

ПРИМЕНЕНИЕ ДВУМЕРНОЙ МОДЕЛИ ДЛЯ ОПИСАНИЯ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА В ПРОСТРАНСТВЕННО- НЕОДНОРОДНОМ РАСТИТЕЛЬНОМ ПОКРОВЕ

Мухартова Ю.В.¹, Ольчев А.В.², Рыжова М.С.¹

*¹Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова,
физический факультет, Москва, Россия*

*²Институт проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова Российской
Академии Наук, Москва, Россия*

Цели и задачи

- ▶ Основная цель работы – адекватно описать процесс переноса скалярной примеси на границе двух типов растительности с разной структурой и биофизическими свойствами.
- ▶ В рамках исследования предложена двумерная модель, основанная на усредненных уравнениях гидродинамики.
- ▶ Предложенная модель использована для изучения влияния препятствия (лесополосы) на процесс переноса скалярной примеси от заданного источника.

1. Описание модели

1.1. Расчетная область и основные искомые величины

- ▶ Расчетная область – прямоугольник $x \in [-L, L]$, $z \in [0, H]$
- ▶ Скорость ветра: $\vec{V} = \{u(x, z, t), w(x, z, t)\}$,
где u – горизонтальная составляющая,
 w – вертикальная составляющая.
- ▶ Отклонение давления от гидростатического: $\delta p(x, z, t)$.
- ▶ Концентрация пассивной компоненты,
переносимой потоком: $c(x, z, t)$.

1.2. Система уравнений для искомых функций

- ▶ Уравнение неразрывности:

$$\operatorname{div} \vec{V} = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0$$

- ▶ Уравнение Навье–Стокса (уравнение движения):

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \vec{\nabla}) \vec{V} = -\frac{\vec{\nabla} \delta p}{\rho_0} + \nu \Delta \vec{V} + \vec{f}_V,$$

где ρ_0 – плотность воздуха, ν – коэффициент вязкости, $\rho_0 \vec{f}_V$ – плотность внешних сил, обусловленная сопротивлением растительности.

- ▶ Уравнение диффузии в движущемся потоке:

$$\frac{\partial c}{\partial t} + (\vec{V}, \vec{\nabla}) c = \gamma_c \Delta c + f_c$$

где γ_c – коэффициент диффузии, f_c – плотность источников и стоков.

1.3. Усреднение системы

- ▶ Для корректного решения задачи требуется порядка $R_t^{9/4}$ узлов сетки, где

$$R_t = \frac{V_l l}{\nu} \quad - \text{ турбулентное число Рейнольдса,}$$

V_l – скорость энергонесущих вихрей ($V_l \propto |\vec{V}|$), l – типичный размер энергонесущих вихрей, ν – коэффициент вязкости.

- ▶ Для атмосферного приповерхностного слоя $R_t^{9/4} \propto 10^{18}$.
- ▶ Усреднение уравнений по пространству или по ансамблю существенно ослабляет требования на расчетную сетку.

1.3. Усреднение системы

- ▶ Разложение Рейнольдса:

$$\psi = \Psi + \psi'$$

где Ψ – среднее по времени значение функции ψ :

$$\Psi = \bar{\psi} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \psi(\tau) d\tau$$

ψ' – ее флуктуирующая часть.

- ▶ Постулаты Рейнольдса:

$$\overline{\psi'} = 0$$

$$\overline{\psi \xi} = \Psi \Xi + \overline{\psi' \xi'}$$

$$\overline{\Psi \xi} = \Psi \Xi$$

$$\overline{a \psi} = a \Psi, \quad a - \text{число}$$

$$\overline{\psi + \xi} = \Psi + \Xi$$

1.3. Усреднение системы

▶ Пусть $u = U + u'$, $w = W + w'$, $\delta p = \delta P + \delta p'$, $c = C + c'$.

▶ Усредненное уравнение неразрывности:

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial W}{\partial z} = 0$$

▶ Усредненное уравнение движения:

$$\begin{cases} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + W \frac{\partial U}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \delta P}{\partial x} + \nu \Delta U - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'^2}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'u'}) + F_U, \\ \frac{\partial W}{\partial t} + U \frac{\partial W}{\partial x} + W \frac{\partial W}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \delta P}{\partial z} + \nu \Delta W - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'w'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'^2}) + F_W, \end{cases}$$

где $\overline{\vec{f}_v} = \{F_U, F_W\}$.

▶ Усредненное уравнение диффузии:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + U \frac{\partial C}{\partial x} + W \frac{\partial C}{\partial z} = \gamma_c \Delta C - \frac{\partial}{\partial x} (\overline{u'c'}) - \frac{\partial}{\partial z} (\overline{w'c'}) + F_C,$$

где $F_C = \overline{f_c}$.

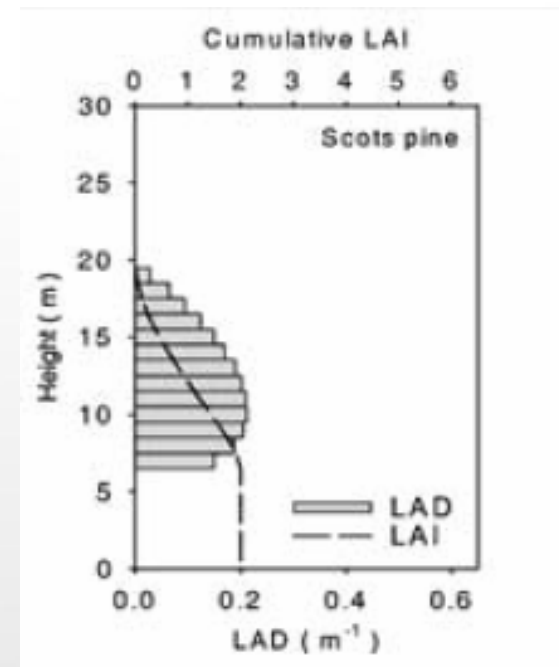
1.4. Учет сопротивления растительности

- ▶ Для описания сил вязкого трения в растительности используем соотношения [Raupach and Shaw, 1982]:

$$F_U = -c_d \cdot LAD \cdot \sqrt{U^2 + W^2} \cdot U, \quad F_W = -c_d \cdot LAD \cdot \sqrt{U^2 + W^2} \cdot W,$$

где c_d – коэффициент сопротивления, LAD – плотность листовой поверхности.

В работе взяты параметры для шотландской сосны [A.Sogachev, G.Menzhulin, M.Heimenn, J.Lloyd, 2002]



1.5. Замыкание системы

- ▶ Усредненная система содержит неизвестные турбулентные потоки:

$$\overline{u'^2}, \quad \overline{u'w'}, \quad \overline{w'^2}, \quad \overline{u'c'}, \quad \overline{w'c'}.$$

- ▶ Кинетическая энергия турбулентного движения:

$$E = \frac{\overline{u'^2 + w'^2}}{2}$$

- ▶ Приближение Буссинеска в двумерном случае:

$$\overline{u'^2} = E - 2K \frac{\partial U}{\partial x}, \quad \overline{u'w'} = -K \left(\frac{\partial W}{\partial x} + \frac{\partial U}{\partial z} \right), \quad \overline{w'^2} = E - 2K \frac{\partial W}{\partial z},$$

$$\overline{u'c'} = -K_c \frac{\partial C}{\partial x}, \quad \overline{w'c'} = -K_c \frac{\partial C}{\partial z},$$

где K и K_c – коэффициенты турбулентной диффузии.

1.5. Замыкание системы

- ▶ Коэффициенты турбулентной диффузии:

$$K = C_\mu E^2 \varepsilon^{-1}, \quad K_c = \alpha K,$$

где C_μ – коэффициент пропорциональности, ε – скорость диссипации турбулентной кинетической энергии, α – число Шмидта.

- ▶ Пусть $\varphi = \varepsilon/E$.

$$\begin{cases} \frac{\partial E}{\partial t} + U \frac{\partial E}{\partial x} + W \frac{\partial E}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\sigma_E^\varphi} \frac{\partial E}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\sigma_E^\varphi} \frac{\partial E}{\partial z} \right) + P_E - \varepsilon, \\ \frac{\partial \varphi}{\partial t} + U \frac{\partial \varphi}{\partial x} + W \frac{\partial \varphi}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{K}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{K}{\sigma_\varphi} \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{\varphi}{E} (C_{\varphi 1} P_E - C_{\varphi 2} \varepsilon) - \frac{\varphi}{E} (C_{\varphi 1} - C_{\varphi 2}) S_d. \end{cases}$$

Здесь σ_E^φ , σ_φ – числа Прандтля, $C_{\varphi 1}, C_{\varphi 2}$ – модельные константы,

$$P_E = 2K \left(\left(\frac{\partial U}{\partial x} \right)^2 + \left(\frac{\partial W}{\partial z} \right)^2 \right) + K \left(\frac{\partial U}{\partial z} + \frac{\partial W}{\partial x} \right)^2$$

– скорость образования турбулентной кинетической энергии,

$$S_d = 12 C_\mu^{1/2} c_d LAD |\vec{V}| E \quad [\text{A.Sogachev, O.Panferov, 2006}]$$

1.6. Граничные условия

- ▶ На боковых границах используем условия сноса:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial W}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial \delta P}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial x} \right|_{x=\pm L} = 0$$

- ▶ На верхней границе:

$$\left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial W}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right|_{z=H} = 0, \quad \delta P|_{z=H} = 0, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=H} = 0$$

- ▶ На нижней границе воспользуемся условием [Fuodhil, 2002]:

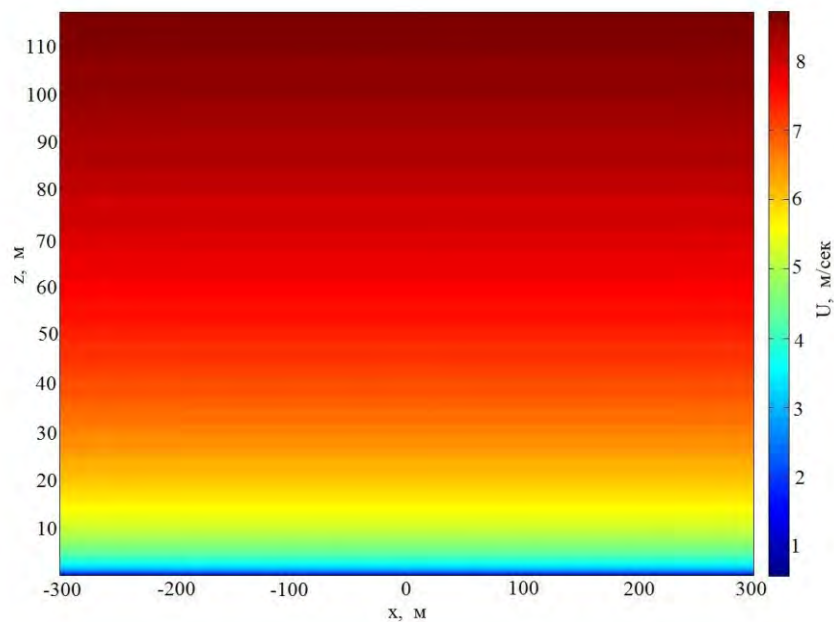
$$K \left. \frac{\partial U}{\partial z} \right|_{z=h_0} = \frac{0.4 C_\mu^{1/4} E^{1/2}}{\ln(z/z_{visc})} U \Big|_{z=h_0}$$

для горизонтальной компоненты скорости, а также условиями

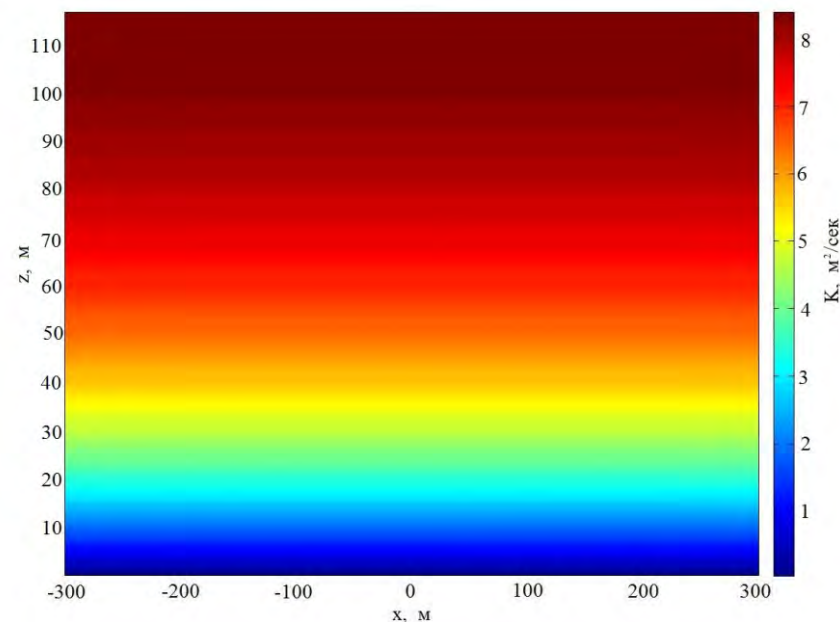
$$\left. \frac{\partial E}{\partial z} \right|_{z=h_0} = 0, \quad W|_{z=h_0} = 0, \quad \left. \frac{\partial \delta P}{\partial z} \right|_{z=h_0} = 0, \quad \varphi|_{z=h_0} = \frac{C_\mu E}{K} \Big|_{z=h_0}, \quad \left. \frac{\partial C}{\partial z} \right|_{z=h_0} = 0$$

2. Моделирование влияния лесополосы на процесс переноса пассивной компоненты

- ▶ Распределение горизонтальной компоненты скорости и коэффициента турбулентной диффузии при отсутствии препятствий:

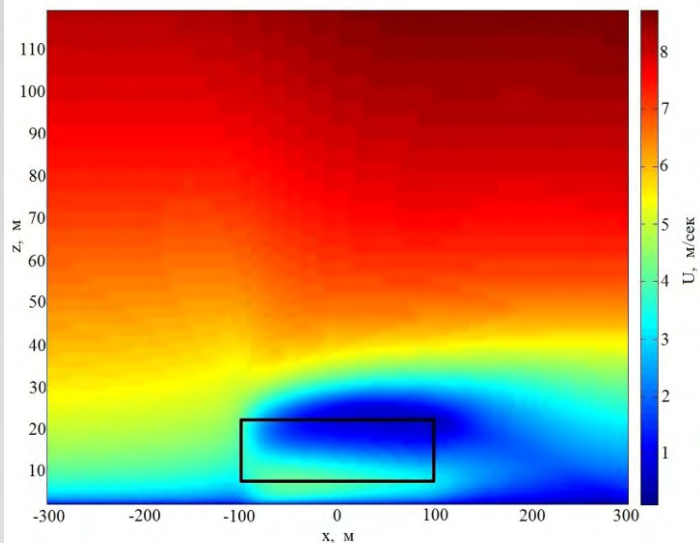


функция U

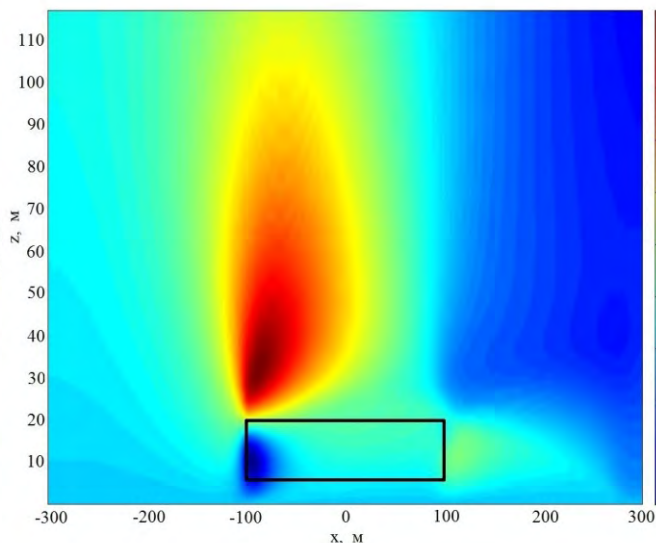


функция K

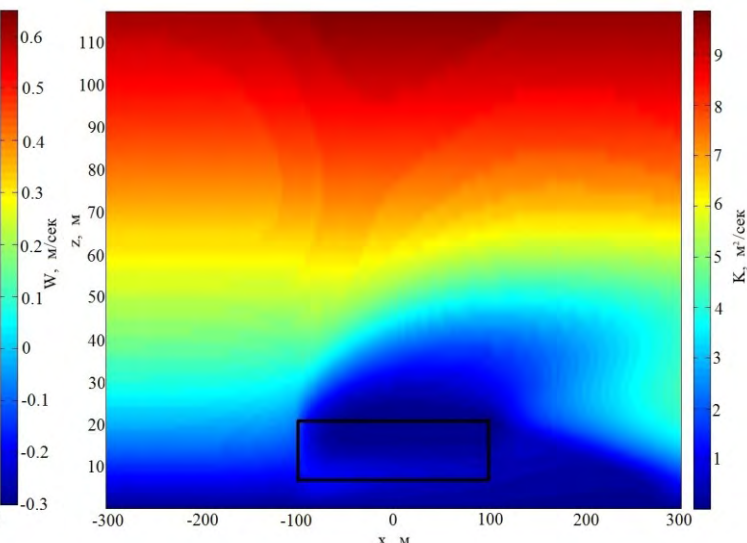
- ▶ При наличии лесополосы шириной 200 м (указать лес)



функция U

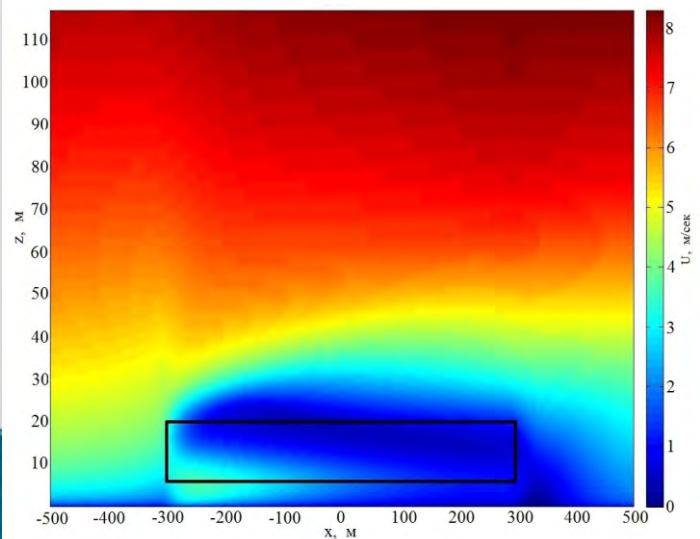


функция W

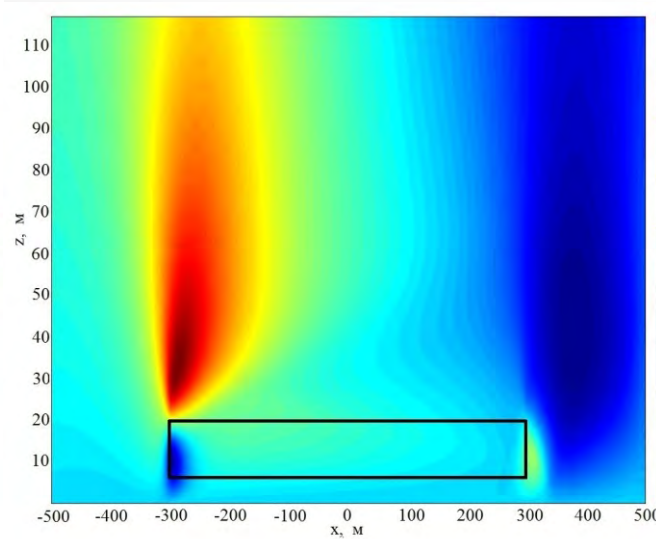


функция K

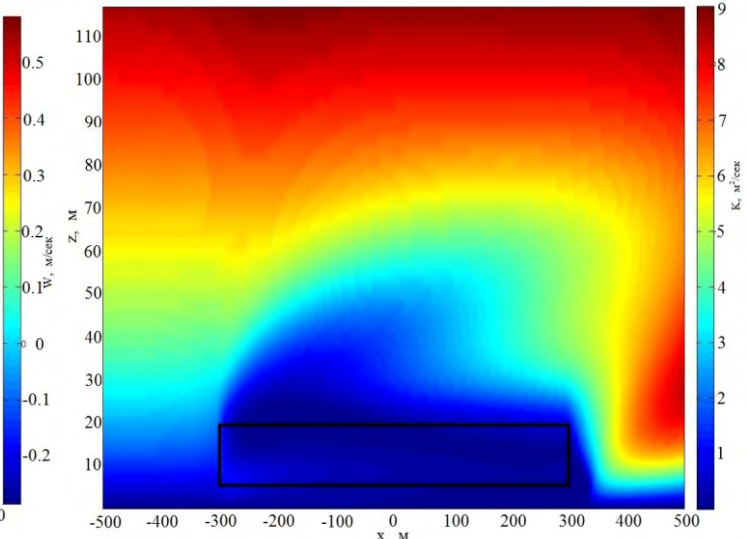
- ▶ При наличии лесополосы шириной 600 м



функция U



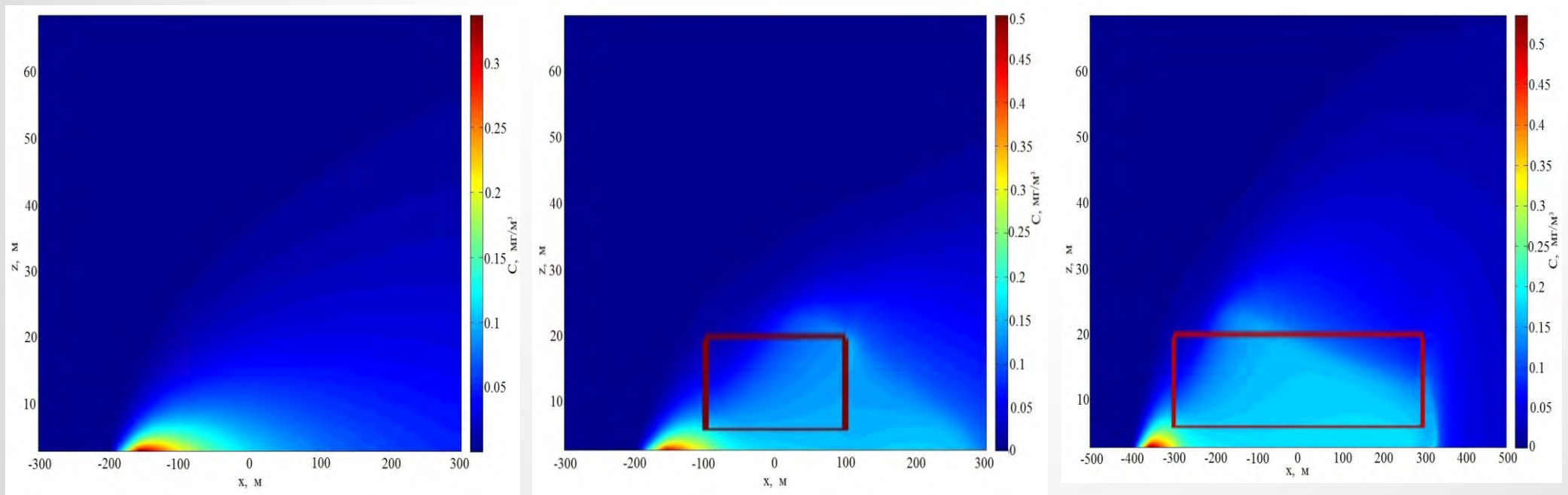
функция W



функция K

Установившееся распределение примеси (SO_2) от стационарного источника

- ▶ Источник на высоте 0.4 м от поверхности:



- ▶ Мощность источника: 0.36 мг/сек в единице объема

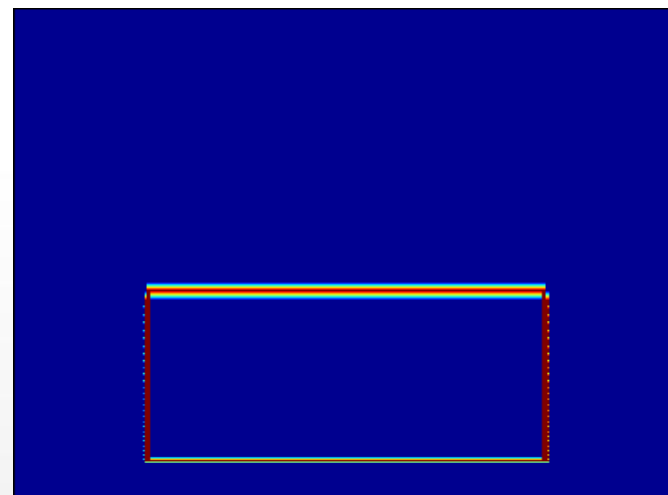
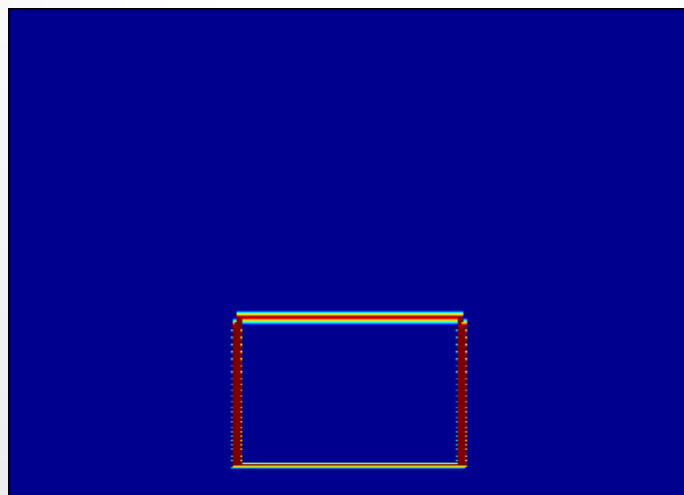
Установившееся распределение примеси (SO_2) от стационарного источника

Источник на высоте 0.4 м от поверхности.

Без преграды:

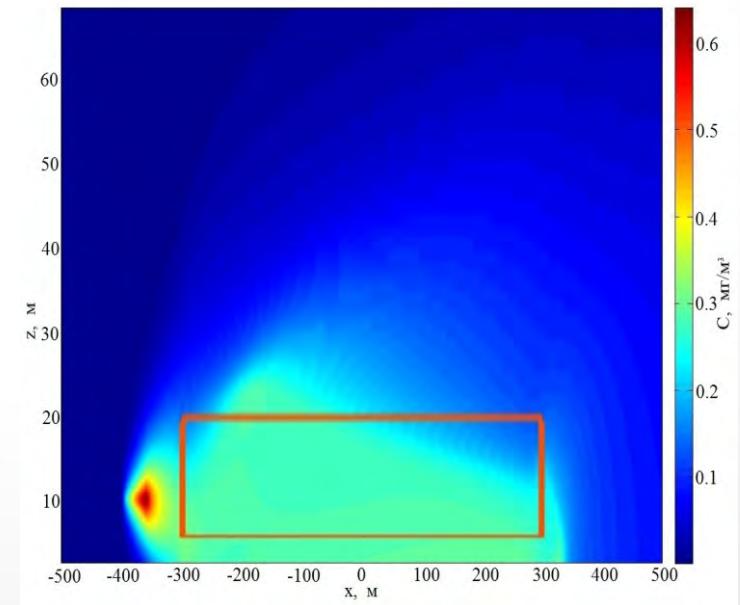
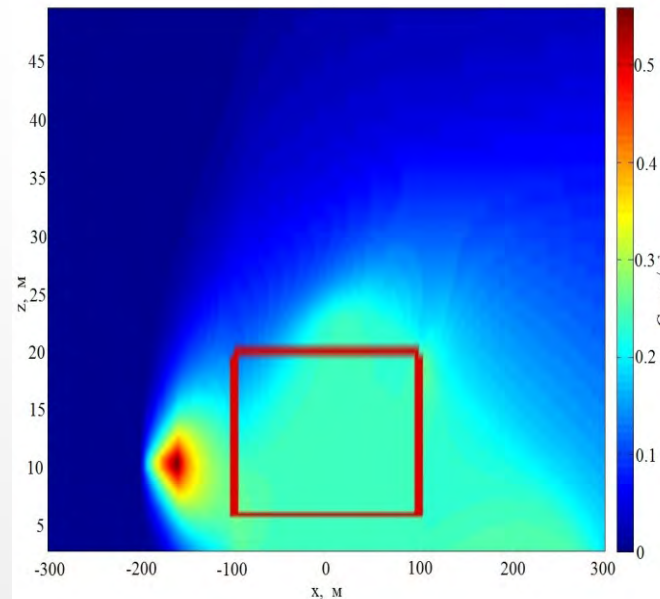
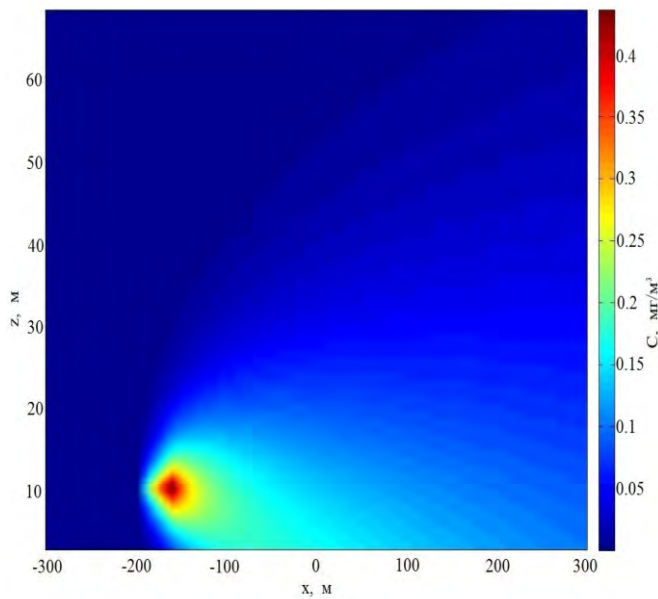
Лесополоса шириной
200 м:

Лесополоса шириной
600 м:



Установившееся распределение примеси (SO₂) от стационарного источника

- ▶ Источник на высоте 10 м от поверхности:



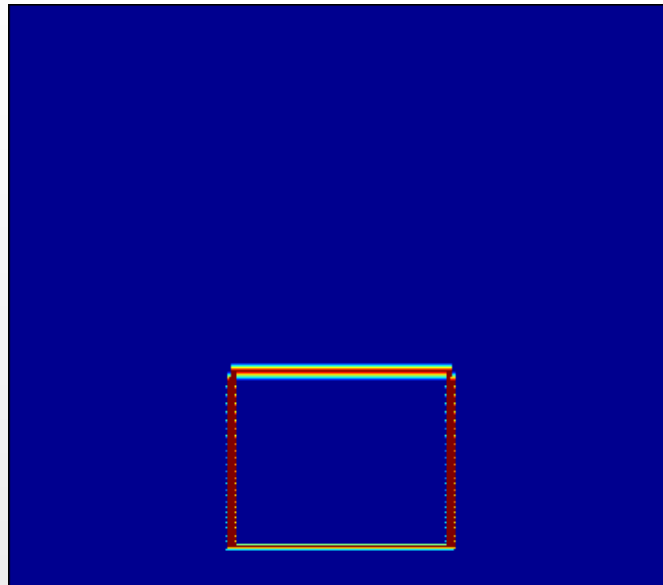
Установившееся распределение примеси (SO_2) от стационарного источника

- ▶ Источник на высоте 10 м от поверхности:

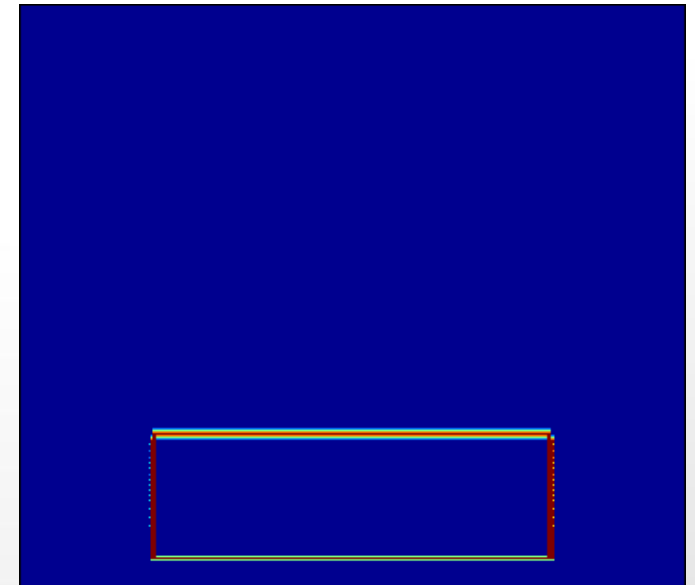
Без преграды:



Лесополоса шириной
200 м:



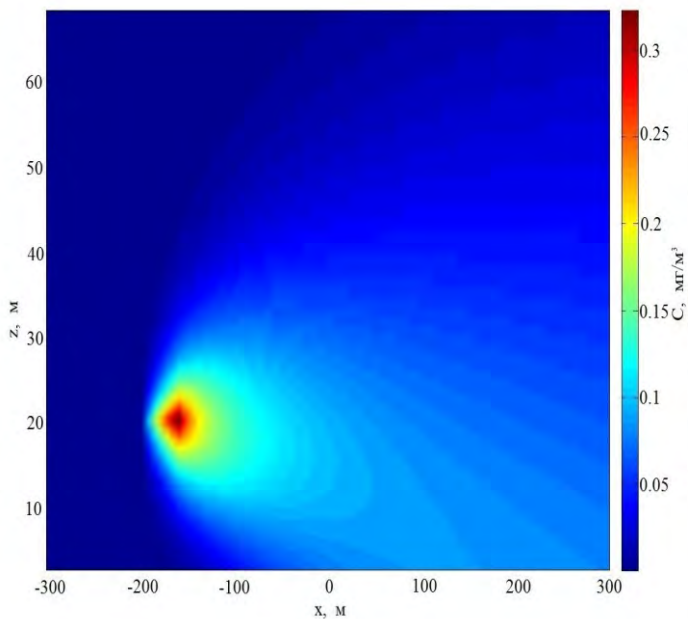
Лесополоса шириной
600 м:



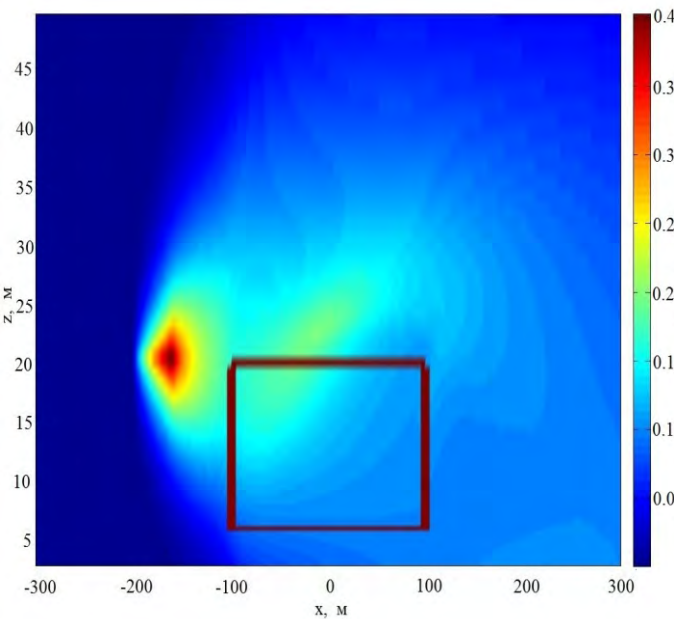
Установившееся распределение примеси (SO_2) от стационарного источника

- ▶ Источник на высоте 20 м от поверхности:

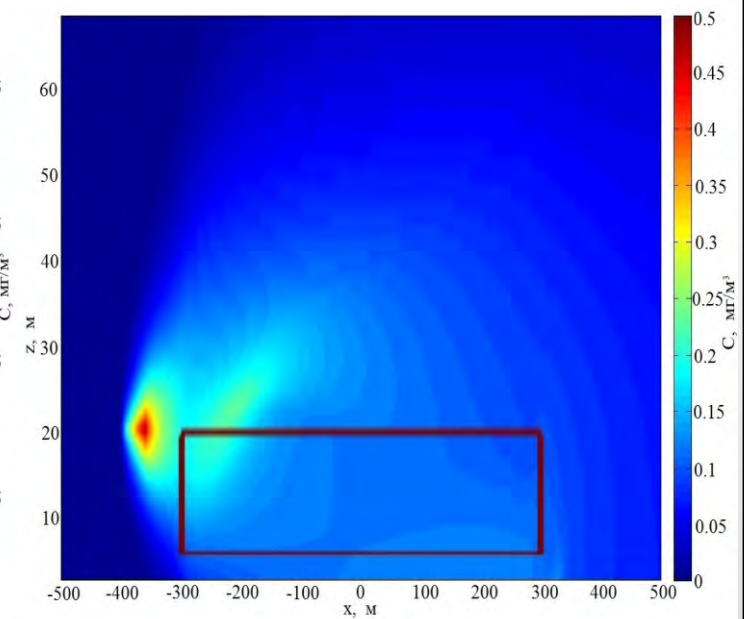
Без преграды:



Лесополоса шириной 200 м:



Лесополоса шириной 600 м:



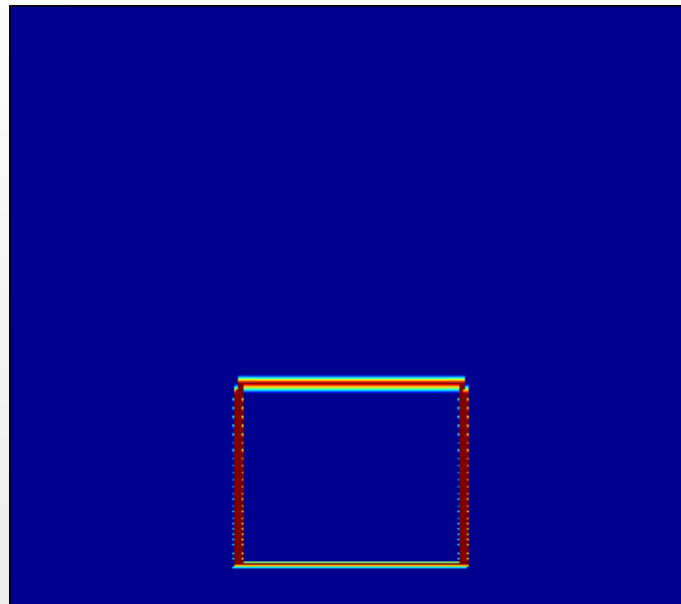
Установившееся распределение примеси (SO_2) от стационарного источника

- ▶ Источник на высоте 20 м от поверхности:

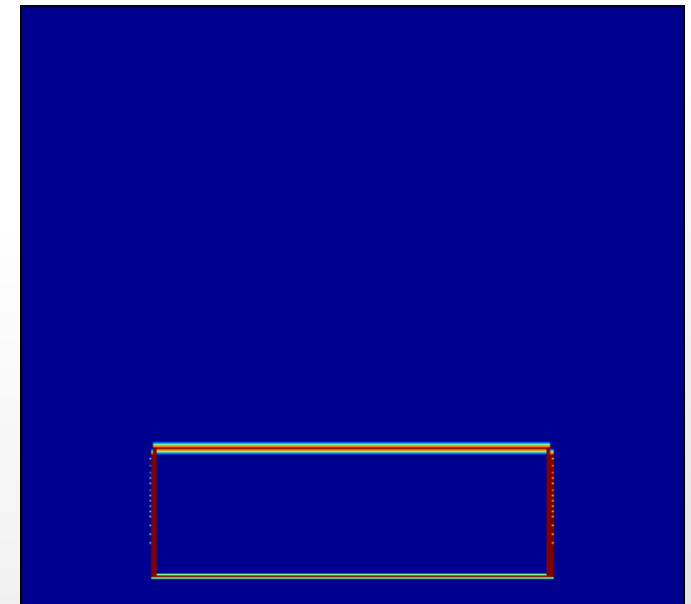
Без преграды:



Лесополоса шириной
200 м:



Лесополоса шириной
600 м:



Выводы

- ▶ Предложена двумерная модель турбулентного переноса вещества воздушным потоком в приповерхностном слое атмосферы, позволяющая оценить влияние неоднородности растительного покрова на процесс переноса.
- ▶ Показано, что наличие неоднородности растительного покрова существенно усложняет структуру поля скорости ветра и оказывает значительное влияние на распределение переносимой примеси.
- ▶ При заданном распределении источников рассмотрено влияние препятствия (лесополосы) на процесс переноса. Показано, что лесополоса замедляет процесс переноса, что приводит к увеличению концентрации примеси в окрестности источника. При отсутствии поглощения происходит накопление примеси в пределах лесополосы.

Спасибо за внимание!