



Национальный
исследовательский

**Томский
государственный
университет**

Исследование влияния растительности на характеристики приземного воздушного потока

- Старченко Александр Васильевич
- Данилкин Евгений Александрович
- ✓ Лещинский Дмитрий Викторович
- ✓ Дель Ирина Васильевна
- ✓ Юмин Кирилл Викторович

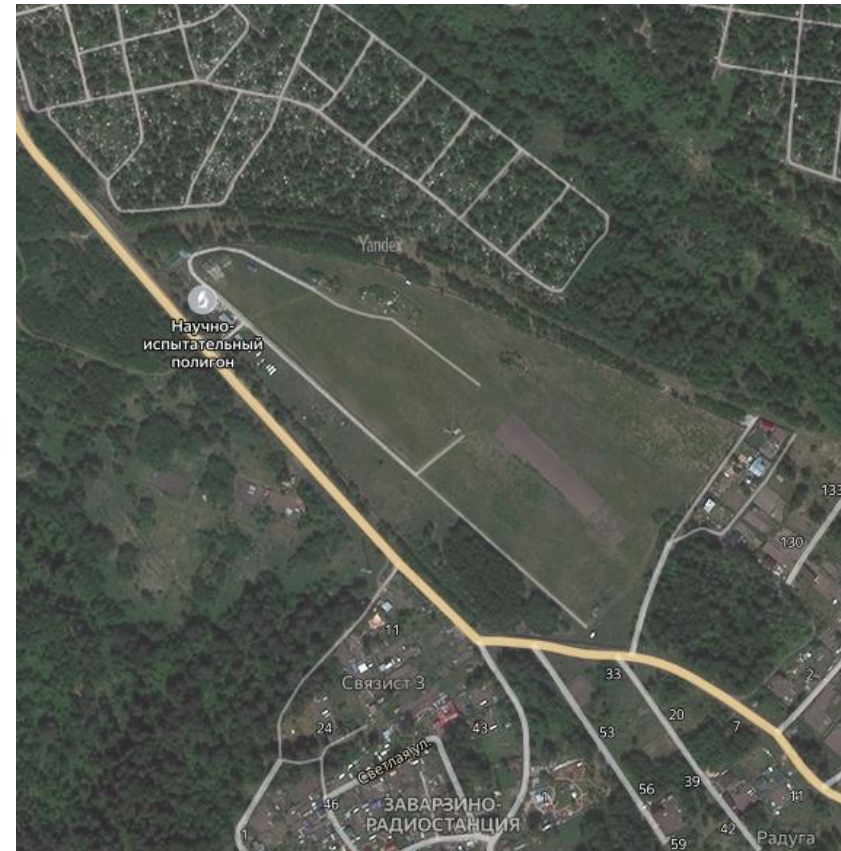


M2UE

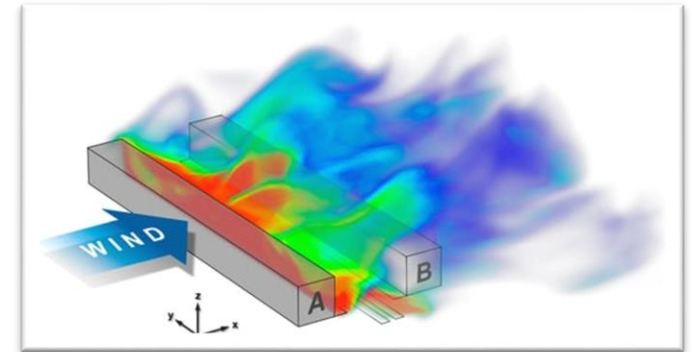
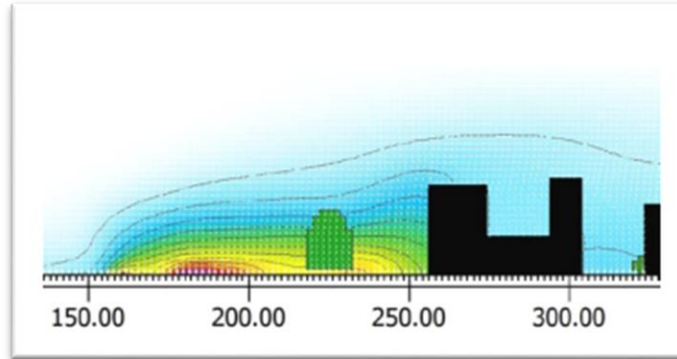
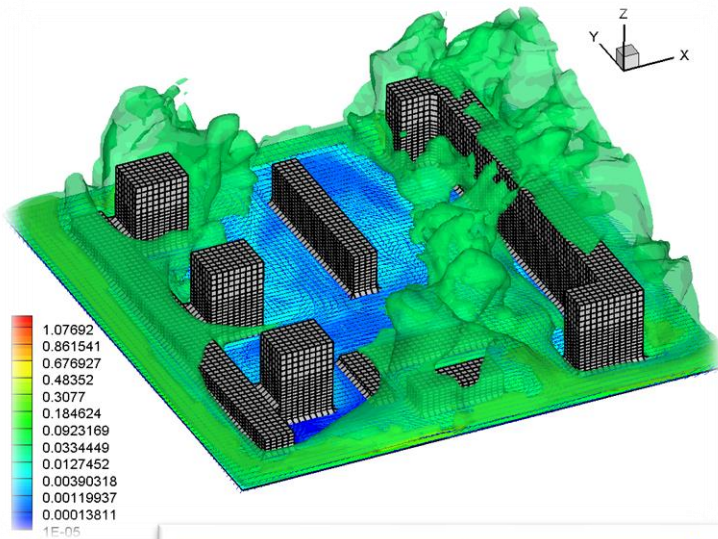


Исследование влияния растительности на характеристики приземного воздушного потока

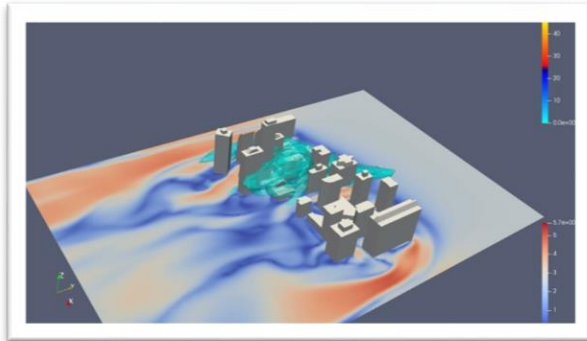
- Математическое моделирование
- Дифференциальные уравнения
- Численные методы
- Fortran
- Python
- Анализ данных



Актуальность



OpenStreetMap



Open  FOAM®

ANSYS
FLUENT®



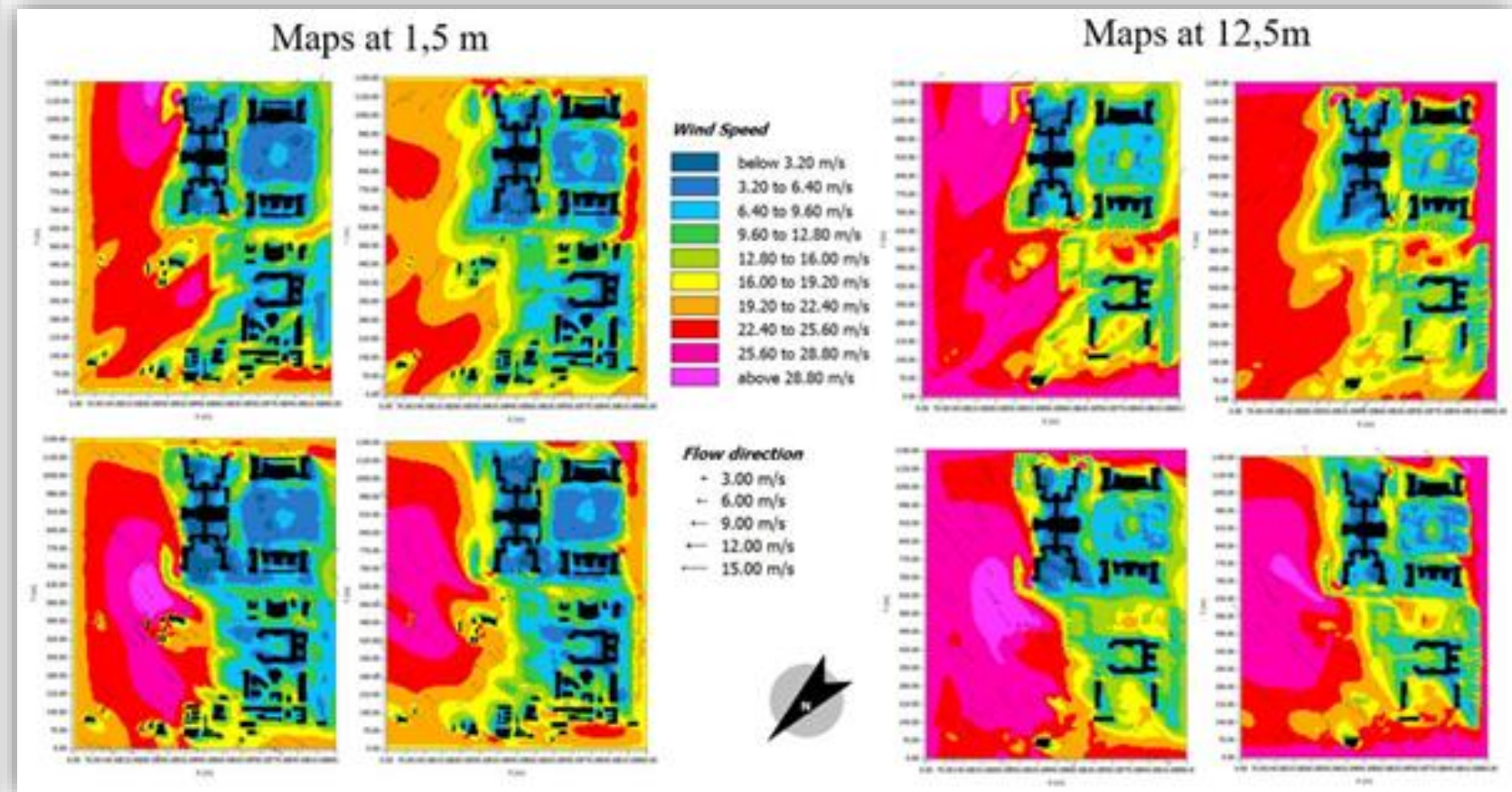
FlowVision

**ENVI
_MET**

Актуальность



Карта кампуса МГУ



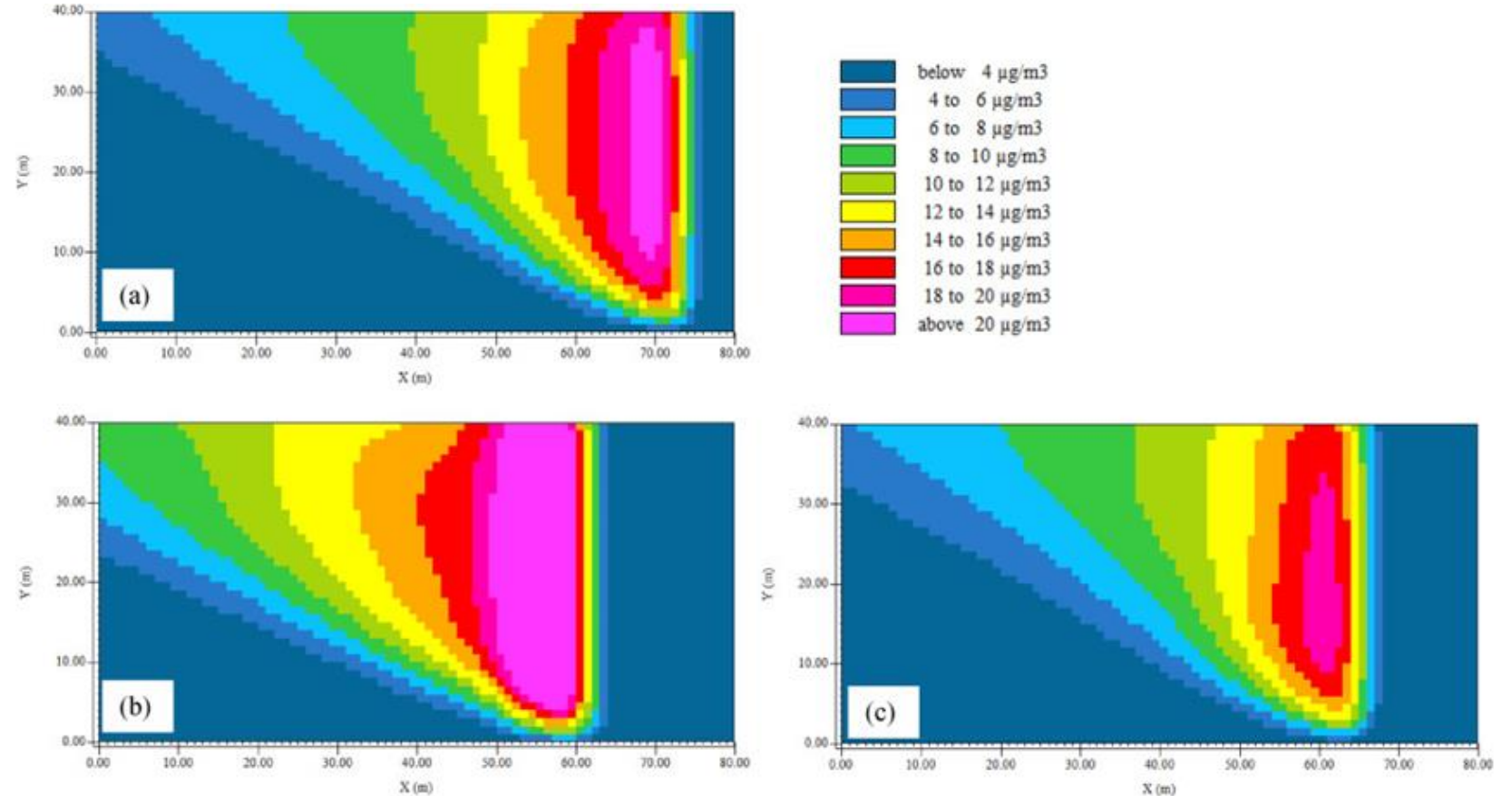
Результаты моделирования в виде карт скоростей ветра на высотах 1.5 м и 12.5 м

***E.V. Nikolaeva, A.A. Kospanov, S.S. Bukin and P.I. Konstantinov. «Microscale simulation of wind speed in urban areas during extreme weather events (case study of Moscow)»**

Актуальность



Исследовательские площадки: (а) Площадка 1, (б) Площадка 2 и (с) Площадка 3.

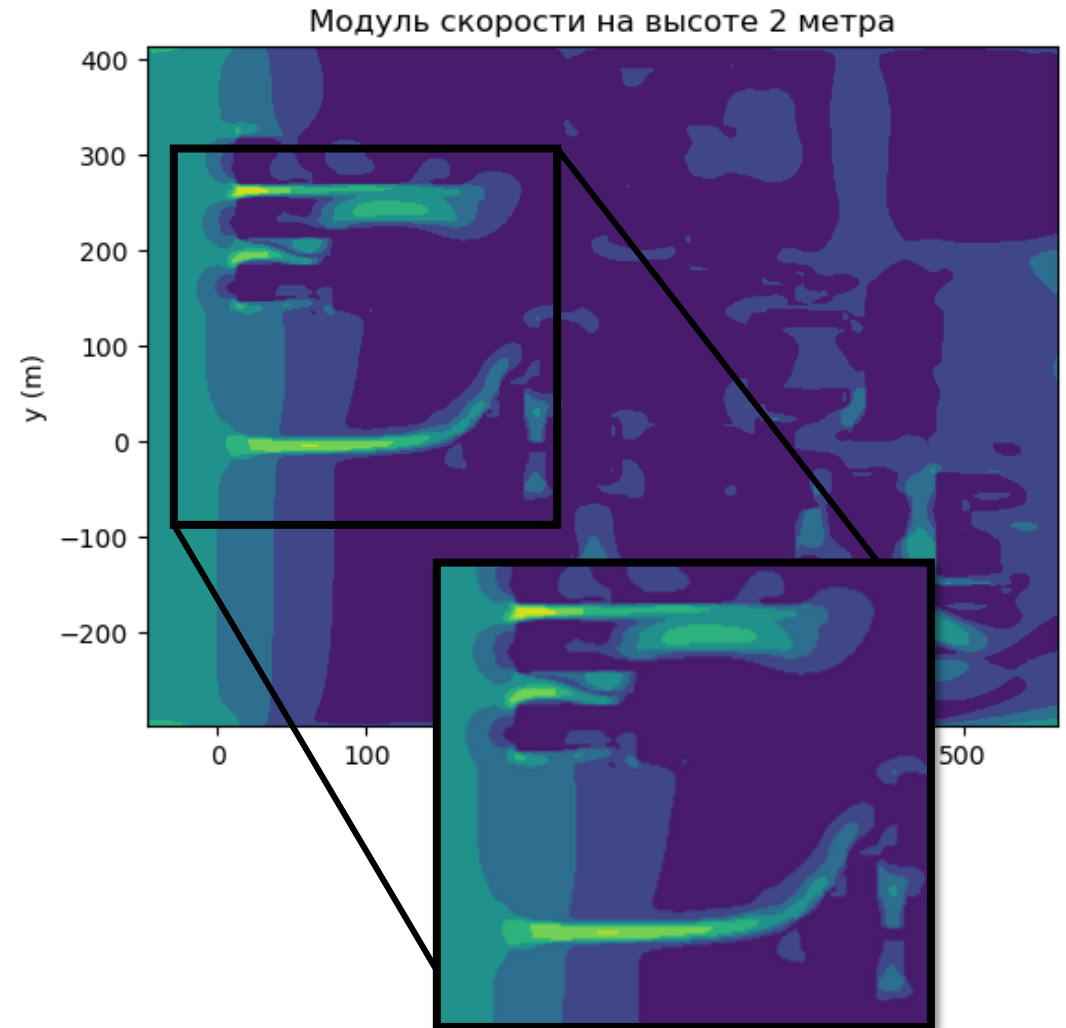
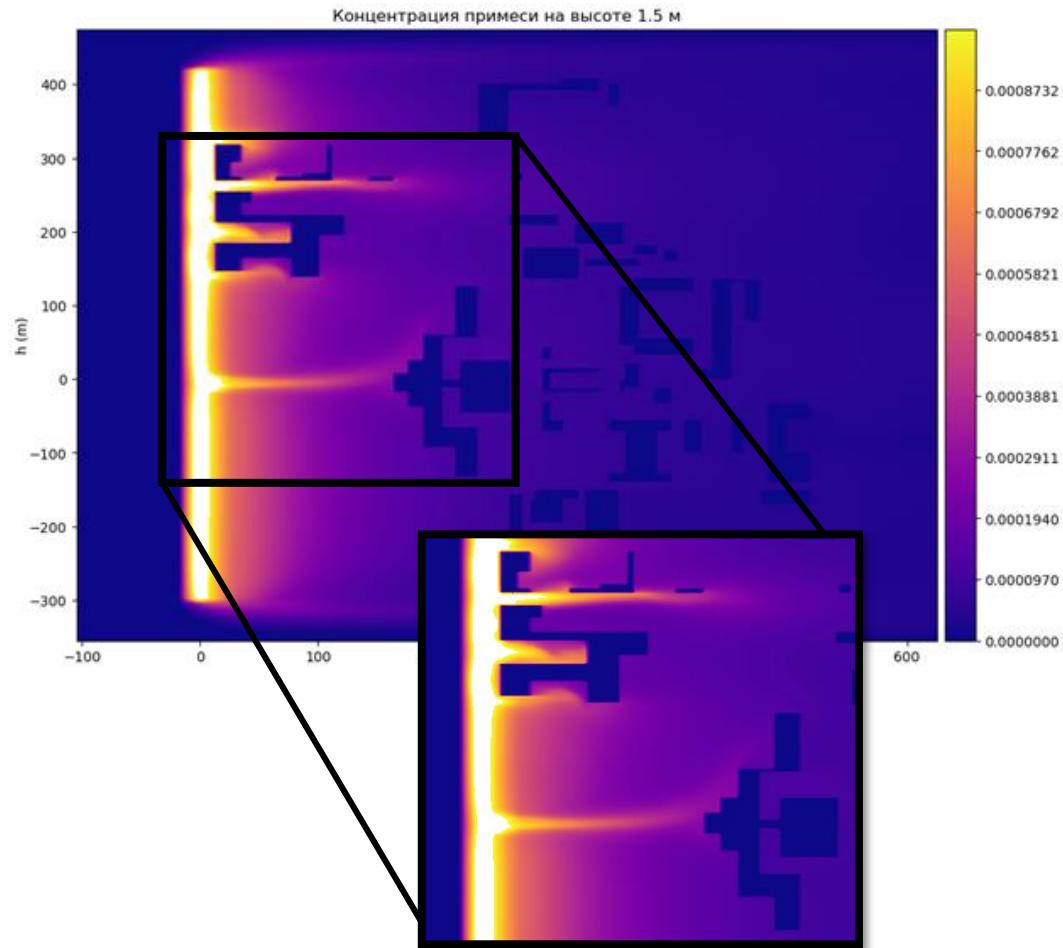


Горизонтальное рассеивание PM2.5 при $z = 1,4$ м (высота человеческого дыхания) на трех участках (ось X – расстояние от обочины до центра парка, ось Y перпендикулярна направлению движения транспортного средства).

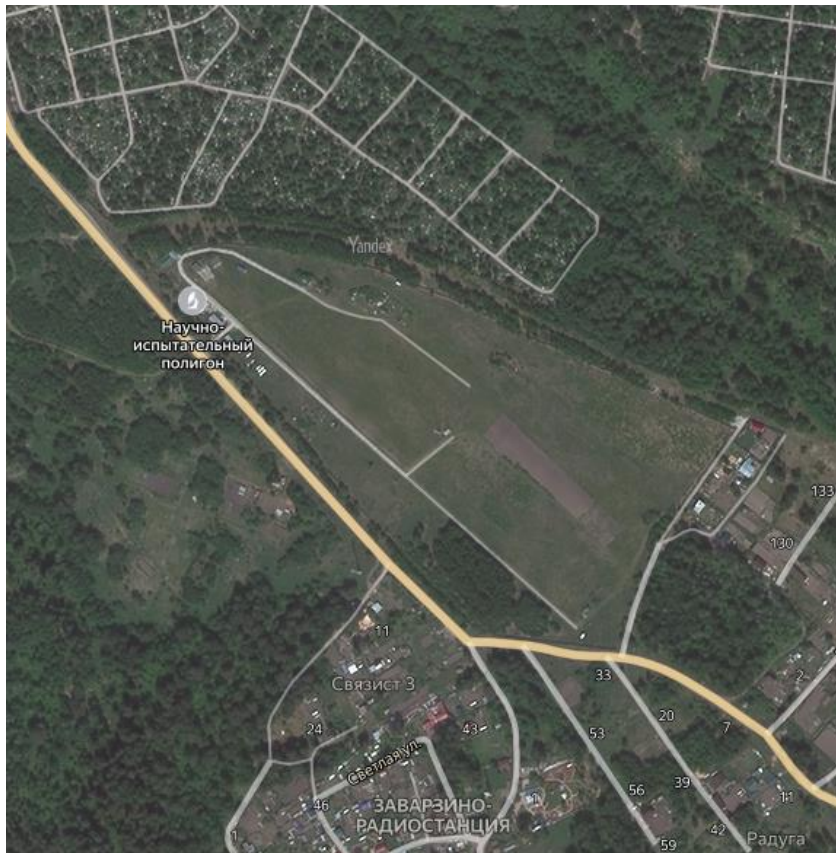
***A.L. Savinda Heshani, Ekbordin Winijkul. «Numerical simulations of the effects of green infrastructure on PM 2.5 dispersion in an urban park in Bangkok, Thailand»**

Результаты БММ2023

Математическое моделирование распространения вредных выбросов автотранспорта на примере территории кампуса ТГУ



Физико-математическая постановка задачи



Математическая модель включает в себя осредненные по Рейнольдсу уравнения неразрывности, Навье-Стокса, переноса примеси и теплообмена:

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0;$$

$$\frac{\partial \bar{u}_i \bar{u}_j}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\nu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{u'_i u'_j}}{\partial x_j} - g_i \frac{(\bar{T} - T_0)}{T_0};$$

$$\frac{\partial \bar{T} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(a \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{T' u'_j}}{\partial x_j}; \quad \frac{\partial \bar{C} \bar{u}_j}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(D \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j} \right) - \frac{\partial \overline{C' u'_j}}{\partial x_j} + S, \quad i, j = 1, 2, 3.$$

Замыкание описанной системы уравнений проводится с использованием градиентно-диффузионной гипотезы Буссинеска:

$$\overline{u'_i u'_j} = -\nu_T \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} k \delta_{ij}, \quad \overline{T' u'_j} = -\frac{\nu_T}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_j}, \quad \overline{C' u'_j} = -\frac{\nu_T}{Sc_T} \frac{\partial \bar{C}}{\partial x_j}.$$

Для вычисления турбулентной вязкости используется двухпараметрическая « $k - \varepsilon$ » – модель турбулентности, учитывающая влияние сил плавучести:

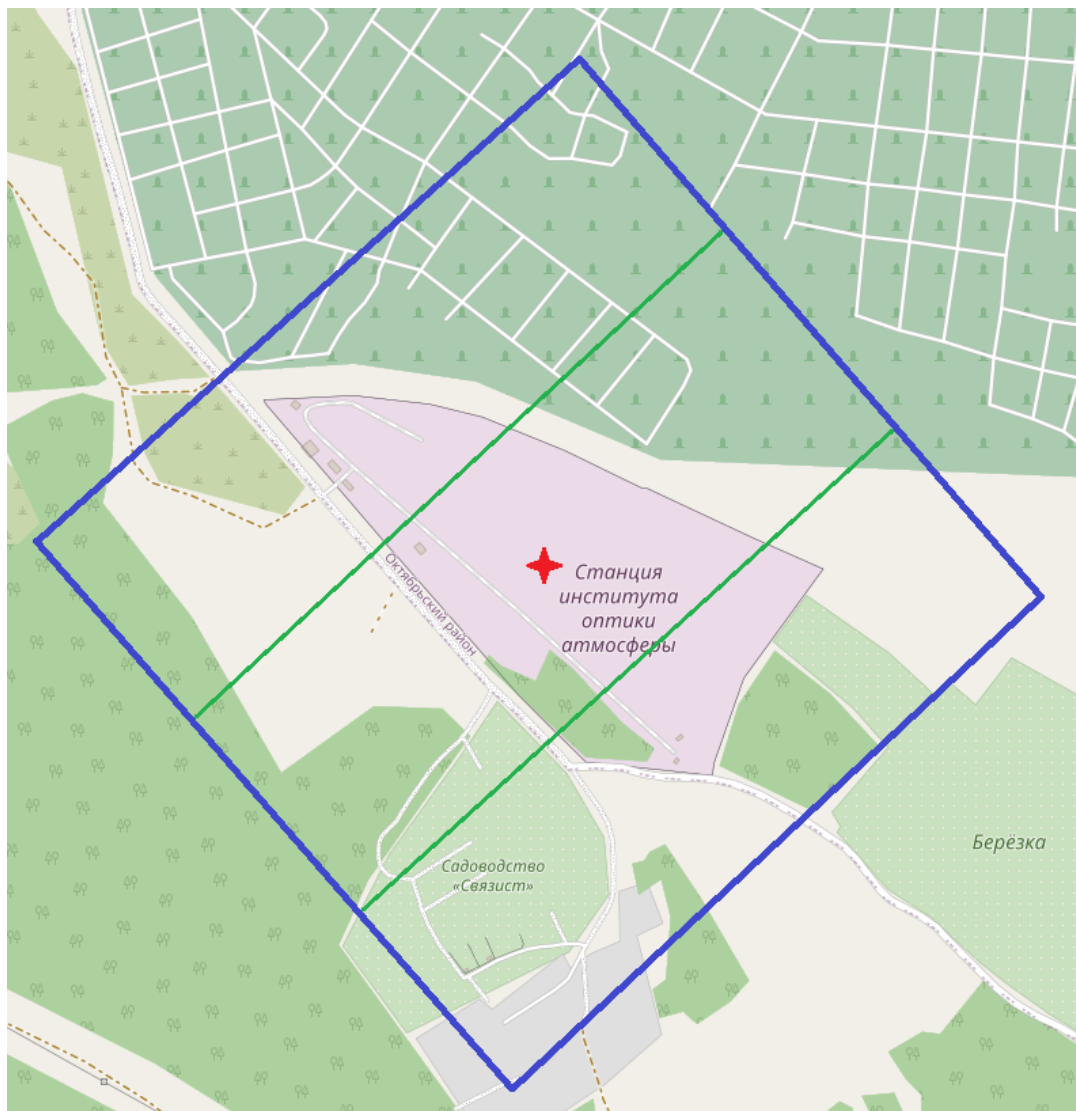
$$\begin{aligned} \frac{\partial k \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right) + P + G - \varepsilon, & \nu_T &= C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon}, \\ \frac{\partial \varepsilon \bar{u}_j}{\partial x_j} &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\nu + \frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} (P + C_{\varepsilon 3} G) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{k}, & P &= -\overline{u'_i u'_j} \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j}, \\ & & G &= -\frac{g_j}{T_0} \frac{\nu_T}{Pr_T} \frac{\partial \bar{T}}{\partial x_i}. \end{aligned}$$

Численный метод



- ✓ Дискретизация дифференциальной задачи выполнена методом конечного объема на структурированной декартовой сетке (сетка разнесенная).
- ✓ Аппроксимация конвективных членов уравнения переноса выполняется с использованием противопотоковой схемы MLU Ван Лира.
- ✓ Результатом дискретизации является неявная разностная схема 2-ого порядка аппроксимации по пространству.
- ✓ Для расчёта поля течения используется процедура SIMPLE.
- ✓ Метод пристеночных функций Лаундера-Сполдинга.
- ✓ В модели не учитывается осаждение примеси на стенах, крышах и подстилающей поверхности.
- ✓ На границах производные от концентрации по нормали к поверхности задаются равными нулю.
- ✓ Равенство нулю производных по нормали на выходе потока из расчетной области и на открытой верхней границе.
- ✓ При задании граничных условий на входе используются равномерные профили скорости k , ε , $\bar{T}$, $\bar{C}$.

Область исследования



– Измерительная станция с координатами (0;0).



– Область исследования 800 х 800 метров.

Измерения



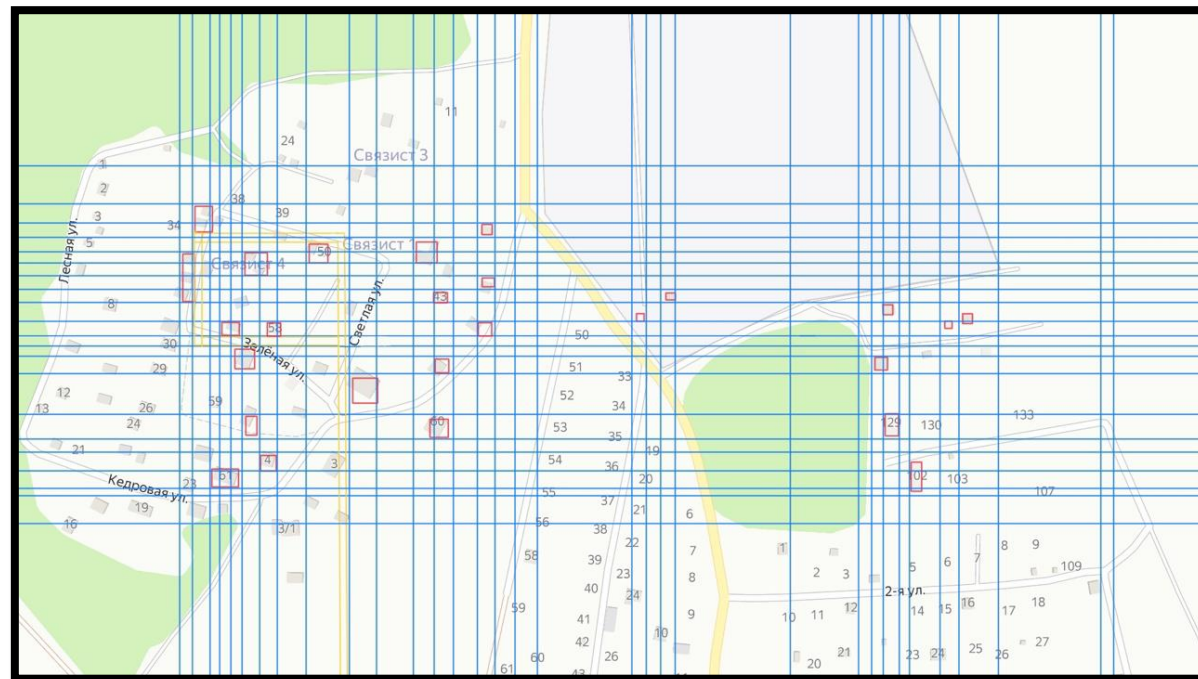
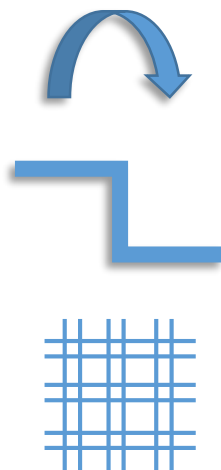
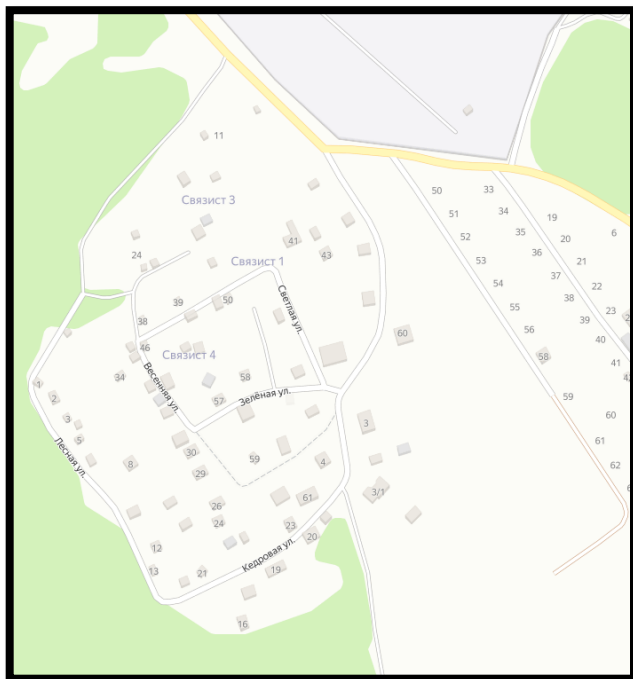
Градостроительный
Атлас
Города Томска



Яндекс Карты



Сетка



Подготовка геометрии области исследования

[illegible]

Признаки ячеек

[illegible][illegible]

Виртуальная модель

[illegible]

Запуск программы

datak

```
249      82      M - число точек по X
247      62      NR - число точек по Y
54       42      LZ - число точек по Z
3.00 - UA - Скорость движения окружающего воздуха (м/с)
20.00 - TA - Температура окружающего воздуха (Цельсии)
100000.00 - PA - Уровень давления воздуха (Па)
45.00 - ALFAA - угол воздушного потока (град)
20.00 - TWALL - температура стен (Цельсии)
0.01 - CLA - влажность воздуха (/)
1000.00 - timsp
```

param

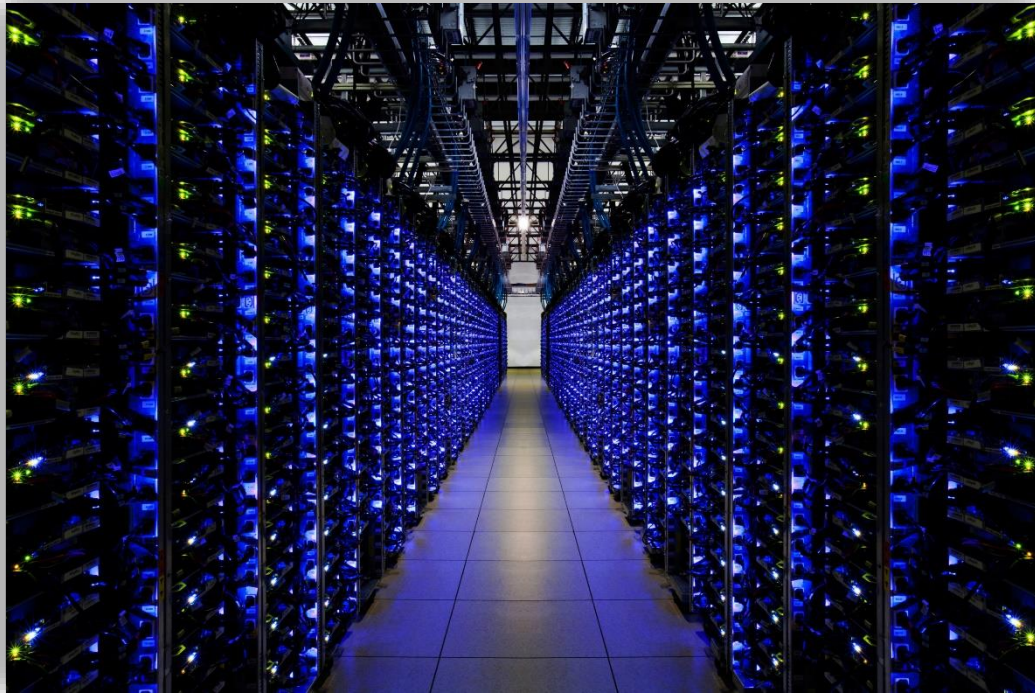
```
module params
  implicit none
  private
  integer(4), public, parameter ::
    im = 249, knr = 247, llz = 54, im2 = im + 1, knr2 = knr + 1, llz2 = llz + 1
end module params
```

grid

```
97
-400.0 -370.0 -350.0 -320.0 -316.0 -275.0 -271.0 -249.0 -245.0 -215.0
-211.0 -205.0 -203.0 -201.0 -197.0 -196.0 -167.0 -161.0 -157.0 -142.0
-138.0 -125.0 -114.0 -112.0 -110.0 -106.0 -98.0 -83.0 -55.0 -51.0
-25.0 -14.0 -4.0 0.0 1.0 10.0 18.0 22.0 25.0 31.0
34.0 41.0 45.0 46.0 49.0 50.0 55.0 60.0 66.0 74.0
77.0 79.0 100.0 104.0 110.0 116.0 131.0 133.0 138.0 140.0
147.0 150.0 154.0 155.0 158.0 163.0 164.0 167.0 170.0 179.0
184.0 187.0 195.0 202.0 206.0 209.0 218.0 228.0 233.0 234.0
240.0 260.0 268.0 270.0 275.0 279.0 283.0 293.0 302.0 309.0
317.0 321.0 328.0 331.0 350.0 370.0 400.0

69
-400.0 -370.0 -350.0 -346.0 -320.0 -316.0 -300.0 -284.0 -280.0 -277.0
-273.0 -265.0 -245.0 -232.0 -216.0 -203.0 -200.0 -196.0 -193.0 -186.0
-170.0 -166.0 -117.0 -113.0 -107.0 -84.0 -64.0 -40.0 -35.0 -30.0
-20.0 0.0 1.0 31.0 41.0 56.0 60.0 75.0 86.0 90.0
96.0 104.0 112.0 116.0 117.0 139.0 154.0 158.0 172.0 182.0
193.0 201.0 211.0 218.0 225.0 236.0 240.0 248.0 256.0 266.0
276.0 286.0 290.0 296.0 307.0 320.0 350.0 370.0 400.0
```

Запуск программы



Thor представляет собой двухпроцессорный сервер со следующими характеристиками: **192Gb RAM, 2xIntel® Xeon® Silver 4214 (2.20GHz).**

Общее количество узлов: $249 \times 247 \times 54 = 3\,321\,162$
(Максимально допустимое $\approx 4\,500\,000$)

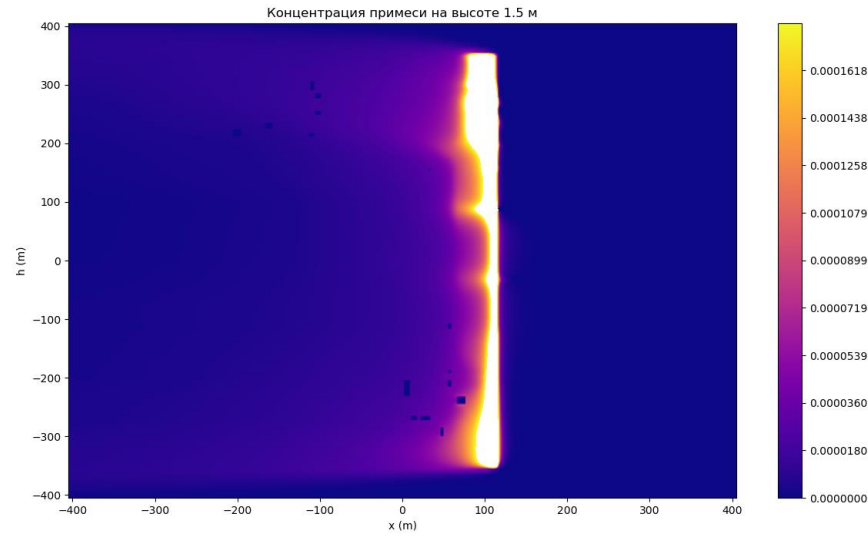
Количество итераций: 1000

Время счета: ~ 4 часа

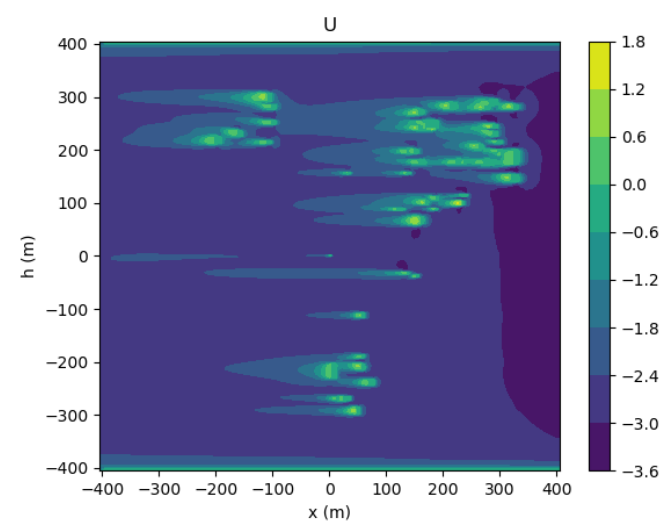
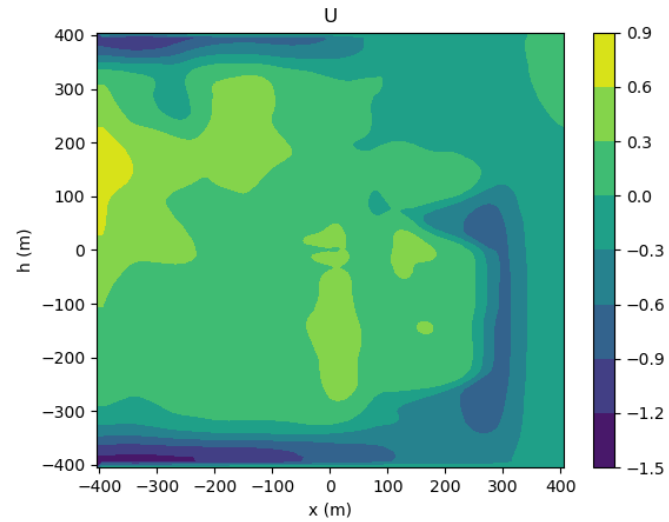
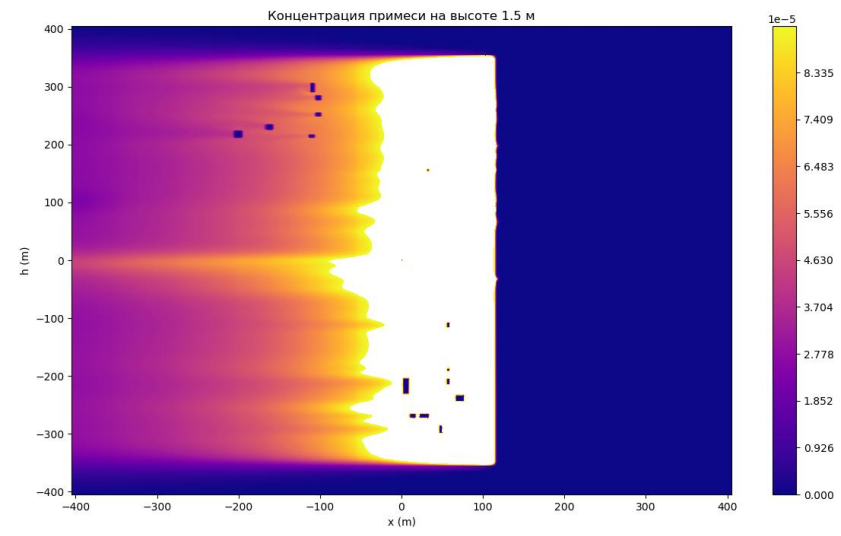
Результаты моделирования

Направление ветра 0°

С растениями

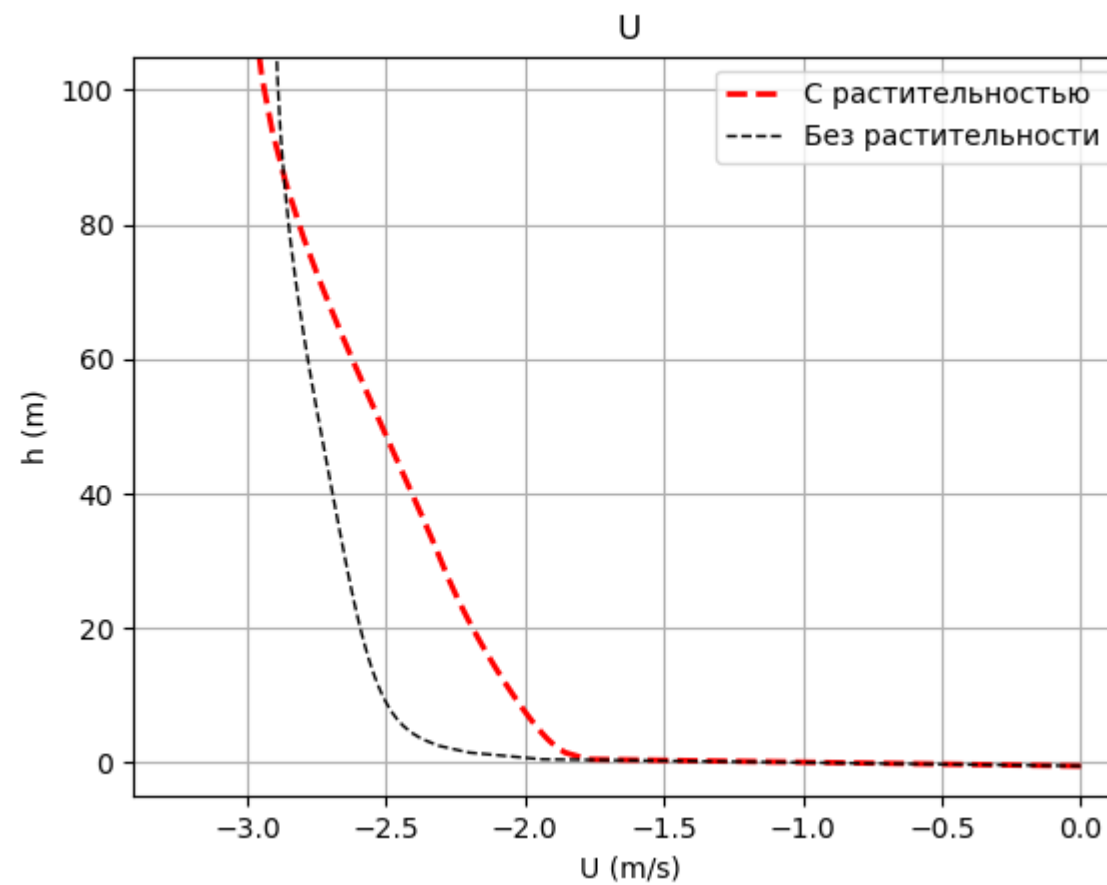
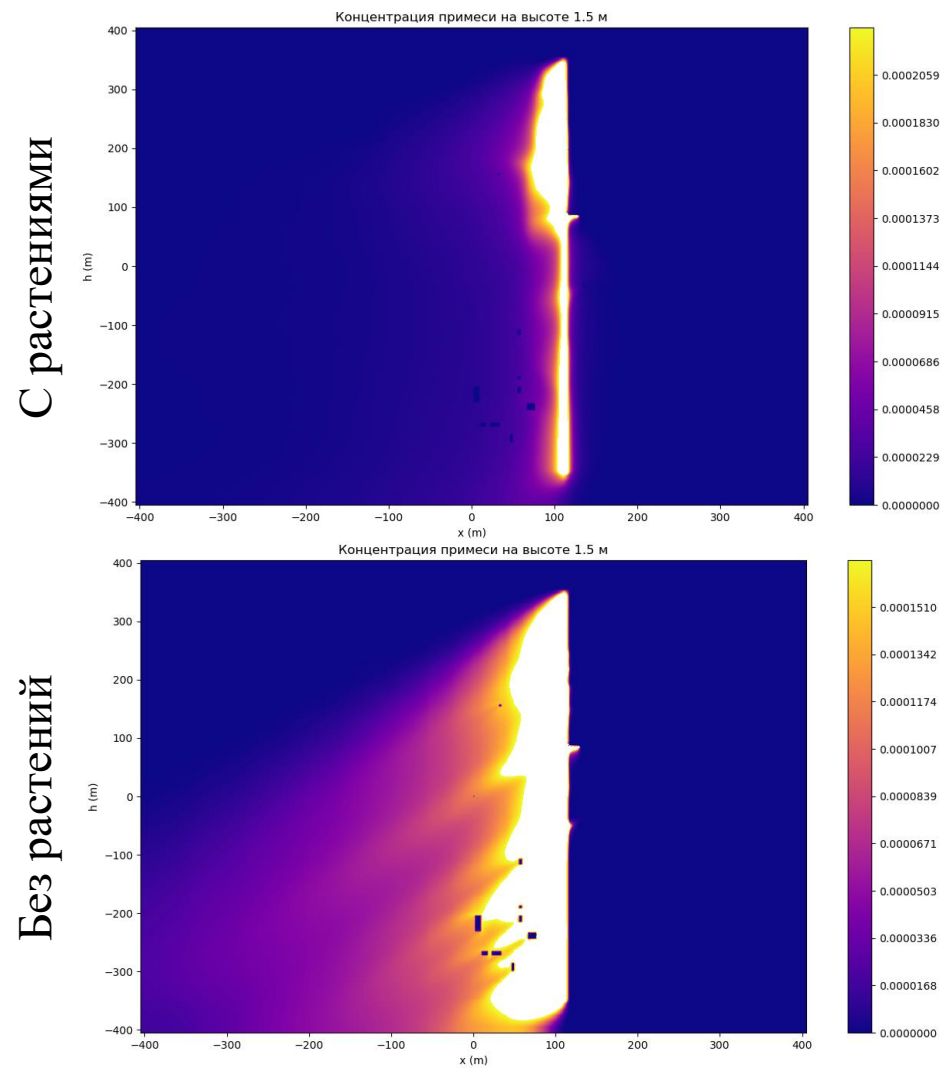


Без растений



Результаты моделирования

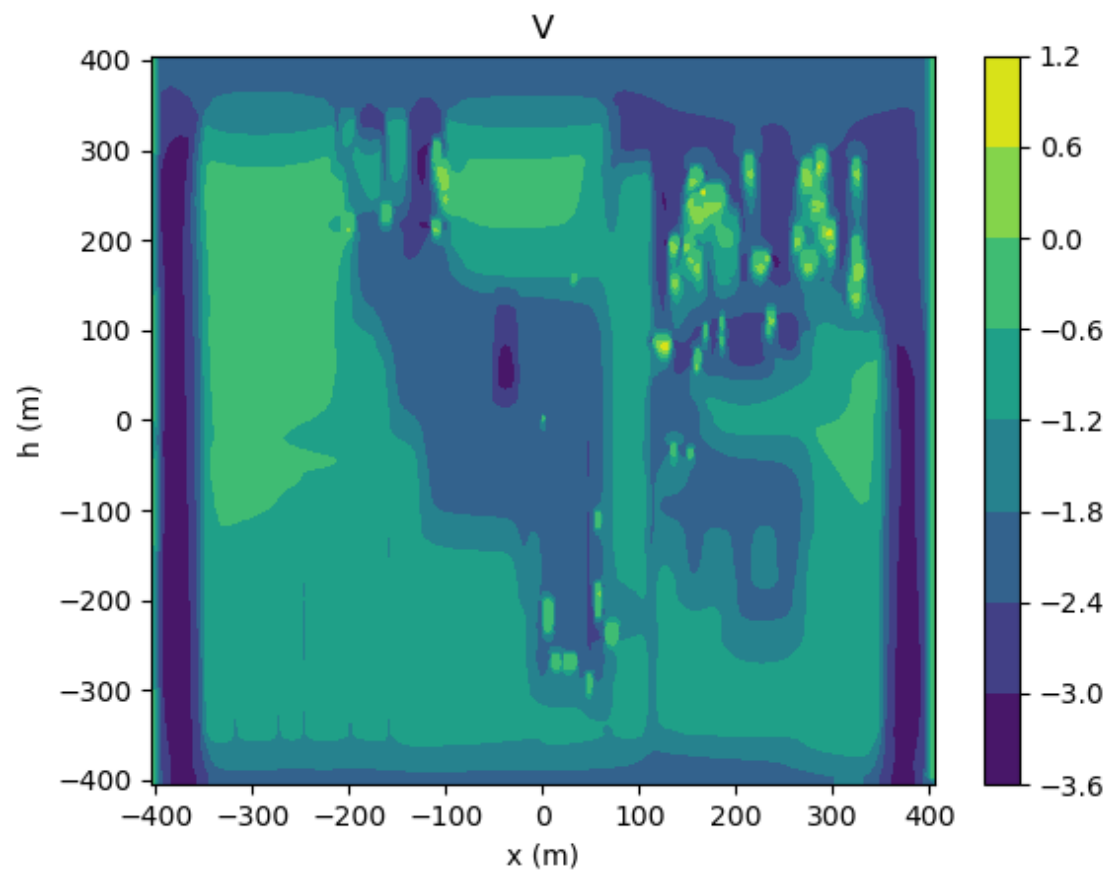
Направление ветра 45°



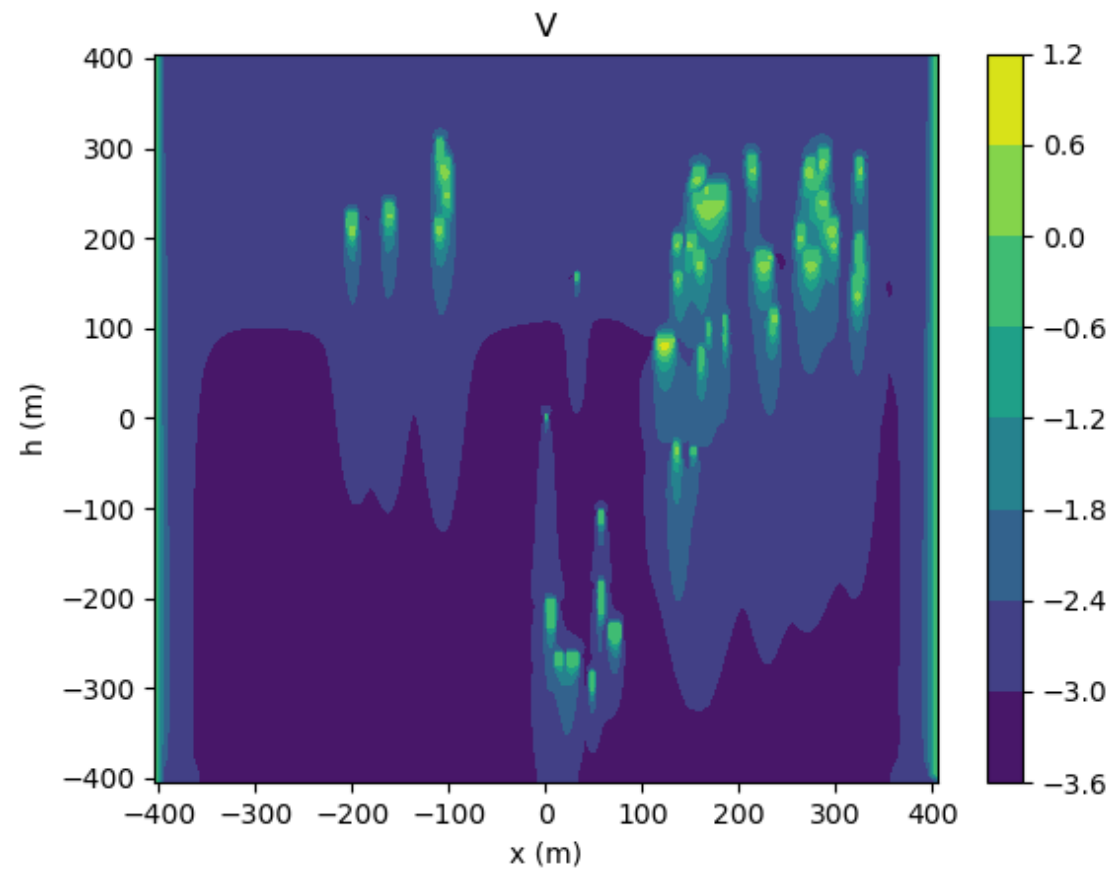
Результаты моделирования

Направление ветра 90°

С растениями



Без растений

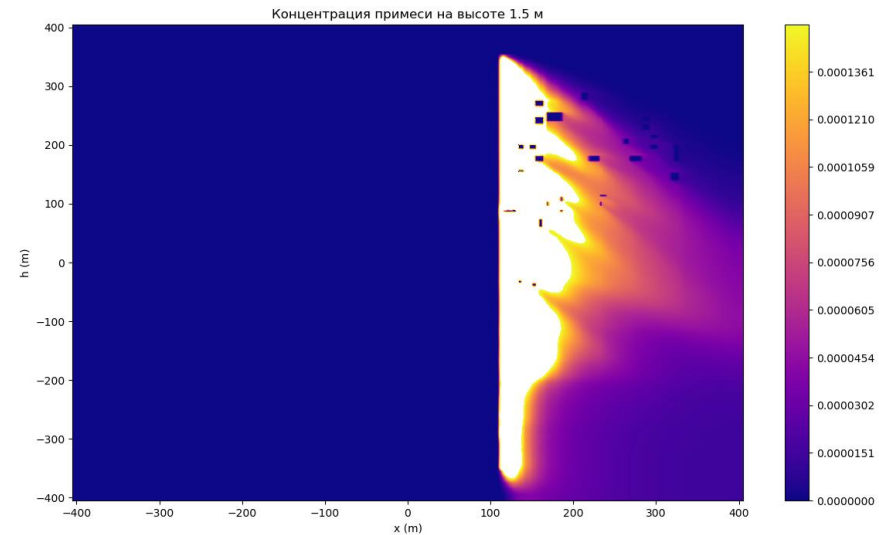
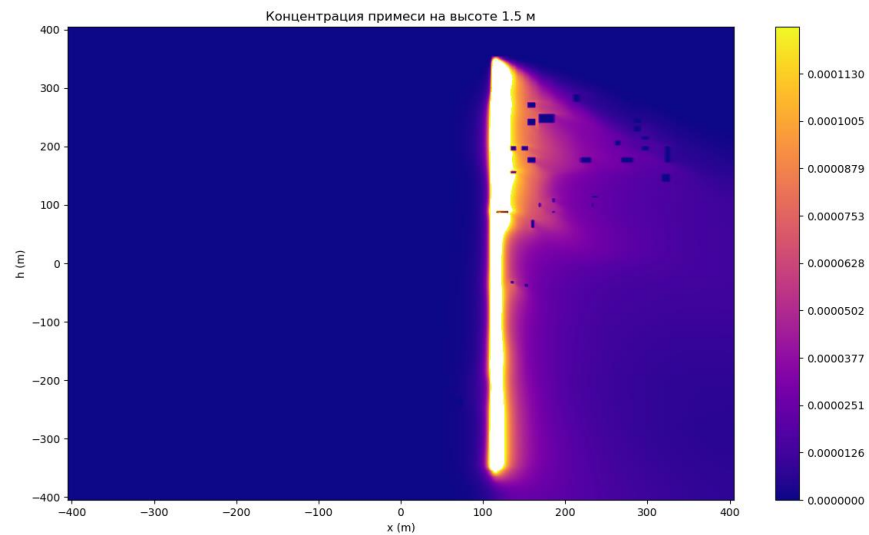


Результаты моделирования

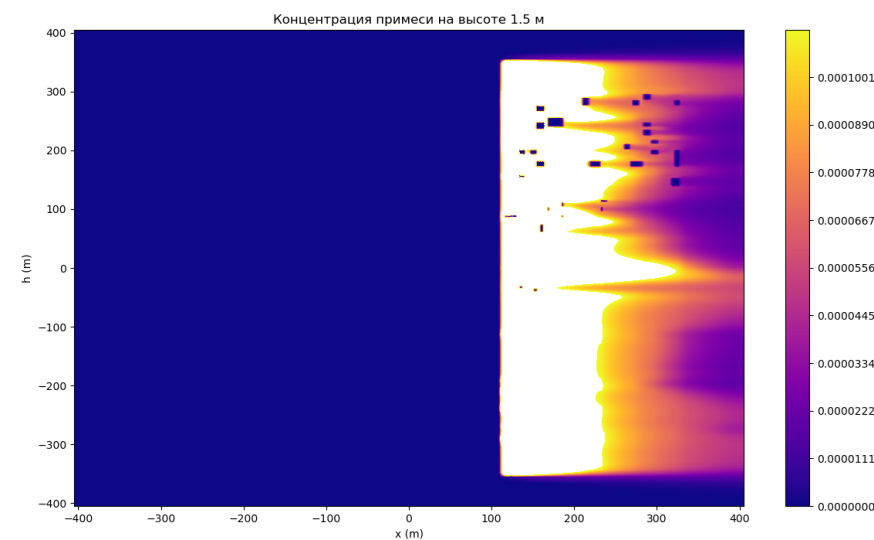
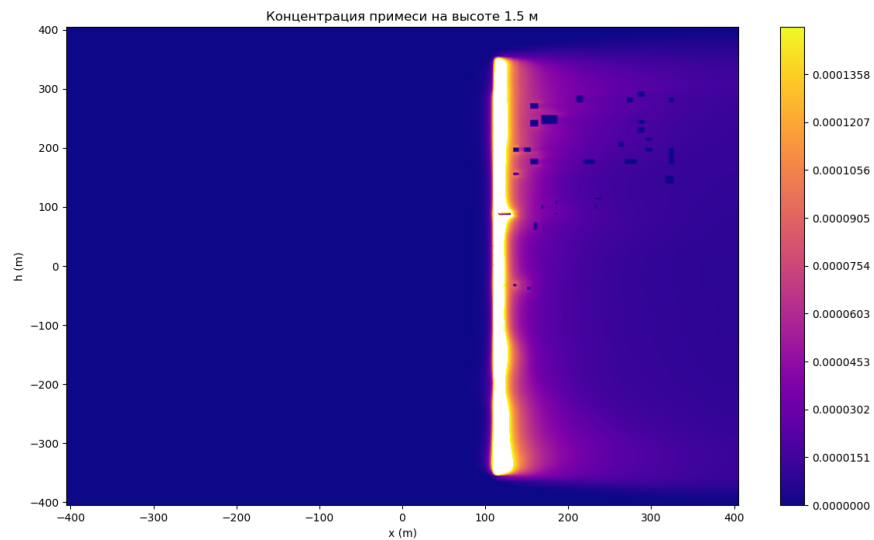
С растениями

Без растений

Направления ветра 135°



Направления ветра 180°

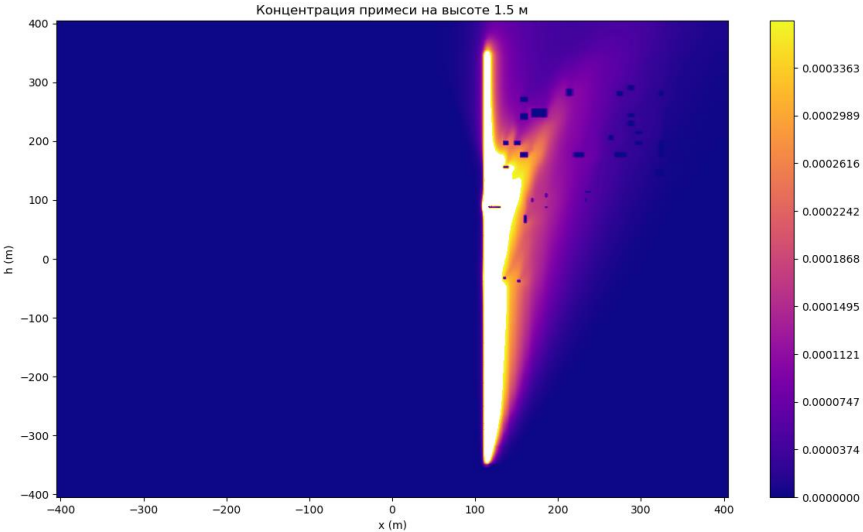
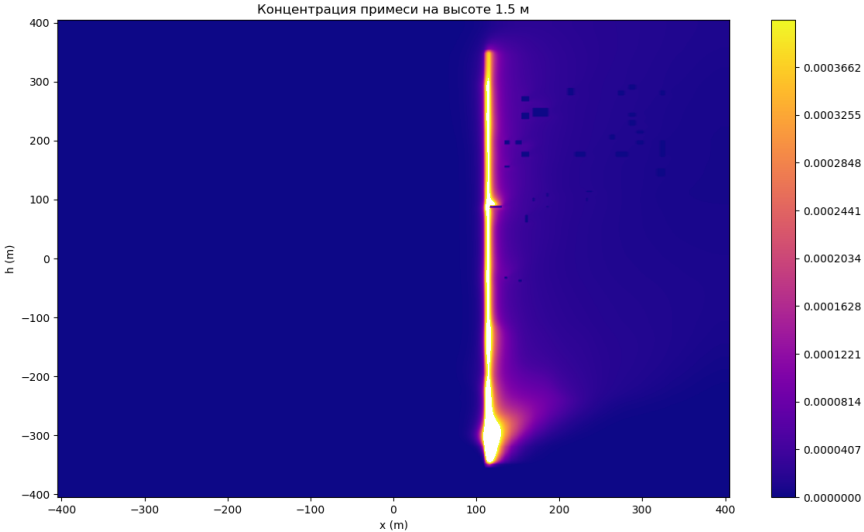


Результаты моделирования

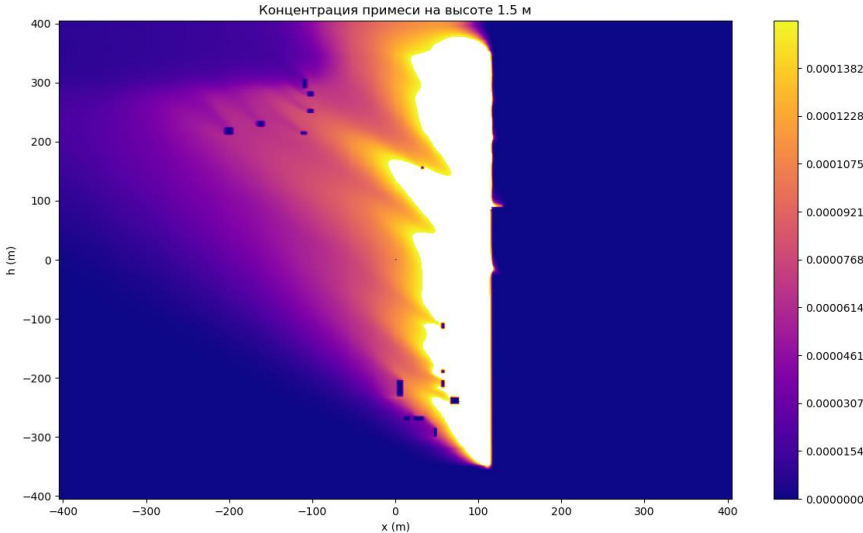
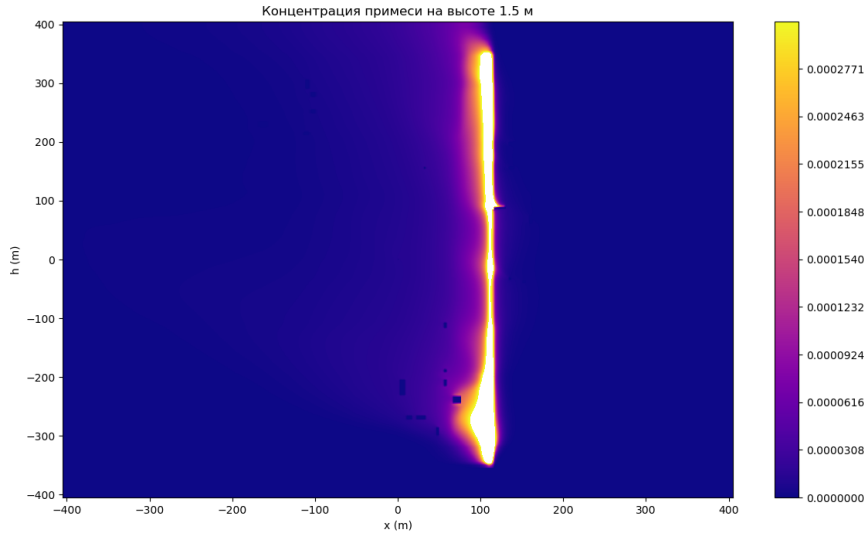
С растениями

Без растений

Направления ветра 225°



Направления ветра 315°





Исследование влияния растительности на характеристики приземного воздушного потока

- Старченко Александр Васильевич ➤ Данилкин Евгений Александрович
- ✓ Лещинский Дмитрий Викторович
- ✓ Дель Ирина Васильевна ✓ Юмин Кирилл Викторович

Заключение

- ✓ Изучены принципы работы модели M2UE.
- ✓ Изучены вопросы актуальности подобных исследований.
- ✓ В модель включена параметризация растительности.
- ✓ Построена цифровая модель научно-испытательного полигона и станции БЭК.
- ✓ Подготовлены наборы скриптов для анализа и визуализации результатов моделирования.
- ✓ Проведены параметрические расчеты.



Спасибо за внимание!