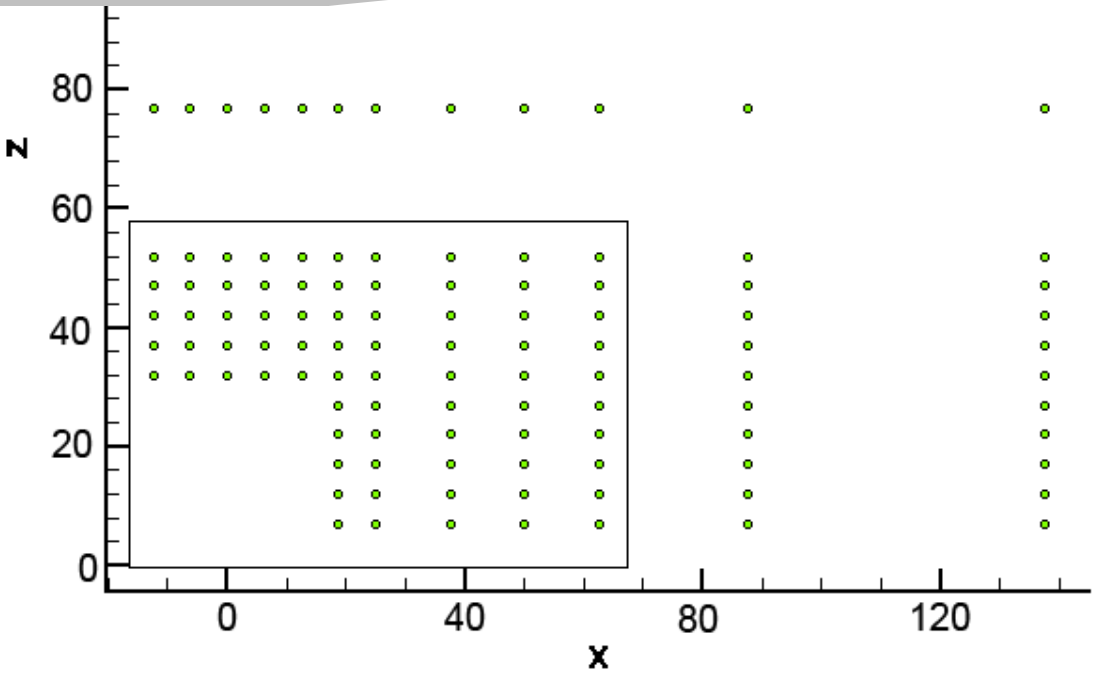
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (скорости потока в сечении)



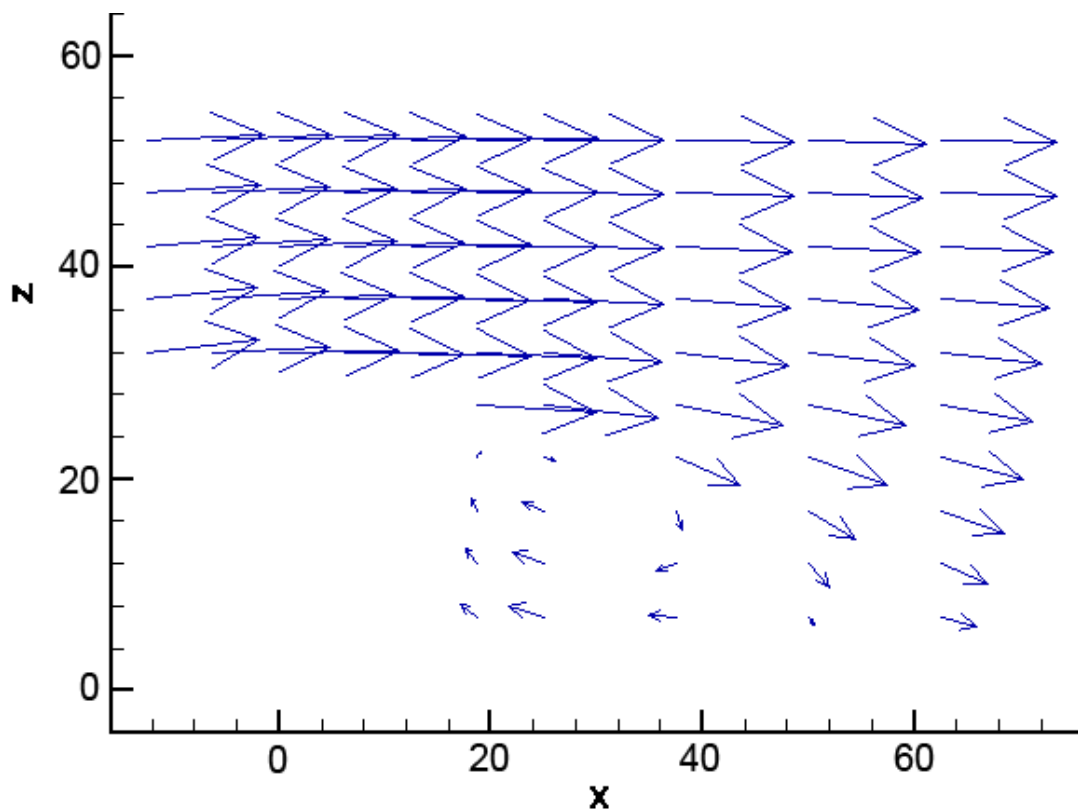
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (препятствие)



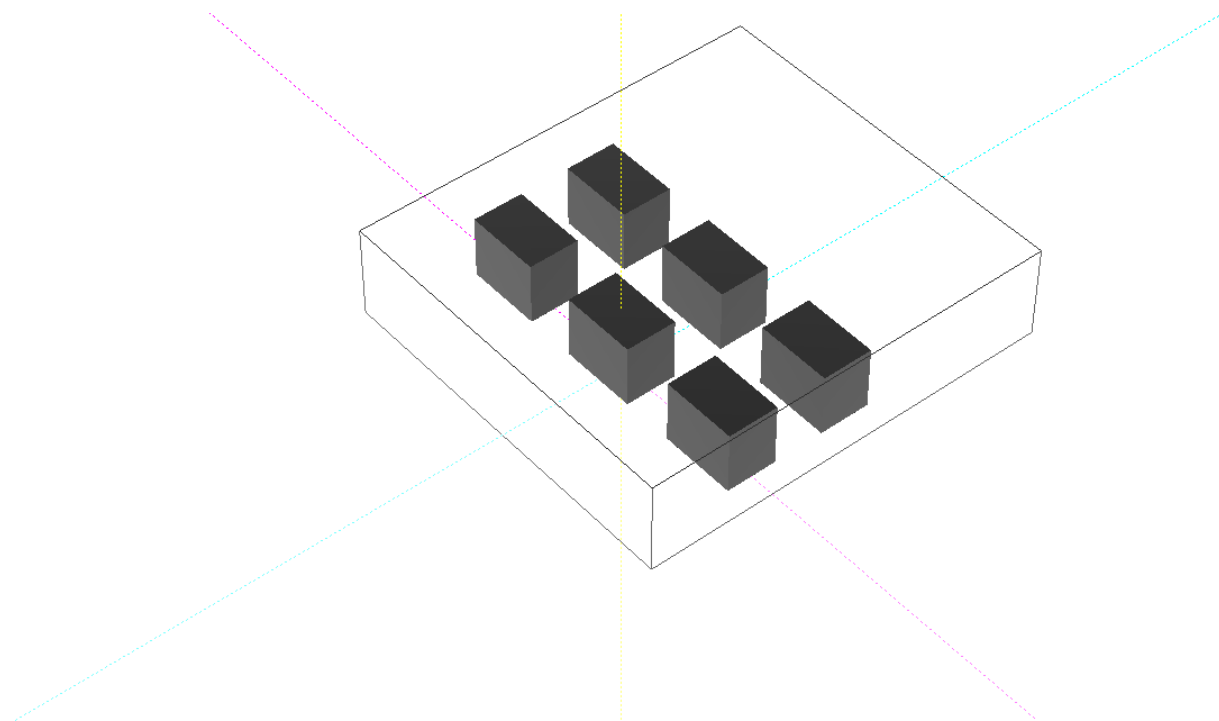
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (измерительная сеть скоростей потока)



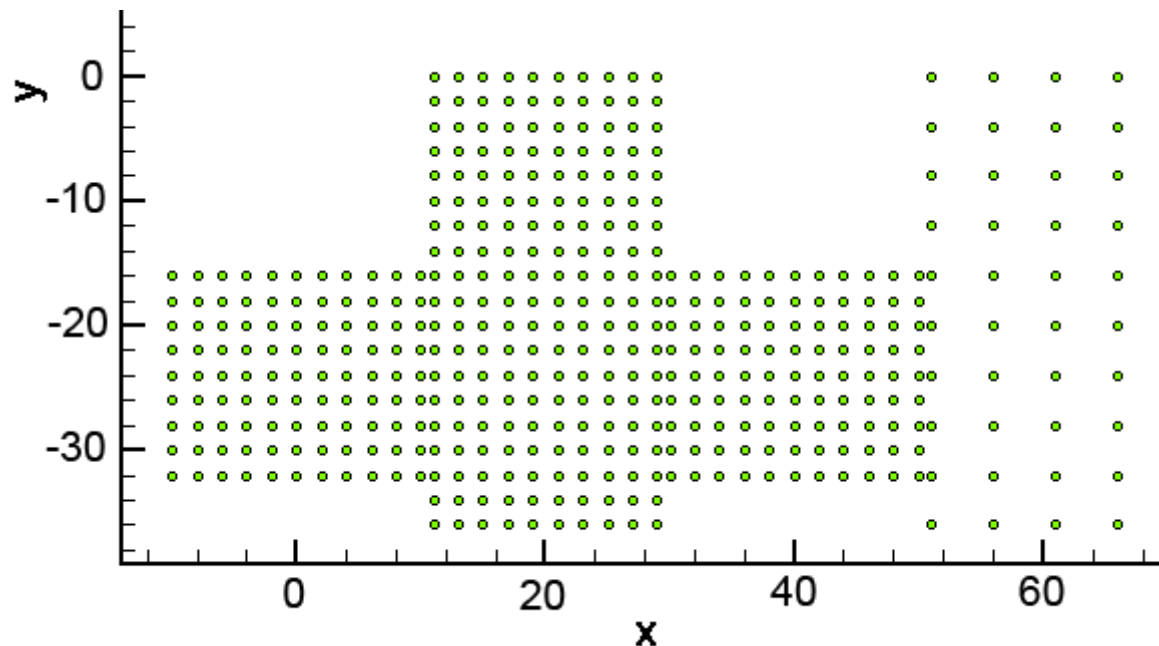
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (скорости потока в сечении)



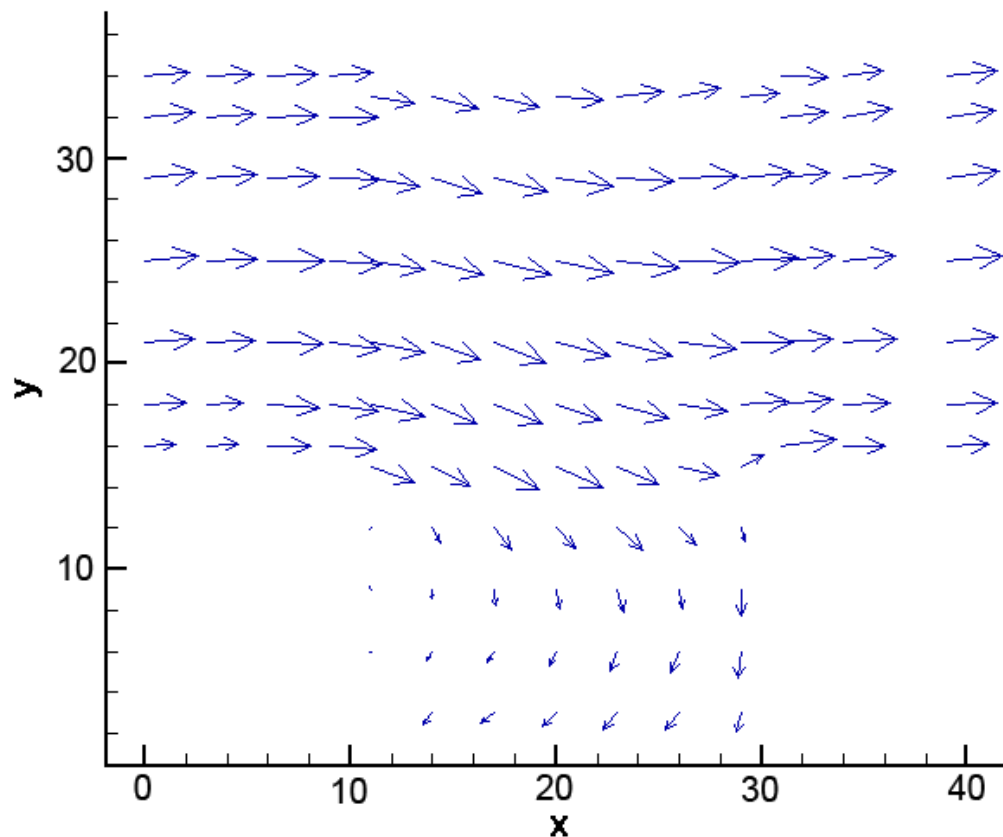
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (препятствие)



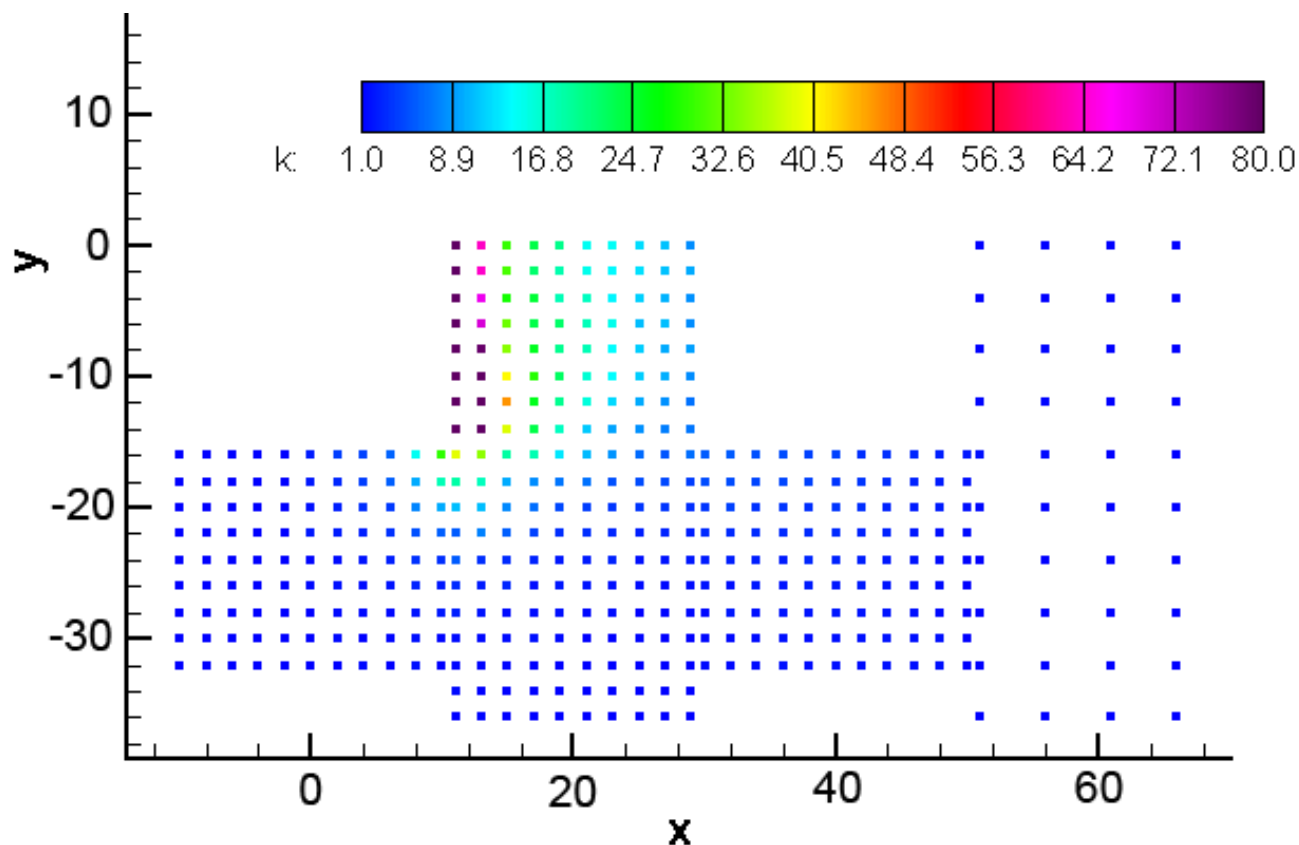
Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (измерительная сеть скоростей потока)



Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (скорости потока в сечении)



Пример результатов обработки данных экспериментов установки WOTAN (измерительная сеть концентрации трассера)



Немецкая установка SEDVAL



XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

Пустыня Большого Бассейна, США, 2001.



MUST - Mock Urban Setting Trial.

119 контейнеров размером $12.2 \times 2.42 \times 2.54$ м

Граничные условия

$$\frac{u}{U_{ref}}(z) = \frac{u^*}{U_{ref}} \left[\frac{1}{\kappa} \ln \left(\frac{z}{k_s} \right) + 8.5 \right]$$

u^* - динамическая скорость

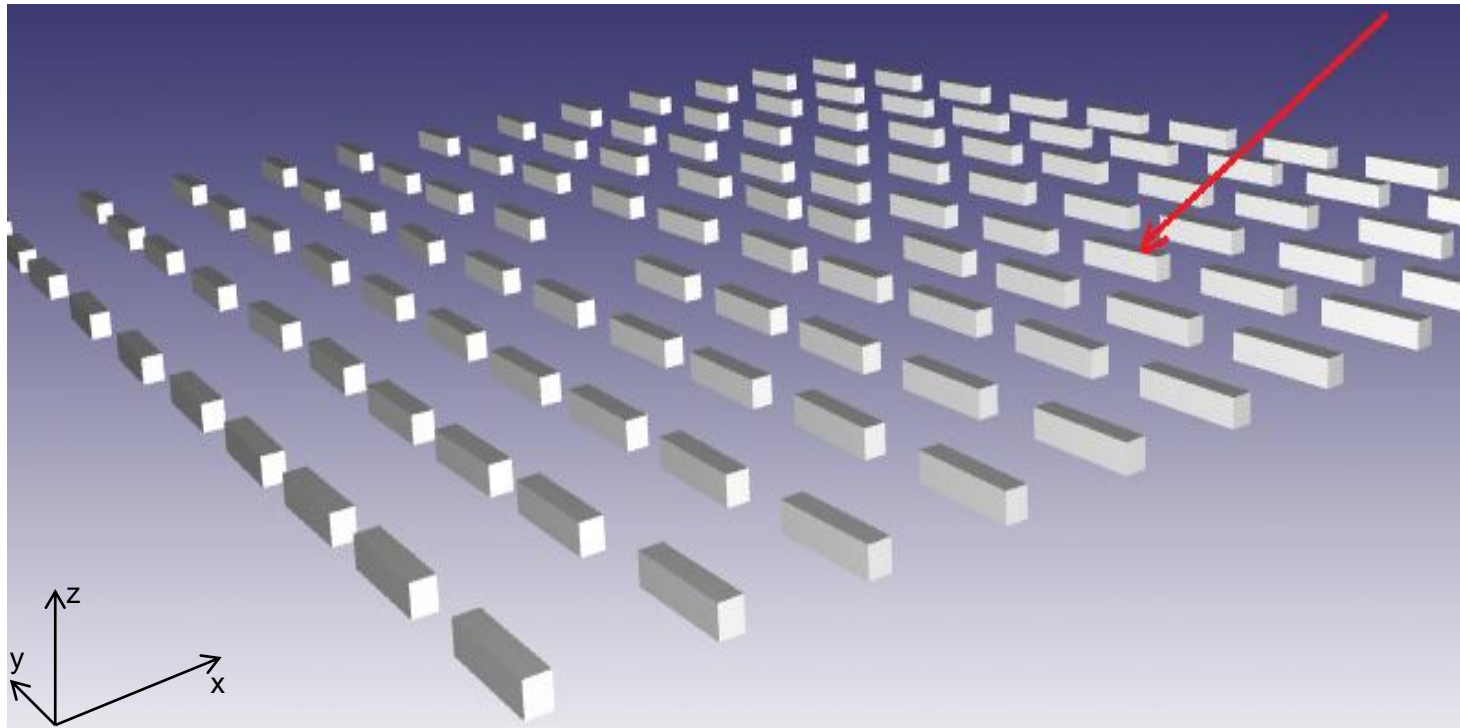
$k_s = 0.045\text{м}$ – шероховатость

$$v(y, z) = 0$$

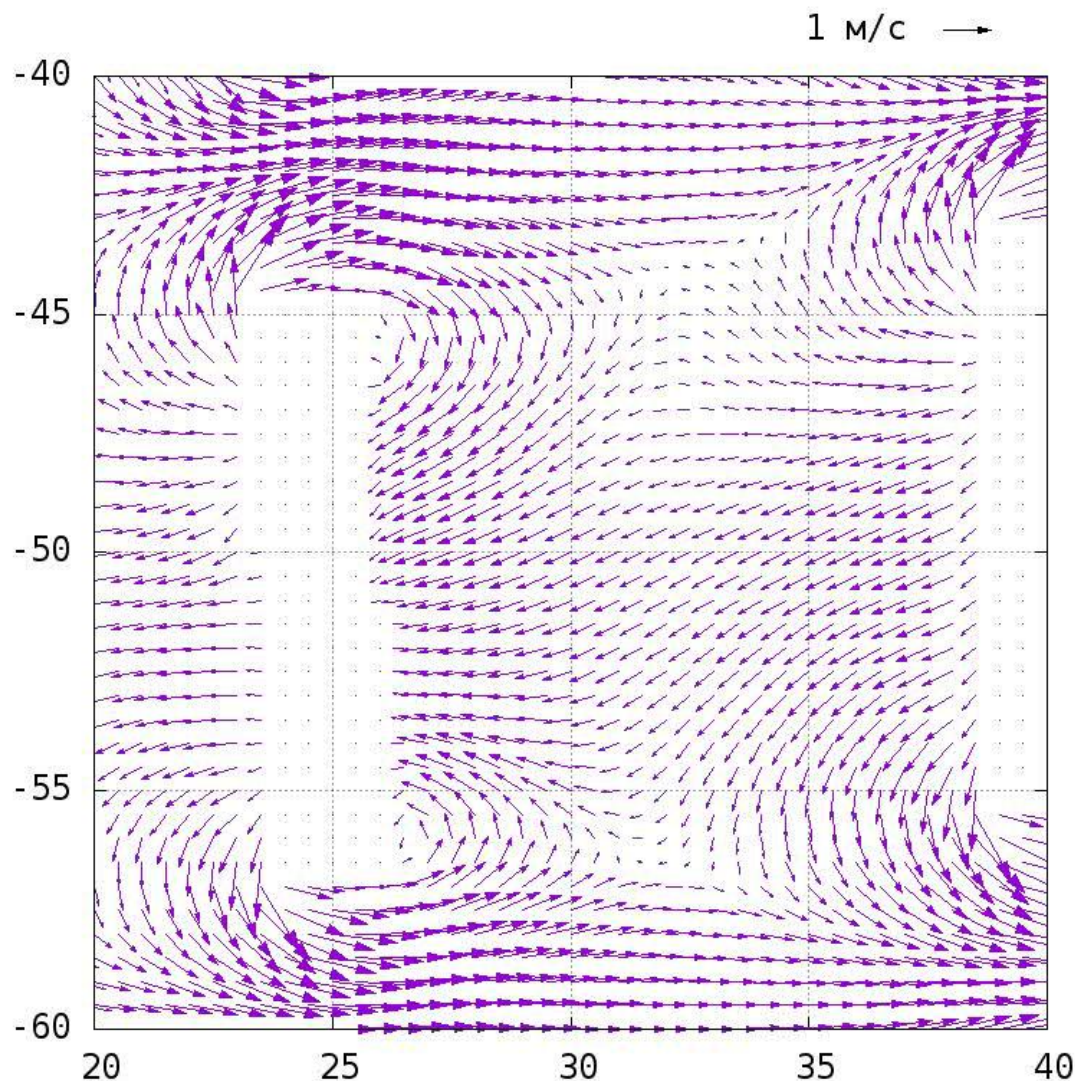
$$W(y, z) = 0$$

$$\frac{\partial P}{\partial x} = 0$$

Расчетная область (Стрелкой указан контейнер, поле ветра вокруг которого визуализируется)



Векторное поле скорости на различных горизонтах в пределах двух контейнеров



FAC2 (Factor of two observations)

$$FAC2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad N_i = \begin{cases} 1 & \text{when } 0.5 \leq \frac{U_{calc}}{U_{obs}} \leq 2.0 \\ 1 & \text{when } |U_{obs}| \leq W \quad \text{u} \quad |U_{calc}| \leq W \\ 0 & \end{cases}$$

Hit Rate (HR)

$$q = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i \quad N_i = \begin{cases} 1 & \text{when } \left| \frac{U_{calc} - U_{obs}}{U_{obs}} \right| \leq D \quad \text{or} \quad |U_{calc} - U_{obs}| \leq W \\ 0 & \end{cases}$$

SAA (Scaled Average Angle differences)

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

ϕ_i - угол между расчетной и измеренной скоростью

$|U_i|$ - модуль расчетной скорости в точке i

Pearson's coefficient

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N (U_{cal_i} - \bar{U}_{cal})(U_{obs_i} - \bar{U}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (U_{cal_i} - \bar{U}_{cal})^2 \cdot \sum_{i=1}^N (U_{obs_i} - \bar{U}_{obs})^2}}$$

\bar{U}_{cal} - средняя рассчитанная скорость

\bar{U}_{obs} - средняя измеренная скорость

BIAS

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

\bar{U}_{cal} - средняя рассчитанная скорость

\bar{U}_{obs} - средняя измеренная скорость

KS (параметр Колмогорова-Смирнова)

$$KS = \max_i \left| F_1(U_{cal_i}) - F_2(U_{obs_i}) \right|$$

$F(C) = \frac{K(C)}{N}$, где $K(U)$ - количество таких U_i , которые удовлетворяют неравенству $U_i < U$

Статистические параметры

- Коэффициент корреляции Пирсона:

$$P = \frac{\sum_{i=1}^N (C_{cal_i} - \bar{C}_{cal})(C_{obs_i} - \bar{C}_{obs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (C_{cal_i} - \bar{C}_{cal})^2 \sum_{i=1}^N (C_{obs_i} - \bar{C}_{obs})^2}}$$

для горизонтальной (U) компоненты скорости **P=0.94**

для вертикальной (W) – компоненты **P=0.69**.

- Ошибка вычисления направления скорости:

$$SAA = \frac{\sum |U_i| |\varphi_i|}{\sum |U_i|} = 2.31$$

U_i -величина скорости, вычисленная по модели

φ_i – отклонение направления вычисленной скорости от измеренной экспериментально

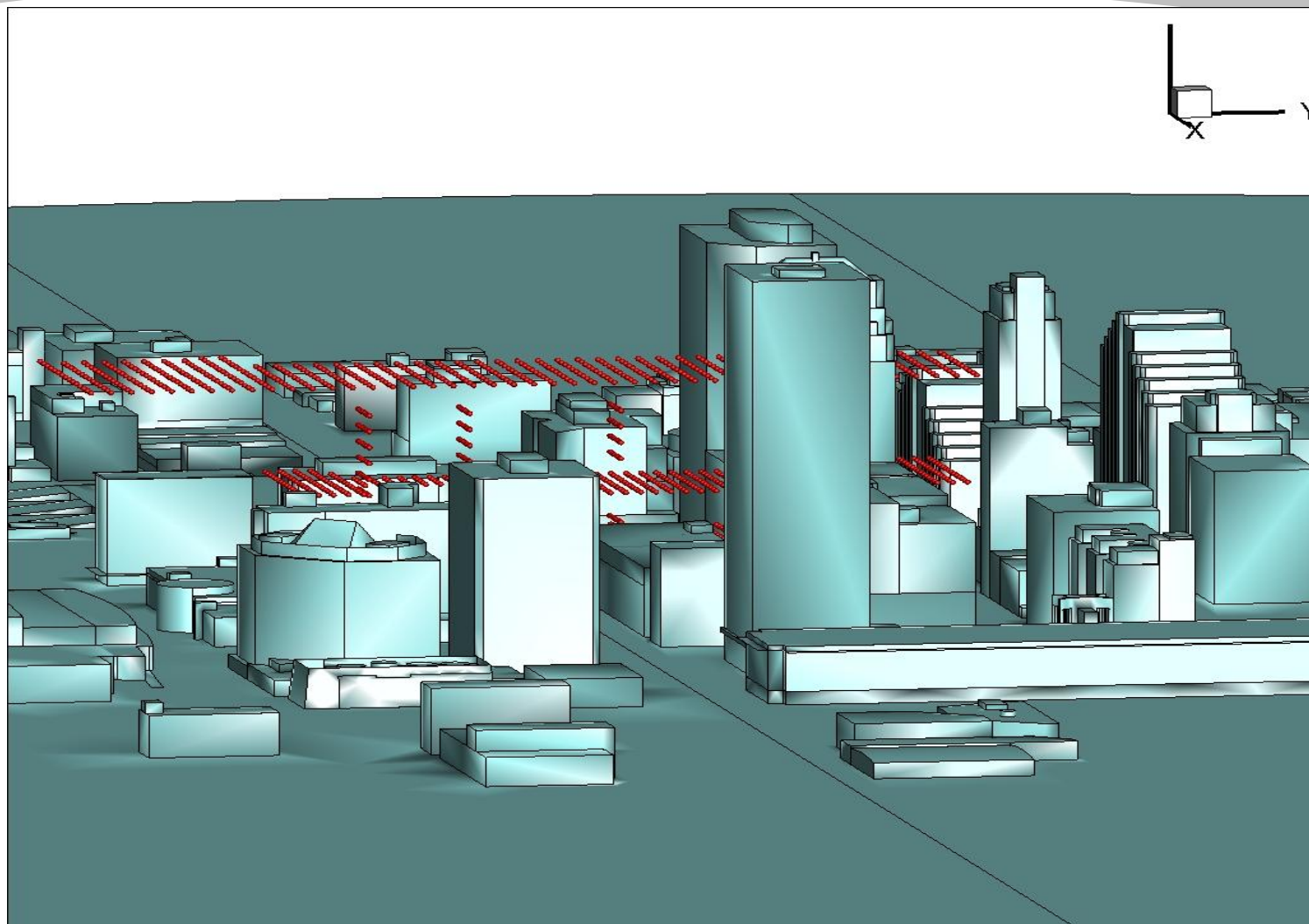
- $FAC2 = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$ with $N_i = \begin{cases} 1 & \text{for } 0.5 \leq \frac{P_i}{O_i} \leq 2 \\ 1 & \text{for } |P_i| \leq W \text{ or } |O_i| \leq W \\ 0 & \end{cases}$

- Hit rate $q = \frac{N}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n N_i$ with $N_i = \begin{cases} 1 & \text{for } \left| \frac{P_i - O_i}{O_i} \right| \leq D \text{ or } |P_i - O_i| \leq W \\ 0 & \end{cases}$

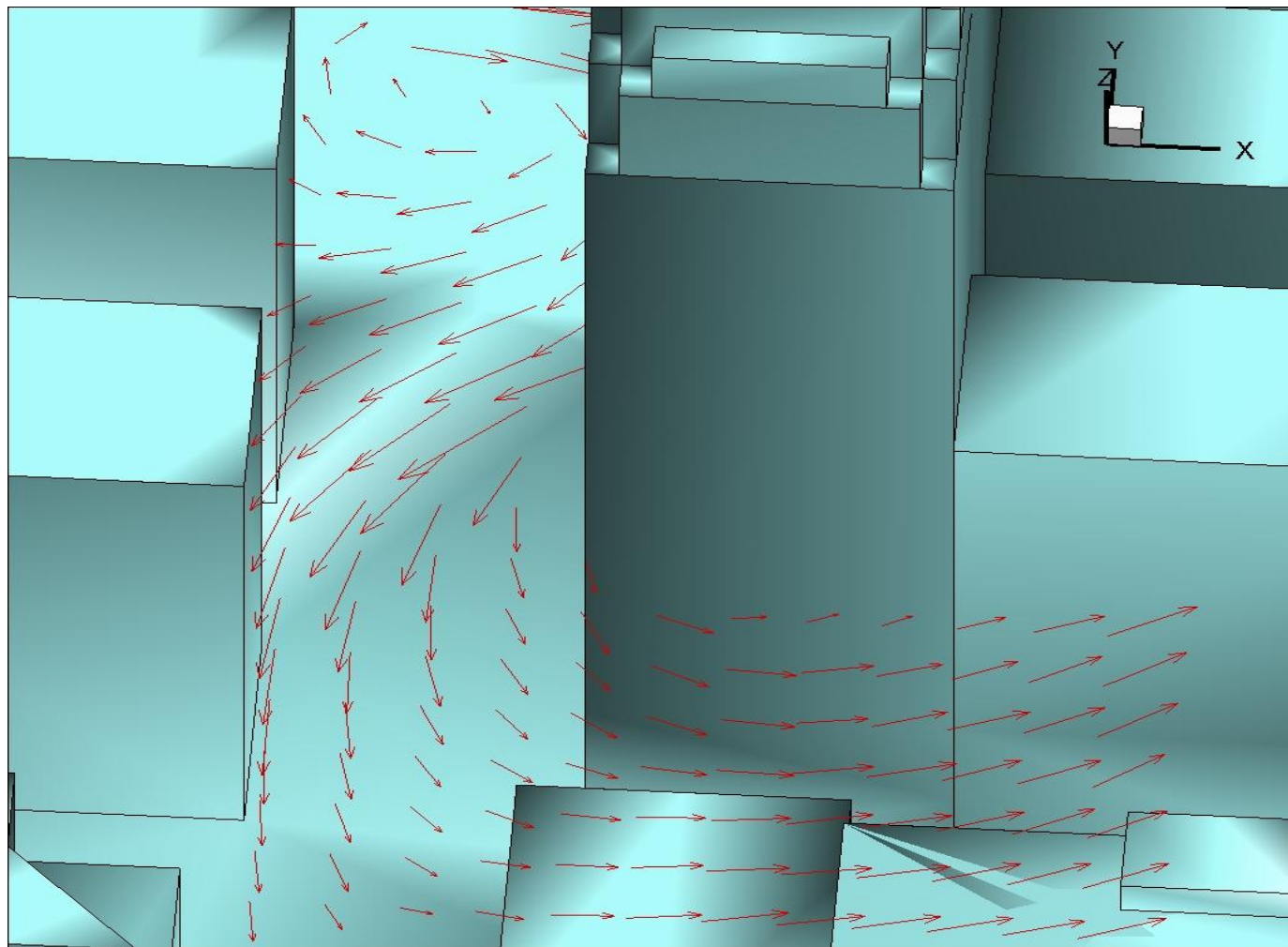
Значения статистических характеристик на основе сравнения данных измерений с несколькими известными моделями.

MISCAM	Длина (количество расчетных ячеек на препятствие)	Широта (количество расчетных ячеек на препятствие)	Высота (количество расчетных ячеек на препятствие)	U, hit rate, %	W, hit rate, %	U, FA2, %	W, FA2, %
Standard k-eps	24	6	5	73	16	93	14
Standard k-eps	12	3	5	77	21	92	27
Standard k-eps	12	3	5	75	21	90	29
Modified k-e	12	3	5	81	15	89	12
Modified k-e	15	3	5	79	14	91	12
Modified k-e	24	5	5	75	20	90	31
CFX							
Standard k-eps	~13	~5	~4	82	18	94	23
Standard k-eps	13	5	4	76	15	86	16
Shear Stress Transport (SST) k- omega	13	5	4	1	11	1	11
SSG Reynold Stress turbulence model	13	5	4	60	20	73	27
Наша модель	24	5	5	71	20	86	27

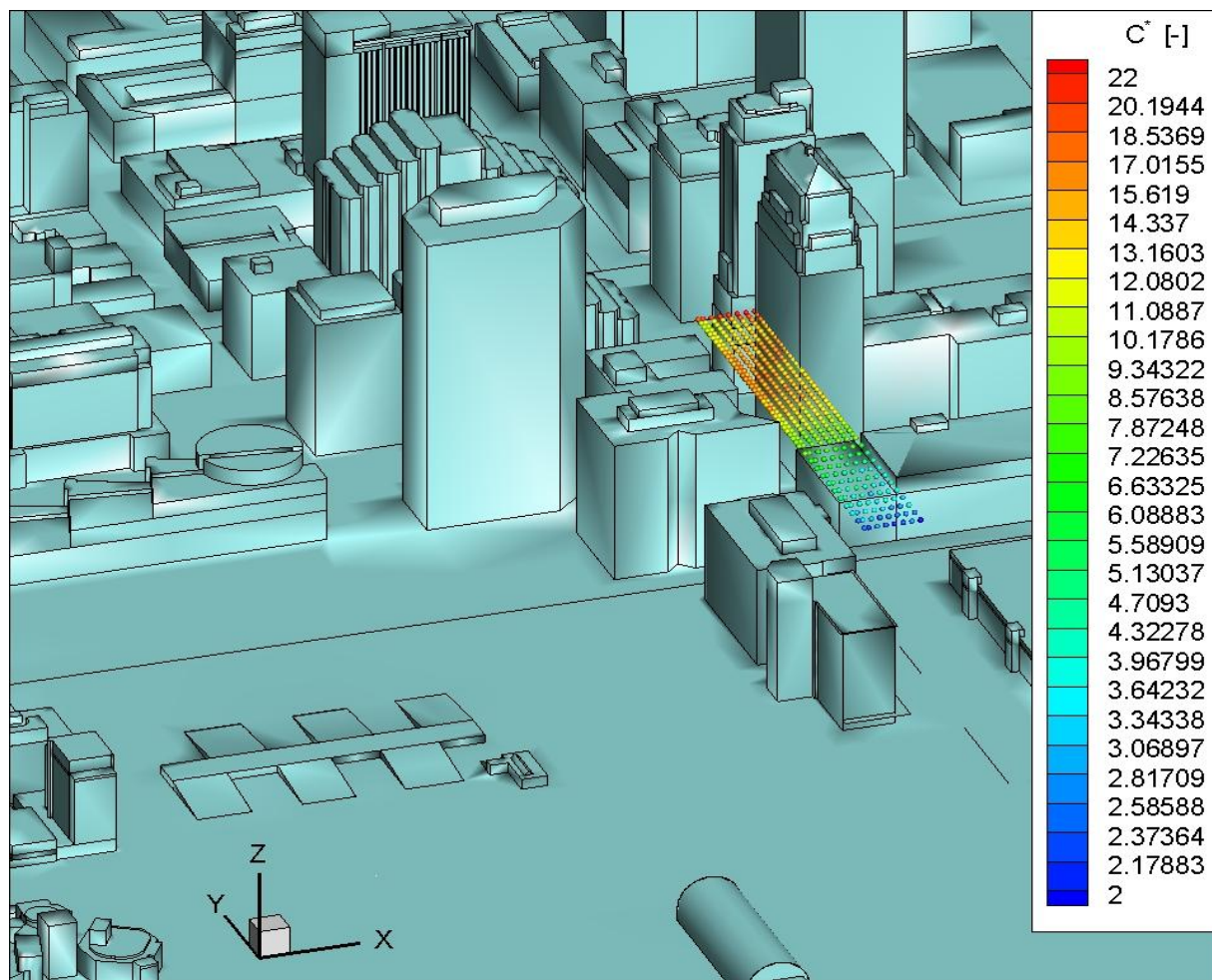
Результаты обработки данных экспериментов установки SEDVAL (3D модель, измерительная сеть скоростей потока)



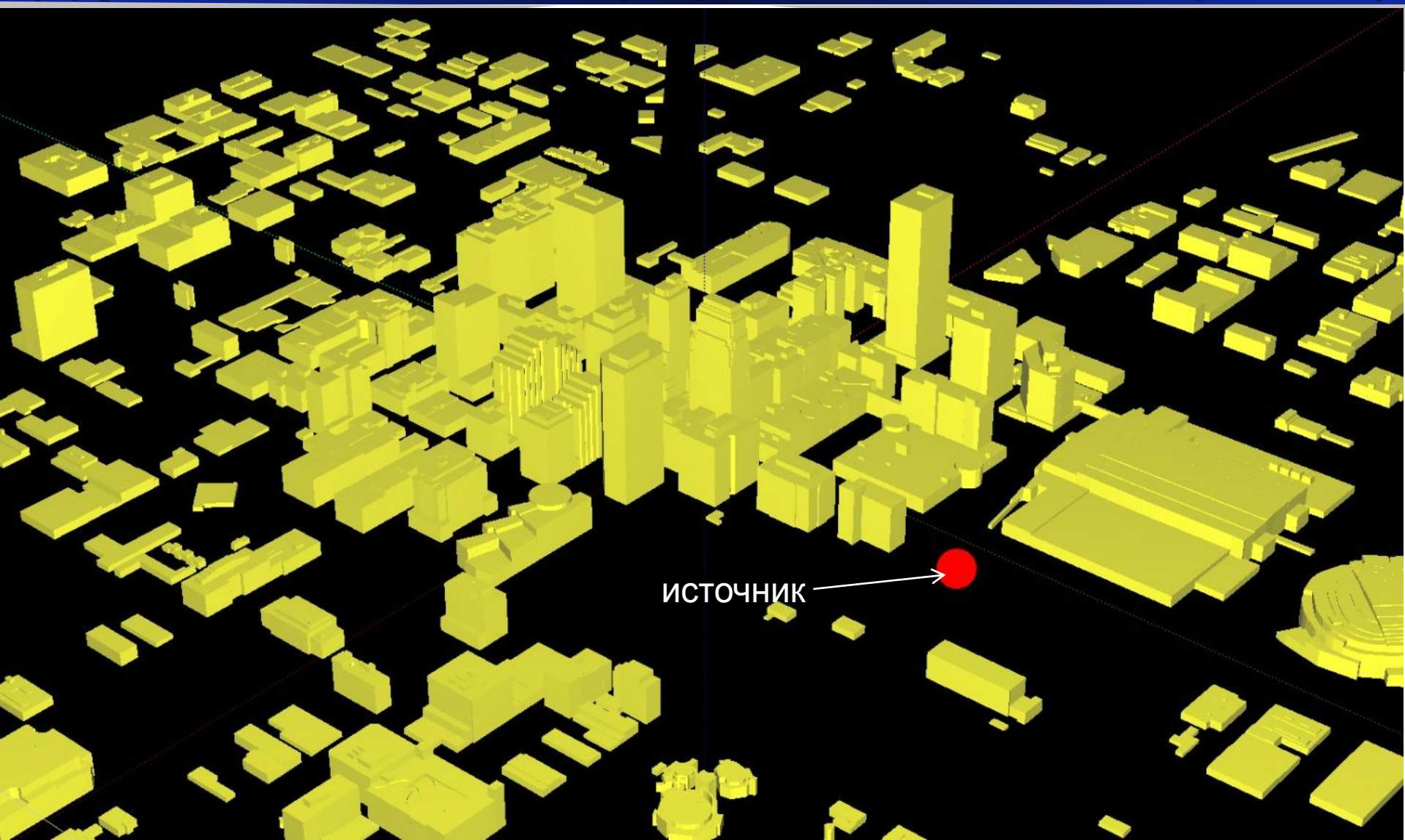
Результаты обработки данных экспериментов установки SEDVAL (скорости потока)



Результаты обработки данных экспериментов установки SEDVAL (измерительная сеть и концентрации трассера)

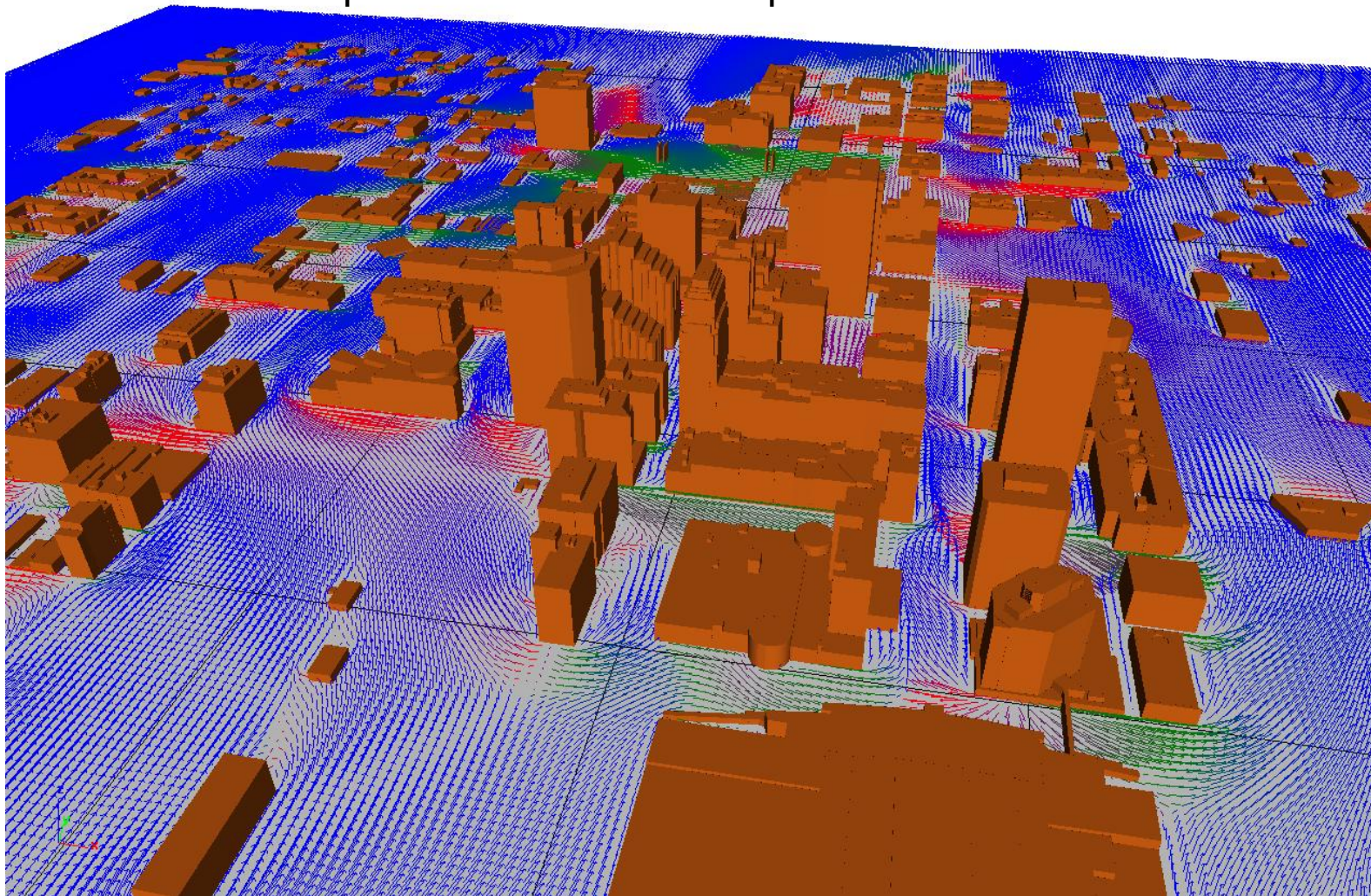


3-мерная модель центра города Оклахома (крупномасштабный верификационный эксперимент)

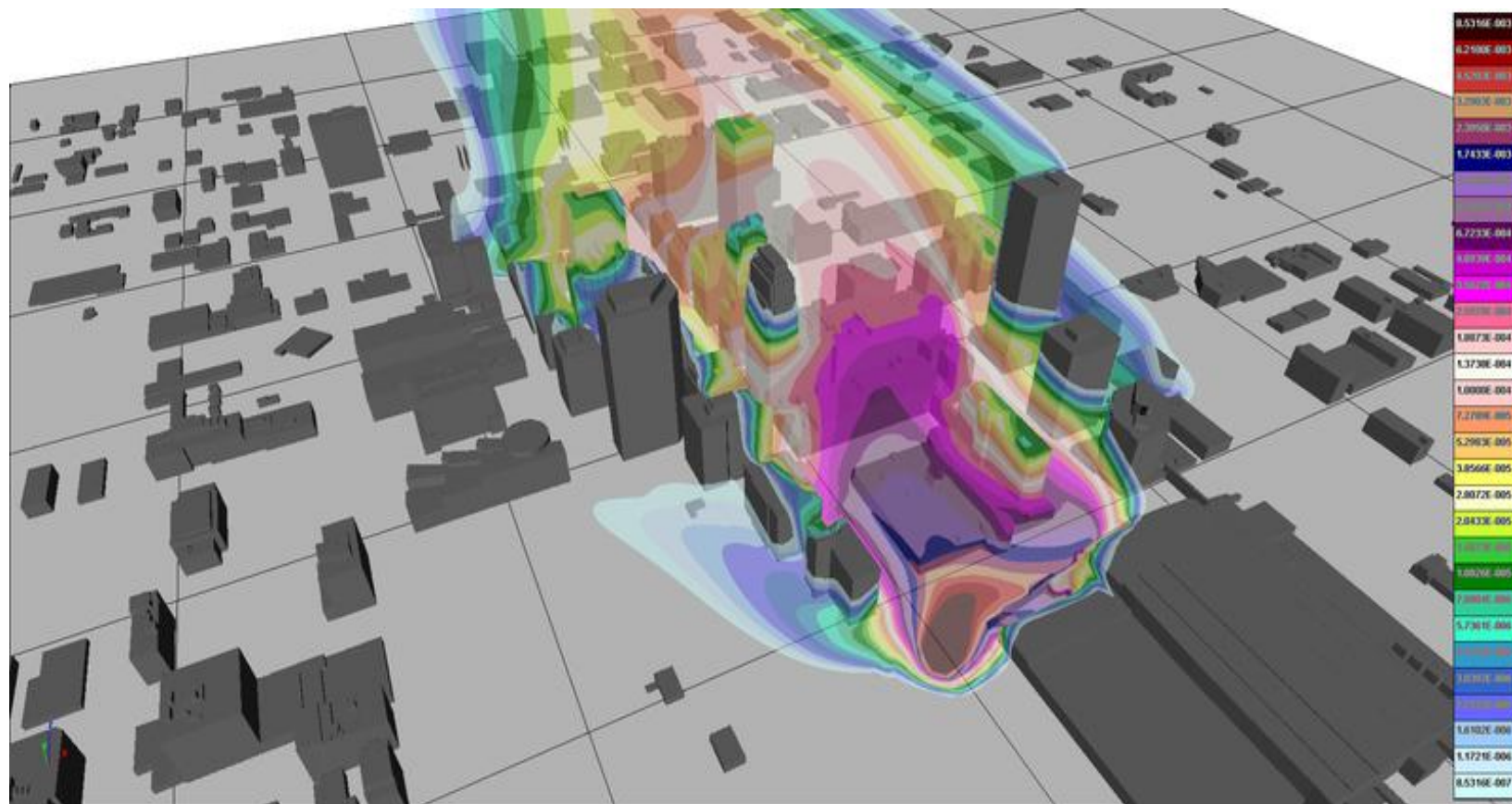


Натурный эксперимент в Оклахоме (результаты моделирования)

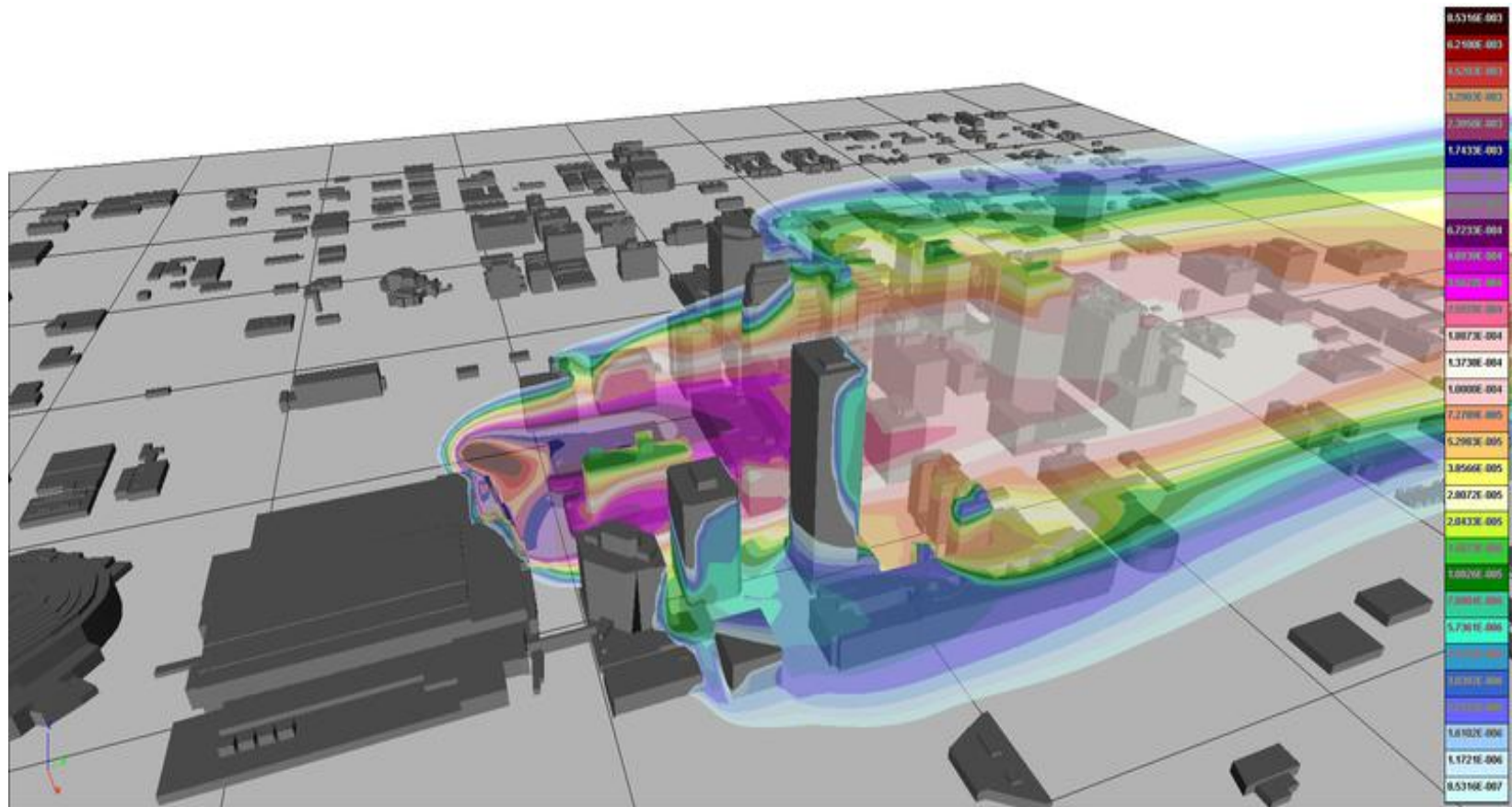
Ветер на высоте 5м со стороны источника



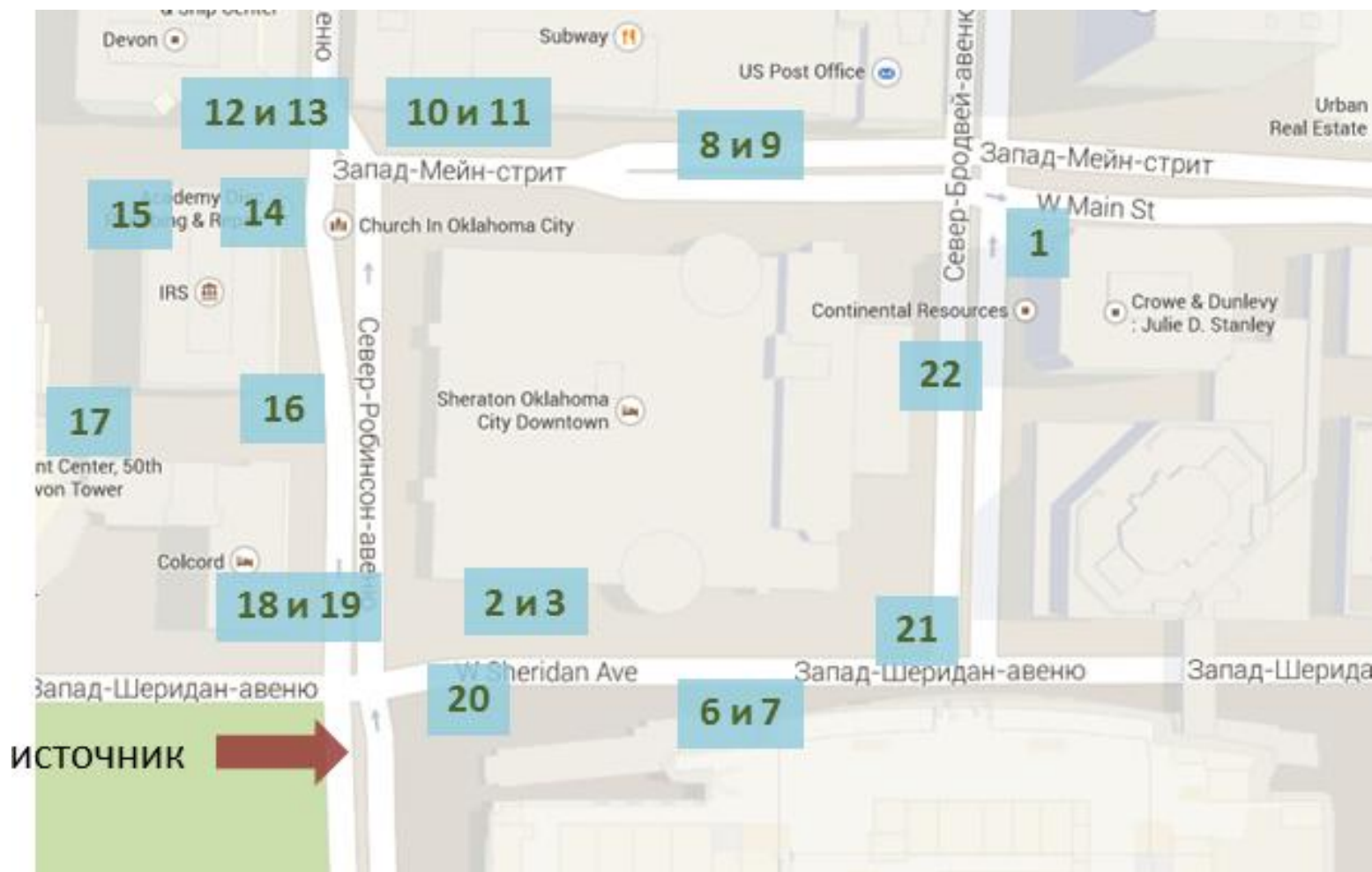
Изоповерхности объёмной концентрации трассера с легендой (результаты моделирования)



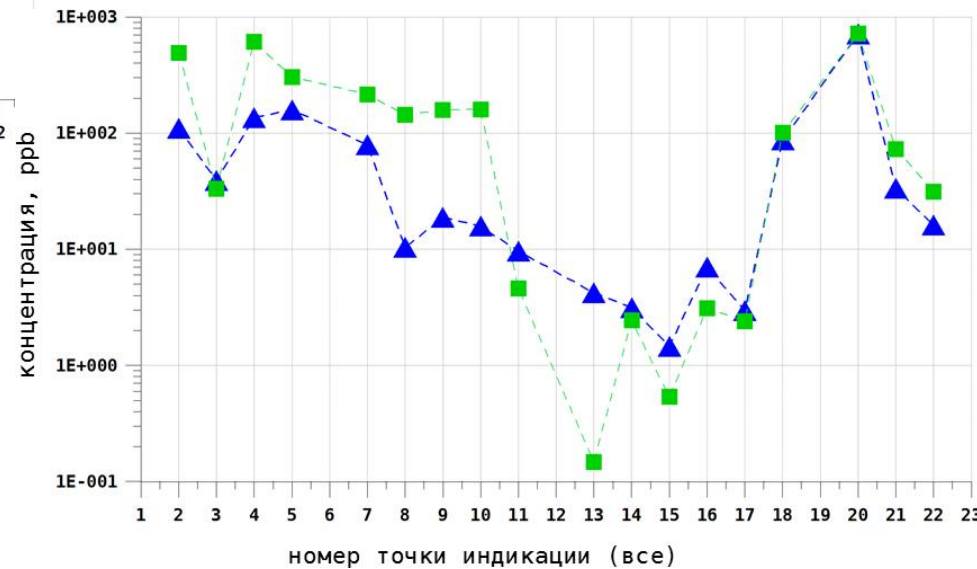
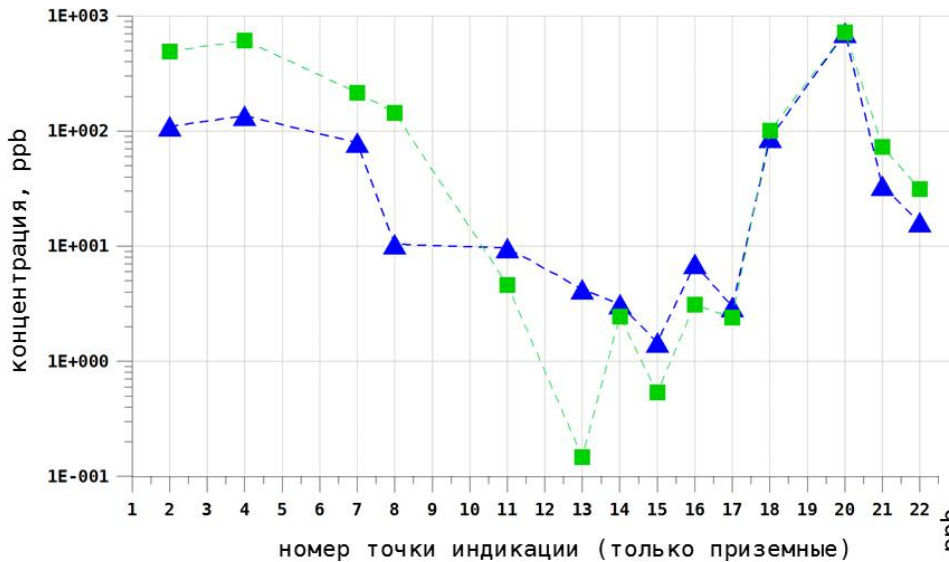
Изоповерхности объёмной концентрации трассера с легендой (результаты моделирования)



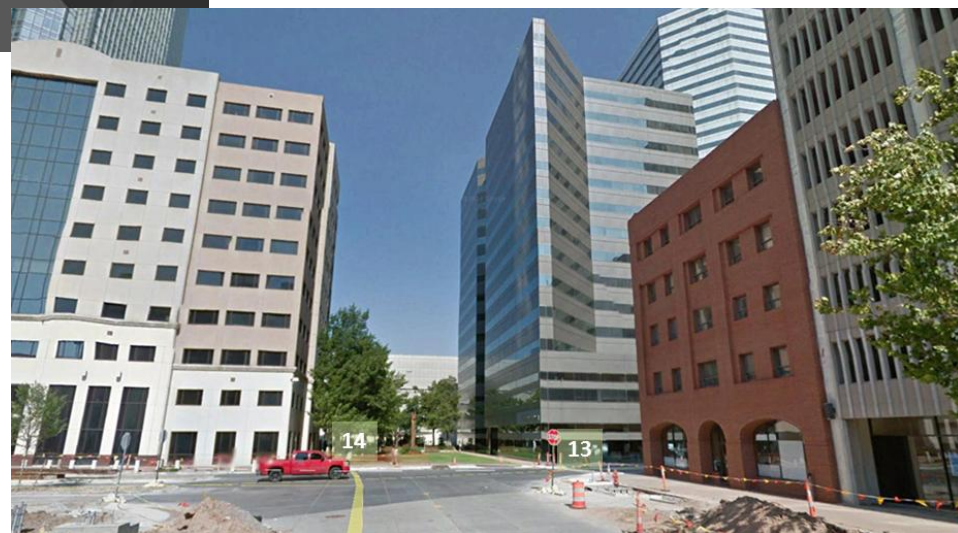
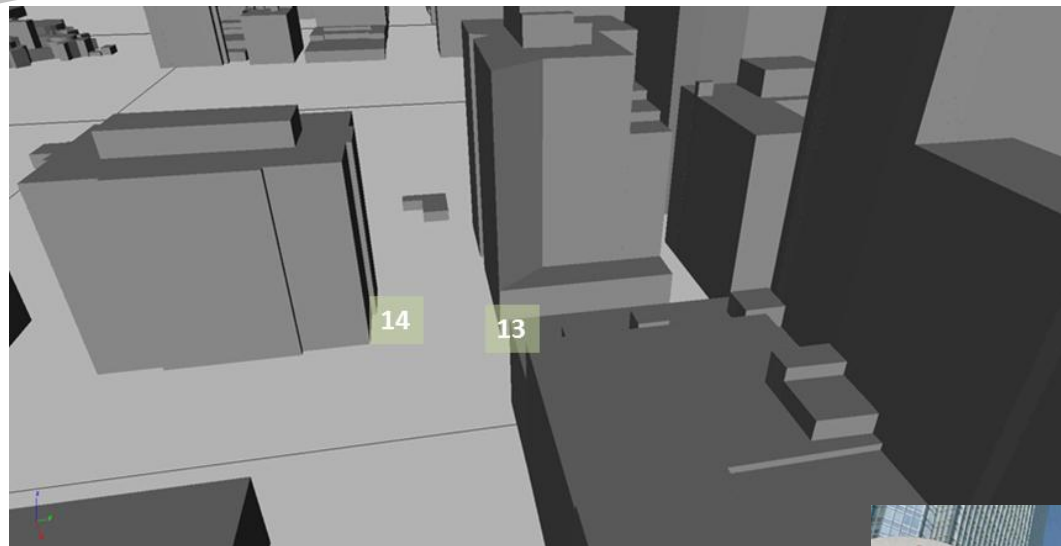
Точки измерения



Расчетные (зеленые) и измеренные концентрации

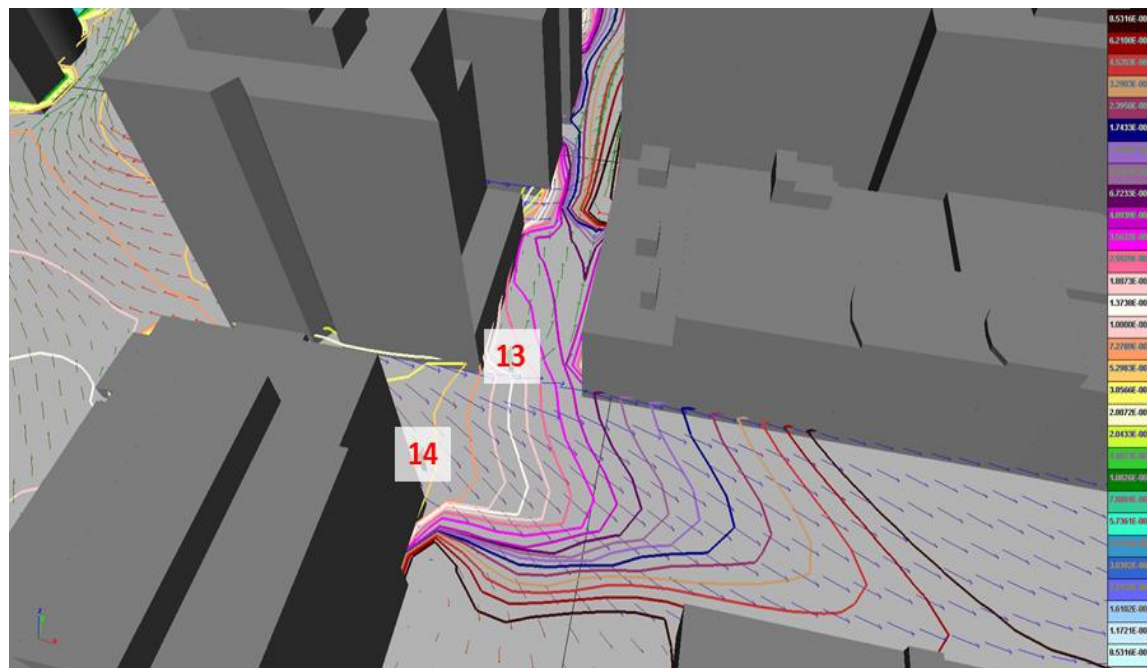


Модель района и реальная застройка

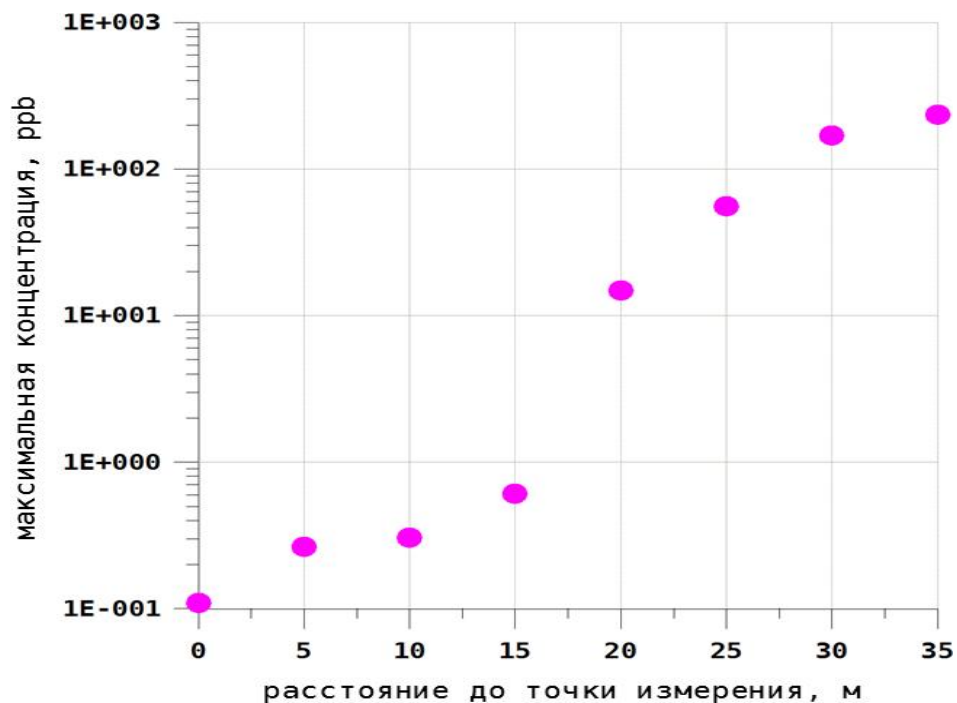


XVI ВСЕРОССИЙСКАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ-ШКОЛА МОЛОДЫХ ИССЛЕДОВАТЕЛЕЙ “СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ”

Изолинии приземной концентрации в районе измерительных станций 13 и 14



Зависимость значений максимальной концентрации от расстояния до измерительной станции 13



Расчет доз и мощностей доз (от облака от загрязненной поверхности, от ингаляции)

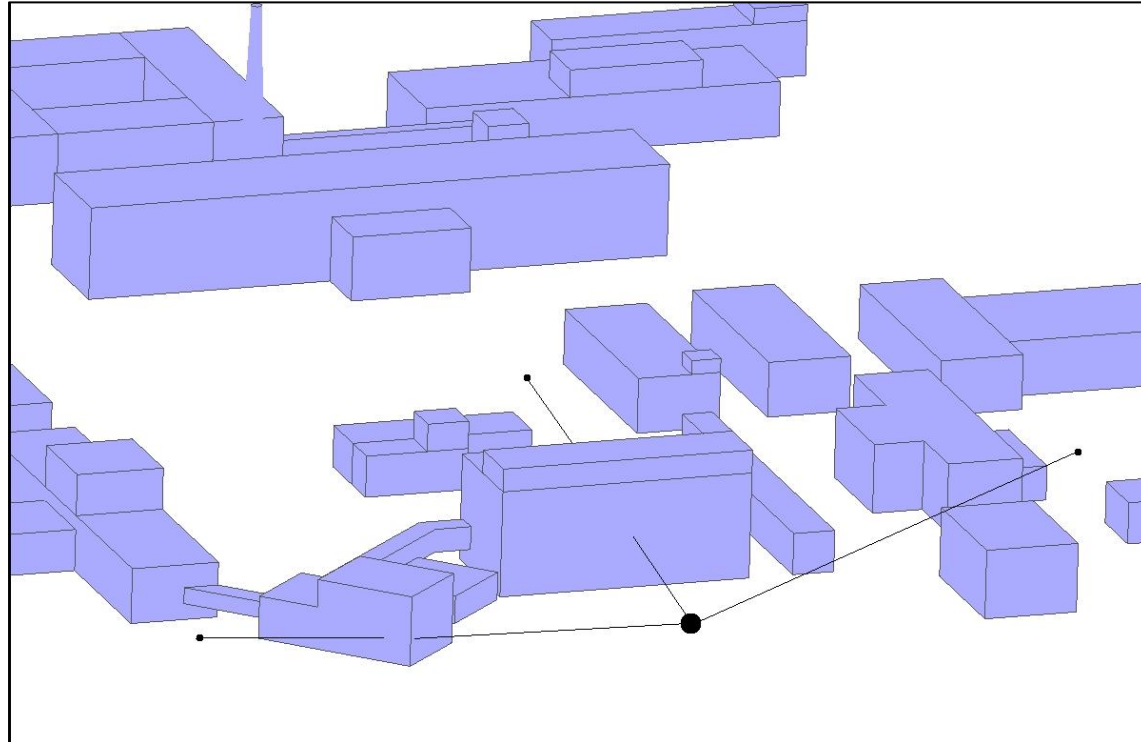
Более 100 радионуклидов в базе данных.

Две методики расчёта мощности дозы от точечного источника:

- 1) Методика, рекомендованная МАГАТЭ (без учёта поглощения ионизирующего излучения в воздухе).
- 2) Методика, разработанная в ИБРАЭ РАН (с учётом поглощения в воздухе)

Учёт рассеяния в присутствии поглощающей трёхмерной застройки является сложной задачей и на данном этапе не учитывается.

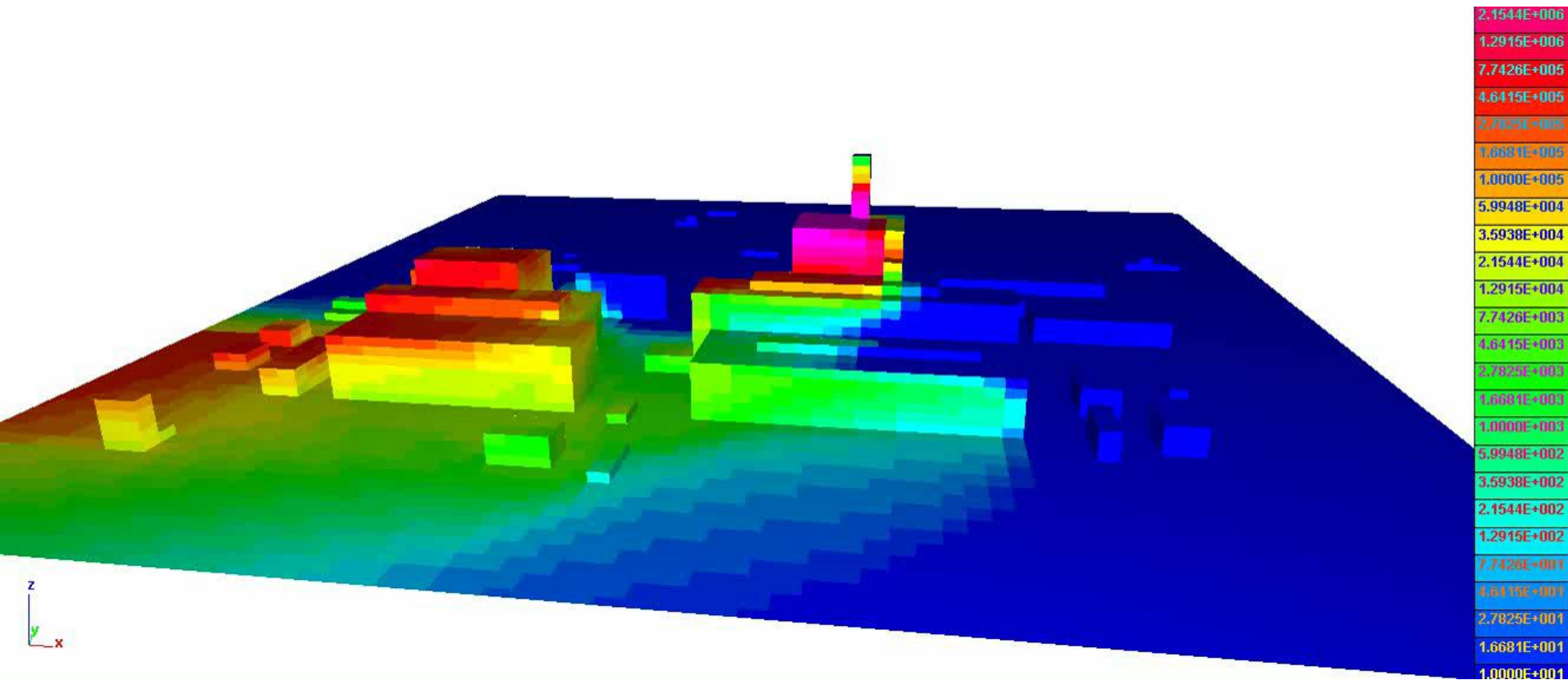
Иллюстрация метода определения взаимной видимости точек



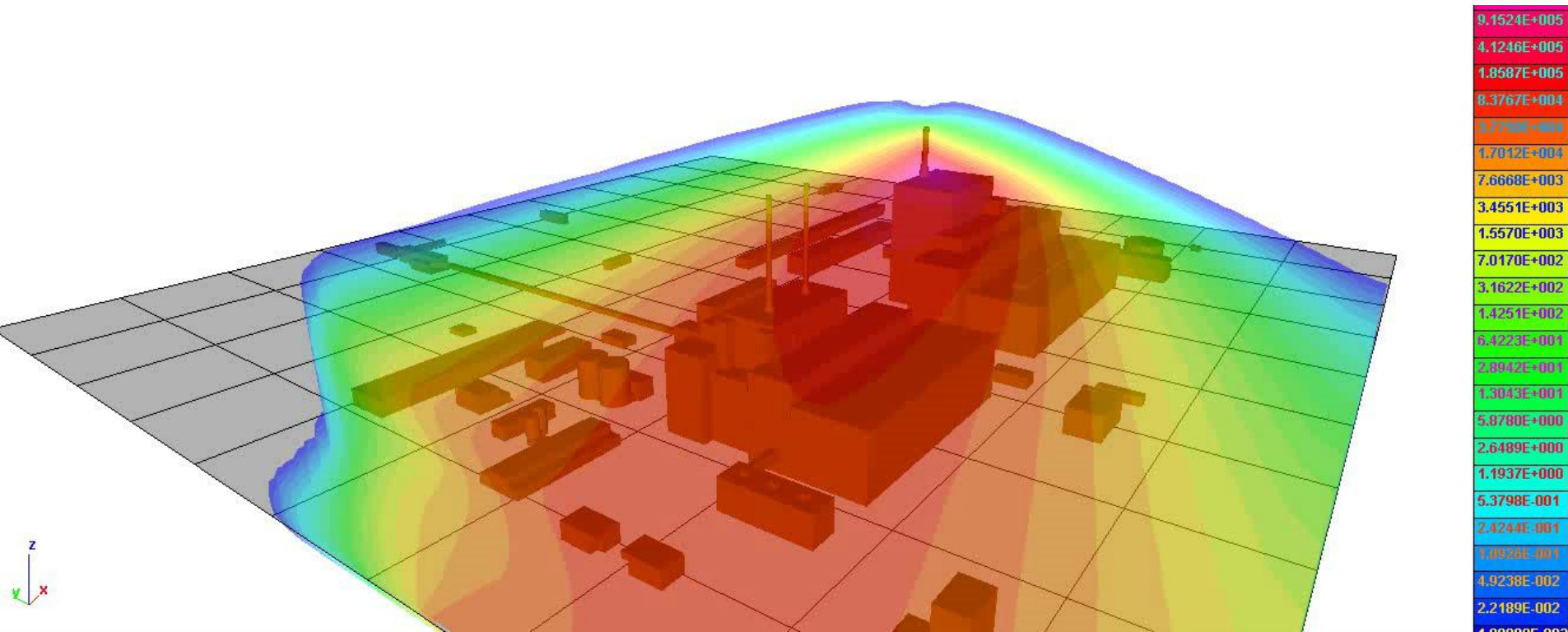
Две проблемы:

- В каждой точке нужно определить функцию видимости из всех точек воздушного пространства
- Рассчитать интеграл от всех видимых объемов.

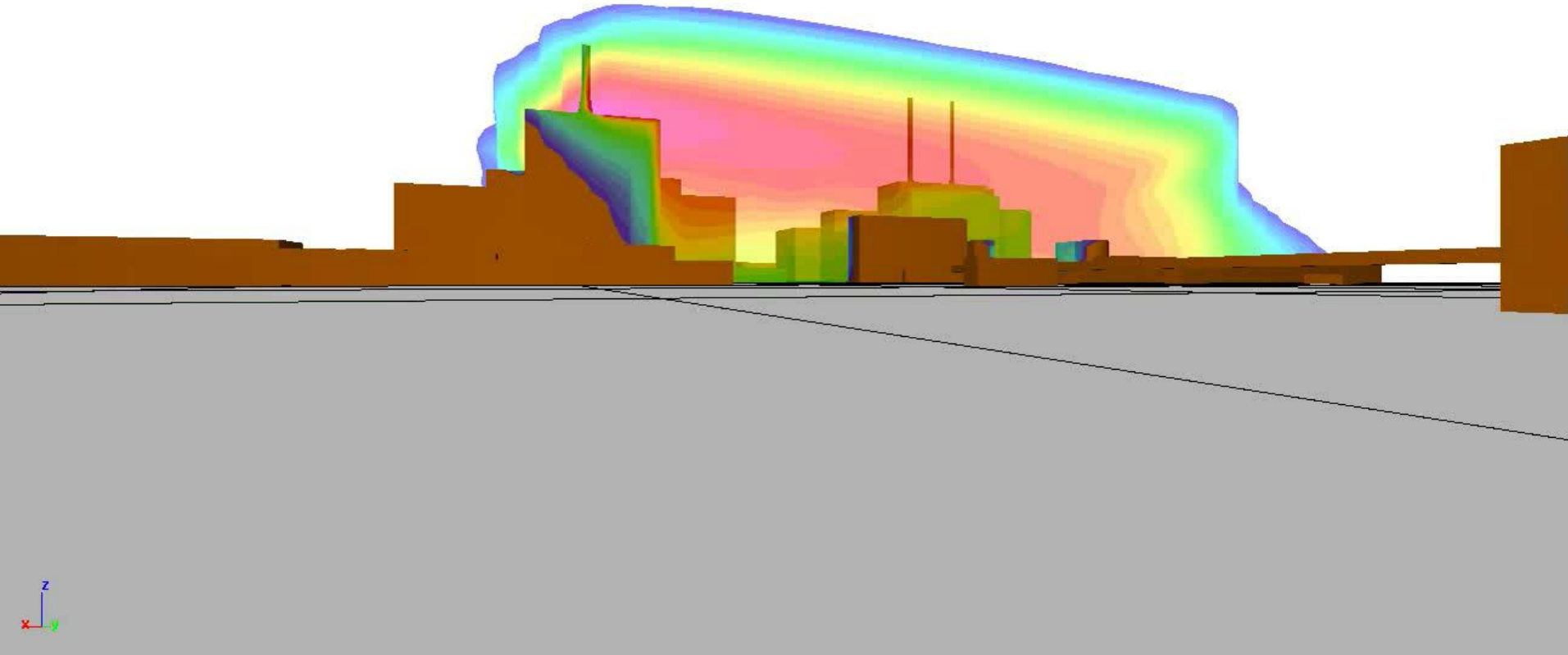
Белоярская АЭС (моделирование аварии “Потеря системного и надёжного электроснабжения: отказ активных систем остановки реактора” БН-1200)



Белоярская АЭС (моделирование аварии “Потеря системного и надёжного электроснабжения: отказ активных систем остановки реактора” БН-1200)



Белоярская АЭС (моделирование аварии “Потеря системного и надёжного электроснабжения: отказ активных систем остановки реактора” БН-1200)





Спасибо за внимание!