

УЧЕТ ТЕМПЕРАТУРНОЙ СТРАТИФИКАЦИИ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ТУРБУЛЕНТНОГО ПЕРЕНОСА ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ НАД НЕОДНОРОДНОЙ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТЬЮ

Мухартова Ю.В.¹, Крупенко А.С.¹, Мангура П.А.¹, Ольчев А.В.²

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, физический факультет, кафедра математики, Москва, Россия

muhartova@yandex.ru, krupenko.alex@gmail.com, mangura95@mail.ru,

² МГУ имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Москва, Россия
aoltche@yandex.ru

Аннотация: На основе двумерной модели турбулентного переноса проведен комплекс численных экспериментов по оценке влияния неоднородной подстилающей поверхности со сложным рельефом и мозаичной структурой растительности на потоки углекислого газа и водяного пара в приземном слое атмосферы с учетом атмосферной стратификации.

1. Введение

Исследование переноса парниковых газов между земной поверхностью, покрытой растительностью, и атмосферой является в настоящее время объектом многочисленных экспериментальных и модельных исследований, проводимых по всему миру. Наибольшая неопределенность при оценке потоков пока сохраняется для неоднородных участков поверхности со сложным рельефом и мозаичной структурой растительности. Это связано как с сильными возмущениями в поле ветра, возникающими при взаимодействии воздушного потока с элементами препятствий, так и с неравномерным нагревом или выхолаживанием участков земной поверхности, приводящим к локальным конвективным восходящим или нисходящим движениям воздуха. В рамках проведенного исследования для расчета вертикальных потоков парниковых газов была предложена двумерная модель турбулентного переноса над неоднородной подстилающей поверхностью, учитывающая вертикальную температурную стратификацию атмосферы.

2. Описание модели

Разработанная гидродинамическая модель основана на усредненных уравнениях Навье-Стокса и неразрывности:

$$\frac{\partial V_i}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) V_i = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial}{\partial x_i} \delta P - \sum_{j=1}^2 \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \frac{2}{3} \delta_{ij} \bar{\varepsilon} - K \left(\frac{\partial V_i}{\partial x_j} + \frac{\partial V_j}{\partial x_i} \right) \right\} + g \frac{\delta T_v}{T_0} \delta_{i2} - c_d \cdot LAD |\vec{V}| V_i, \quad \text{div } \vec{V} = 0,$$

где $\vec{V} = \{V_1, V_2\}$ – усредненная скорость ветра, x_1, x_2 – горизонтальная и вертикальная координаты, ρ_0 – плотность сухого воздуха, δP – отклонение усредненного давления от значения, определяемого гидростатическим распределением, $\bar{\varepsilon}$ – турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), $K = C_\mu \bar{\varepsilon}^2 \varepsilon^{-1}$ – коэффициент турбулентного обмена, ε – скорость диссипации ТКЭ, δT_v – отклонение виртуальной температуры от сухоадиабатического профиля $T_0(x_2)$, δ_{ij} – символ Кронекера, LAD – плотность фитомассы, c_d – коэффициент сопротивления растительности воздушному потоку. Для вычисления ТКЭ и скорости ее диссипации используются два дополнительных уравнения типа диффузия-адвекция (Sogachev, Panferov, 2006; Мухартова и др., 2015; Mamkin et al., 2016):

$$\frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \bar{\varepsilon} = \text{div}(K_\varepsilon \nabla \bar{\varepsilon}) + P_\varepsilon - \varepsilon - g \frac{K_T}{T_0} \frac{\partial}{\partial x_2} \delta T_v,$$

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \varphi = \text{div}(K_\varphi \nabla \varphi) + \frac{\varphi}{\bar{\varepsilon}} \left(C_{\varphi 1} P_\varepsilon - C_{\varphi 2} \varepsilon - C_{\varphi 3} g \frac{K_T}{T_0} \frac{\partial}{\partial x_2} \delta T_v \right) + 12 \sqrt{C_\mu} (C_{\varphi 2} - C_{\varphi 1}) c_d LAD |\vec{V}| \varphi,$$

где $\varphi = \varepsilon/\bar{\varepsilon}$, K_T , $K_{\bar{\varepsilon}}$ и K_{φ} – коэффициенты турбулентного обмена для температуры, ТКЭ и φ соответственно, $P_{\bar{\varepsilon}}$ – сдвиговая генерация ТКЭ, g – ускорение свободного падения, C_{μ} , $C_{\varphi 1}$, $C_{\varphi 2}$, $C_{\varphi 3}$ – модельные константы (Sogachev 2006). Для вычисления приземной температуры воздуха T используется уравнение теплопроводности, учитывающее процессы теплообмена воздуха с поверхностью почвы и растительным покровом (Mamkin et al., 2016):

$$\frac{\partial T}{\partial t} + (\vec{v}, \nabla)T + \gamma_a \cdot \frac{T_v}{T_0} \cdot V_2 = \text{div}(K_T \cdot \nabla T) + \frac{\gamma_a}{T_0} \cdot K_T \cdot \frac{\partial T}{\partial x_2} + \frac{1}{\rho_0 c_p} (\vec{v}, \nabla) \delta P - \frac{H}{\rho_0 c_p},$$

где $\gamma_a = g/c_p$, c_p – удельная теплоемкость воздуха, H – явный поток тепла.

3. Результаты

Для оценки влияния элементов шероховатости подстилающей поверхности на потоки CO_2 и H_2O был выбран профиль, пролегающий по холмистому участку местности с неоднородной растительностью (Ольчев др., 2017). Результаты численных экспериментов показали существенное воздействие, оказываемое элементами шероховатости поверхности на поле ветра, режим турбулентности, а также локальные и интегральные потоки CO_2 и H_2O в приземном слое атмосферы (рисунок 1 и 2).

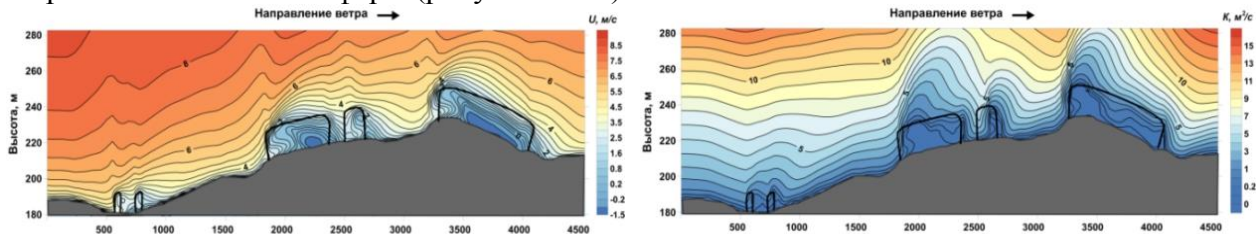


Рисунок 1 – Профили горизонтальной скорости ветра (слева) и коэффициента турбулентного обмена (справа).

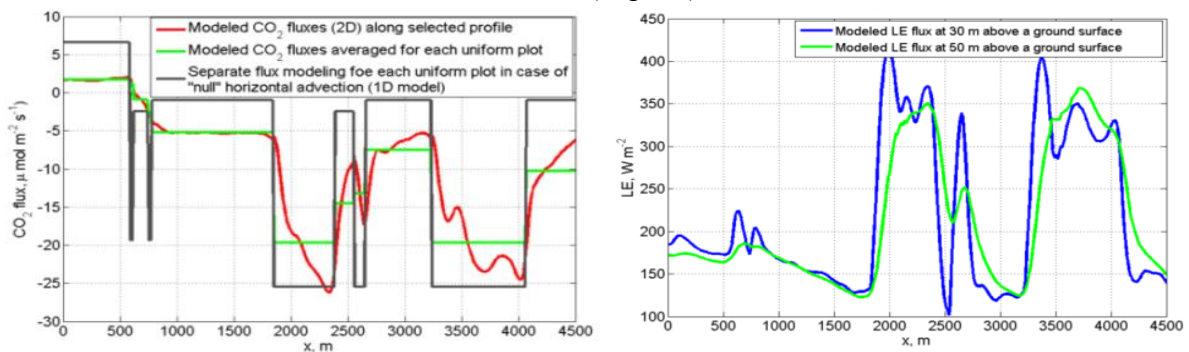


Рисунок 2 – Вертикальный турбулентный поток CO_2 , рассчитанный на высоте 30 м над поверхностью с использованием двумерной и одномерной версии модели (слева), и вертикальный поток H_2O (LE), смоделированный на высоте 30 и 50 м (справа).

Работа выполнена при финансовой поддержке РНФ, грант № 14-14-00956-П.

Литература

- Мухартова Ю.В., Левашова Н.Т., Ольчев А.В., Шапкина Н.Е. Применение двумерной модели для описания турбулентного переноса CO_2 в пространственно-неоднородном растительном покрове // ВМУ. Серия 3. Физика. Астрономия. 2015. №1. С. 15-22.
- Ольчев А.В., Авиллов В.К., Байбар А.С. и др. Леса Европейской территории России в условиях меняющегося климата. М: Товарищество научных изданий КМК. 2017. 276 с.
- Mamkin V., Kurbatova J., Avilov V., et al. Changes in net ecosystem exchange of CO_2 , latent and sensible heat fluxes in a recently clear-cut spruce forest in western Russia: results from an experimental and modeling analysis // ERL. Vol. 11. № 12. 2016. P. 125012-125012
- Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag // Boundary-Layer Meteorol. 2006. P. 1-37.