

География

УДК 551.553

ОЦЕНКА ПРОСТРАНСТВЕННОЙ НЕОДНОРОДНОСТИ ПОЛЕЙ ВЕТРА
И ПОТОКОВ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА НАД НЕОДНОРОДНОЙ
ПОВЕРХНОСТЬЮ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ МОДЕЛЬНЫХ
ЭКСПЕРИМЕНТОВ

А. А. НАРИМАНИДЗЕ^{1,2*}, Ю. В. МУХАРТОВА^{1**}, С. В. ЗАГИРОВА^{3***}, А. В. ОЛЬЧЕВ^{1,2****}

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва, Россия

² Институт географии РАН, Москва, Россия

³ Институт биологии ФИЦ Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар, Россия

На основании проведенных модельных экспериментов получены оценки пространственной изменчивости поля ветра и потоков диоксида углерода (CO_2) на разных высотах над сильно неоднородным лесным участком природного заказника “Ляльский” в Республике Коми, Россия ($62^{\circ}16'28''$ с.ш., $50^{\circ}39'54''$ в.д.). Расчеты проводились с использованием трехмерной гидродинамической RANS-модели (Reynolds averaged Navier-Stokes) переноса парниковых газов. В качестве входных параметров модели использовались данные лидарной съемки растительности и рельефа беспилотными летательными аппаратами, камерные измерения потоков CO_2 у поверхности почвы, данные реанализа ERA5. Результаты модельных экспериментов показали значительную пространственную изменчивость поля ветра и потоков CO_2 внутри и над пологом леса, определяемую неоднородностью рельефа и мозаичной структурой растительности. Сравнение смоделированных потоков с потоками, измеренными методом турбулентных пульсаций на станции долговременного мониторинга, показало, с одной стороны, хорошее согласование результатов модельных расчетов с результатами измерений потоков для участка местности, прилегающего к станции измерений, а с другой стороны, значительную пространственную изменчивость вертикальных потоков в пределах модельной области, существенно осложняющую пространственную экстраполяцию результатов локальных измерений потоков.

<https://doi.org/10.46991/PYSUC.2025.59.2.440>

Keywords: three-dimensional hydrodynamic model, non-uniform underlying surface, wind field, GHG fluxes.

Введение. Современное глобальное изменение климата, по мнению большинства исследователей, обусловлено преимущественно увеличением концентрации парниковых газов в атмосфере от антропогенных и природных источников [1]. Наземные экосистемы играют ключевую роль в формировании

* E-mail: annanarimanidze1563@gmail.com

** E-mail: muhartova@yandex.ru

*** E-mail: zagirova@ib.komisc.ru

**** E-mail: aoltche@gmail.com

баланса парниковых газов в атмосфере. С одной стороны, растительный и почвенный покров являются активными источниками диоксида углерода (CO_2) благодаря процессам автотрофного и гетеротрофного дыхания, а с другой стороны, растительность активно поглощает CO_2 из атмосферы в процессе фотосинтеза, тем самым частично компенсируя рост CO_2 в атмосфере за счет антропогенных выбросов [2]. Наиболее точным и теоретически обоснованным методом для прямых измерений потоков парниковых газов между земной поверхностью и атмосферой в природных экосистемах является метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [3]. Метод позволяет получить достаточно репрезентативные данные по потокам над горизонтально-однородной подстилающей поверхностью. Однако его использование в условиях сильно неоднородных ландшафтов сопряжено со значительными погрешностями.

Хорошей альтернативной методикой для оценки потоков парниковых газов над неоднородной земной поверхностью в случаях ограниченной применимости экспериментальных методов измерения потоков служат математические модели [4, 5]. В зависимости от пространственной структуры подстилающей поверхности могут использоваться как одномерные, так и более сложные трехмерные модели. Для земной поверхности со сложным рельефом и неоднородной растительностью применимость одномерных моделей сильно затруднена [6], и приоритетным направлением служит использование более сложных трехмерных моделей.

В рамках нашего исследования для оценки поля ветра и потоков парниковых газов в приземном слое атмосферы на лесном участке природного заказника “Ляльский” (Республика Коми) применяется трехмерная математическая RANS-модель (Reynolds averaged Navier-Stokes) эмиссии, поглощения и переноса парниковых газов, основанная на уравнениях Навье-Стокса и неразрывности, решаемая с использованием осреднения Рейнольдса и гипотезы Буссинеска, а также уравнении адвекции-диффузии для концентрации соответствующего парникового газа [7].

Целью исследования является оценка пространственной неоднородности потоков CO_2 в пределах выбранного экспериментального лесного участка с помощью трехмерной гидродинамической модели, а также оценка репрезентативности проводимых на станции долговременных измерений потоков парниковых газов методом турбулентных пульсаций.

Материалы и методы исследования. В качестве объекта исследования в работе был выбран участок природного заказника, расположенный недалеко от деревни Ляли к востоку от р. Вымь в Республике Коми (рис. 1). Климат территории исследования относится к влажному континентальному и характеризуется холодной зимой и умеренно теплым летом [8]. Экспериментальный участок ограничен координатами $62^{\circ}15'46''$ и $62^{\circ}16'18''$ с.ш., $50^{\circ}40'29''$ и $50^{\circ}41'38''$ в.д., располагаясь на высотах 110–130 м над у.м. Лесной массив заказника относится к таежной зоне и в основном представлен хвойными и хвойно-мелколиственными лесами (ельники разнотравно-черничные, ельники сфагновые, сосняки сфагновые). На участке преобладают овражно-балочные формы рельефа с перепадами высот до 20 м. Почвенный покров представлен торфяно-подзолистыми, глеевыми, подзолистыми и иллювиально-гумусовыми почвами.

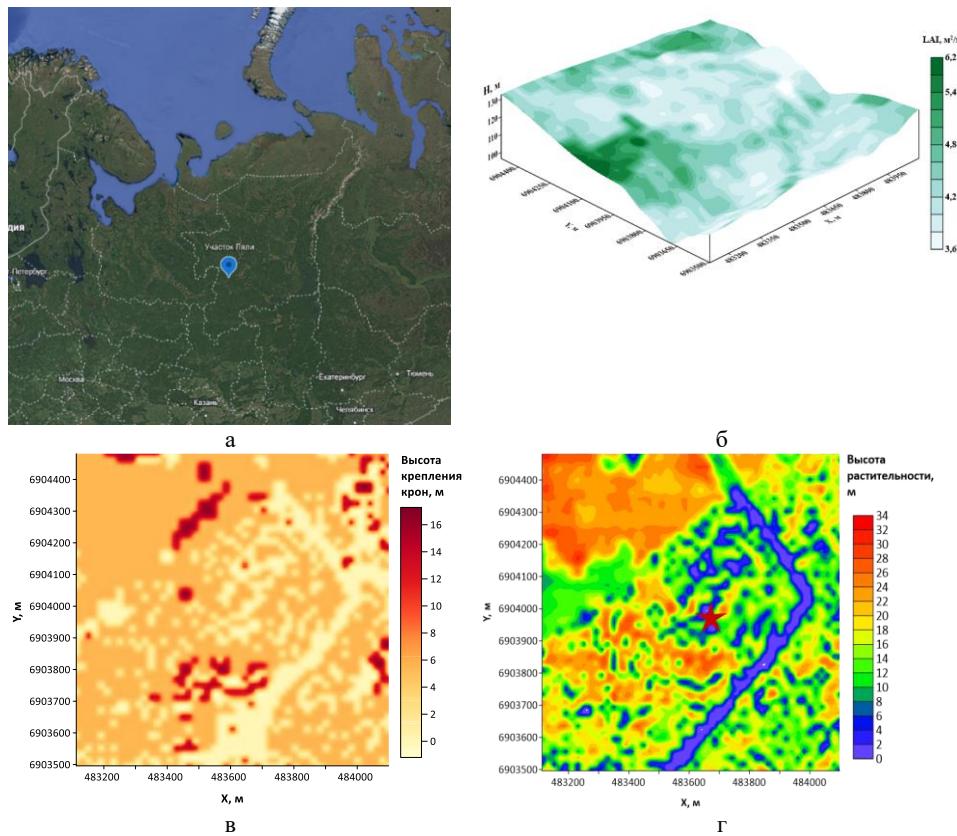


Рис. 1. Географическое положение природного заказника “Ляльский” (а); рельеф исследуемого участка и распределение листового индекса LAI (б); пространственное распределение высот крепления крон на исследуемом участке (в); карта пространственного распределения высоты растительности (г). Звездочкой обозначено расположение измерительной мачты.

Вертикальное распределение биомассы в кронах деревьев в модели задавалось по средней высоте отдельных пород деревьев и высоте крепления кроны (рис. 1, в). Средняя высота крепления крон для хвойной растительности (ели и сосны) составляет в среднем 5,5 м, а высота крепления крон для лиственных пород деревьев (береск и осины) – 15,5 м. Степень сомкнутости крон составляет 0,7–0,9. На рис. 1, г показана карта распределения высоты растительности в пределах экспериментального участка. Часть территории пересекает просека, вырубленная под линию электропередач.

Для расчетов и описания пространственно-временной изменчивости потоков парниковых газов была использована RANS-модель. Она состоит из системы дифференциальных уравнений, которые описывают структуру воздушного потока над растительностью и в ее пределах, эмиссию и поглощение парниковых газов растительностью и почвой, перенос парниковых газов в пограничном слое атмосферы. Модель основана на системе уравнений Навье–Стокса, осреднении Рейнольдса и гипотезе Буссинеска [9, 10]:

$$\frac{\partial \vec{V}}{\partial t} + (\vec{V}, \nabla) \vec{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - (\nabla, \vec{V}') \vec{V}' + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_d + \vec{F}_r + \vec{g},$$

$$\vec{F}_{cor} = -2\Omega\vec{\eta} \times \vec{\bar{V}}, \quad \vec{F}_d = -c_d \text{ PLAD} \left| \vec{\bar{V}} \right| \vec{\bar{V}}, \quad \vec{F}_r = -\text{ТОРО} \left| \vec{\bar{V}} \right| \vec{\bar{V}},$$

где $\vec{\bar{V}} = \{\bar{u}, \bar{v}, \bar{w}\}$ – трехмерный вектор осредненной скорости ветра, m/c ; $\vec{V}' = \{u', v', w'\}$ – трехмерный вектор пульсаций скорости ветра, m/c ; ρ – плотность воздуха, kg/m^3 ; P – атмосферное давление, Pa ; \vec{F}_{cor} – удельная сила Кориолиса, m/c^2 ; \vec{F}_d – удельная сила сопротивления растительности, m/c^2 ; \vec{F}_r – удельная сила “сопротивления” элементов рельефа, моделируемого как полупроницаемое препятствие с достаточно большим коэффициентом сопротивления ТОРО (x, y, z) (над поверхностью земли эта величина равна 0) [11]; Ω – угловая скорость вращения Земли; $\vec{\eta}$ – единичный вектор, направленный вдоль оси вращения Земли; c_d – безразмерный коэффициент сопротивления растительности воздушному потоку; PLAD – проективная площадь поверхности растительности, включая фотосинтезирующие и нефотосинтезирующие элементы растительности, m^2/m^3 [12]. Величина PLAD рассчитывалась как сумма LAD (Leaf Area Density) и SAD (аналог LAD для стволов и ветвей), причем

$$\text{LAI} = \int_0^{h_c} \text{LAD} \, dz, \quad \text{SAI} = \int_0^{h_c} \text{SAD} \, dz,$$

где h_c – высота растительности, $\text{PLAI} = \text{LAI} + \text{SAI}$.

Для замыкания системы уравнений в модели используется схема полуторного порядка, которая основана на гипотезе Буссинеска:

$$\begin{aligned} \overline{(u')^2} &= \frac{2}{3}E - 2K \frac{\partial \bar{u}}{\partial x}, & \overline{(v')^2} &= \frac{2}{3}E - 2K \frac{\partial \bar{v}}{\partial y}, & \overline{(w')^2} &= \frac{2}{3}E - 2K \frac{\partial \bar{w}}{\partial z}, \\ \overline{u'v'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial y} + \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} \right), & \overline{u'w'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{u}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} \right), & \overline{v'w'} &= -K \left(\frac{\partial \bar{v}}{\partial z} + \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} \right), \end{aligned}$$

где E – турбулентная кинетическая энергия, m^2/c^2 ; K – коэффициент турбулентности, m^2/c . Коэффициент K рассчитывается через турбулентную кинетическую энергию E и скорость ее диссипации ε (m^2/c^3) по формуле $K = C_\mu E/\omega$, где C_μ – безразмерный коэффициент, а E и частота Колмогорова $\omega = \varepsilon/E$ (c^{-1}) находятся из следующей системы уравнений:

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial t} + \left(\vec{\bar{V}}, \nabla \right) E &= \text{div}(K_E \nabla E) + P_E - \varepsilon + S_E, \\ \frac{\partial \omega}{\partial t} + \left(\vec{\bar{V}}, \nabla \right) \omega &= \text{div}(K_\omega \nabla \omega) + \frac{\omega}{E} (C_\omega^1 P_E - C_\omega^2 \varepsilon) + S_\omega, \end{aligned}$$

где K_E и K_ω – пропорциональные K коэффициенты турбулентной диффузии для E и ω , соответственно, P_E – сдвиговая генерация турбулентной кинетической энергии, m^2/c^3 ; S_E описывает изменение турбулентной кинетической энергии за счет образования вихрей за препятствием, m^2/c^3 ; C_ω^1 и C_ω^2 – безразмерные коэффициенты подобия [13]; S_ω – описывает увеличение ω за счет взаимодействия с препятствиями, c^{-2} [7].

Пространственное распределение концентрации углекислого газа может быть получено через уравнение “диффузия–адвекция” [14, 15]:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \left(\vec{V}, \nabla \right) C = \operatorname{div}(K_C \nabla C) + F_b - F_{ph},$$

$$F_{ph} = \frac{LAD}{a} (g_s - g_0) (C - \Gamma_*) \left(1 + \frac{D_s}{D_0} \right),$$

где C – концентрация CO_2 , $\text{мкмоль}/\text{м}^3$; K_C – коэффициент турбулентного обмена, $\text{м}^2/\text{с}$; F_b – объемные источники CO_2 за счет дыхания растительности и почвы; F_{ph} – объемные стоки CO_2 за счет процесса фотосинтеза, $\text{мкмоль}/\text{м}^3\text{с}$; a – безразмерный эмпирический коэффициент; g_s – устьичная проводимость листьев, $\text{м}/\text{с}$; g_0 – значение g_s в световом компенсационном пункте, $\text{м}/\text{с}$; Γ_* – углекислотный компенсационный пункт, $\text{мкмоль}/\text{м}^3$; D_s – дефицит упругости водяного пара, гПа ; D_0 – эмпирический коэффициент, гПа . Начальные и граничные условия, используемые в модели, подробно описаны в [16, 17].

При найденном распределении концентрации вертикальный поток CO_2 оценивается по формуле [18]:

$$q_w(x, y, z) = -K_C \frac{\partial C}{\partial z} + \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \operatorname{sgn}(w) w \frac{\partial C}{\partial z} dz,$$

где Δz принято равным 1 м.

Входными параметрами модели являются данные о пространственном распределении листового индекса LAI, значения метеорологических параметров (высота пограничного слоя атмосферы, динамическая скорость, преобладающее направление ветра, температура воздуха, дефицит упругости водяного пара, значение приходящей фотосинтетически-активной радиации), данные о рельефе местности, высоте растительности и о почвенном дыхании. В нашем исследовании эта информация была получена с помощью лидарной съемки растительности и рельефа с беспилотных летательных аппаратов, измерений потоков CO_2 у поверхности почвы камерным методом, спутниковых данных, а также данных реанализа ERA5 [19]. Расчет LAI проводился с помощью уравнения регрессии $\text{LAI} = 0,57 \exp(2,33 \text{ NDVI})$ с использованием спутниковых данных с Landsat 8-9 (<https://earthexplorer.usgs.gov/>) для индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Нами было использовано предположение, что $\text{PLAI} = 1,3 \text{ LAI}$. Распределение SAD бралось равномерным по высоте растительности, распределение LAD считалось равномерным в пределах крон деревьев. Необходимые метеорологические параметры брались из измерений на метеорологической мачте, расположенной в центральной части исследуемого участка, а также из данных реанализа. Для модельных экспериментов использовались метеорологические данные 24 июля 2023 г. за 11:00.

Результаты исследований и их обсуждение. Для анализа пространственного распределения скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена на исследуемом участке были получены значения компонент скорости ветра и коэффициента турбулентного обмена в узлах регулярной сетки с шагом 19 м по горизонтали. Разрешающая способность модели в проведенных экспериментах составляет порядка 200 м. Для анализа полей использовались карты распределения скорости и направления ветра, и коэффициента турбулентного обмена на высотах 6, 18 и 30 м над поверхностью (рис. 2–4).

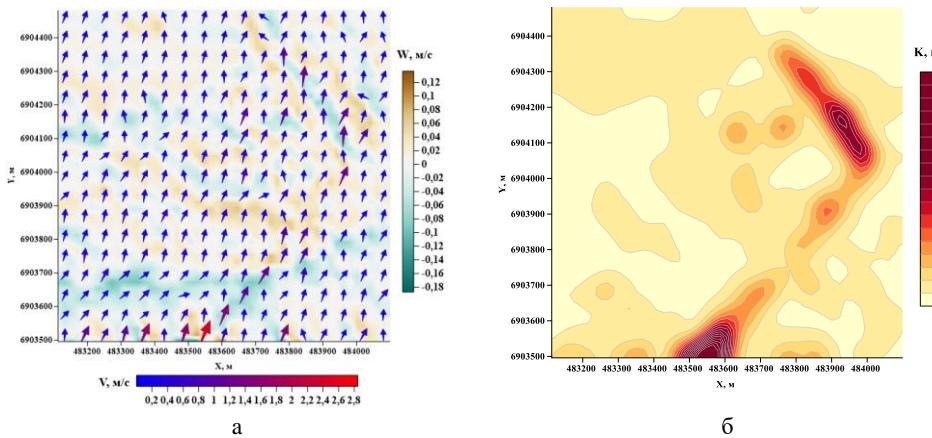


Рис. 2. Распределение поля скорости ветра (а) и коэффициента турбулентного обмена (б) на высоте 6 м над поверхностью 24.07.2023 в 11:00. На рис. 2–4 (а) цветом показана скорость вертикального движения (W), стрелками – скорость и направление ветра. Система координат – универсальная поперечная проекция Меркатора (UTM).

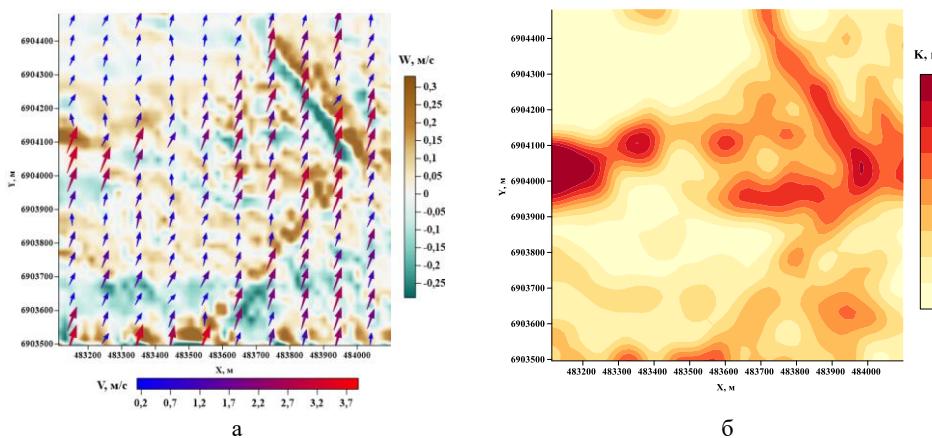


Рис. 3. Распределение поля скорости ветра (а) и коэффициента турбулентного обмена (б) на высоте 18 м над поверхностью 24.07.2023 в 11:00.

Расчеты поля ветра и коэффициента турбулентности внутри растительного покрова на высоте 6 м над земной поверхностью (рис. 2) показывают значительную пространственную изменчивость поля ветра по скорости и направлению воздушного потока. Данные эффекты в основном связаны с неоднородной структурой растительности и сложным рельефом исследуемого участка, приводящими к локальным возмущениям воздушного потока. Для участков с более плотной растительностью характерны более низкие значения горизонтальной составляющей скорости ветра, снижающиеся до 0,1 м/с. На участках с низкой растительностью скорость ветра увеличивается до 2,8 м/с. В среднем на всем модельном участке скорость ветра на 6 м над поверхностью составляет порядка 0,3 м/с. На участках с большим перепадом высот, а также на границе лесных массивов отмечается возникновение реверсных воздушных потоков. Коэффициент турбулентного обмена не превышает 0,42 м²/с и в

среднем для всего модельного участка составляет $0,033 \text{ м}^2/\text{с}$. Наибольшие значения коэффициента турбулентного обмена наблюдаются на открытых участках с травянистой растительностью при высоких скоростях ветра.

На высоте 18 м над поверхностью горизонтальное распределение скорости ветра становится более однородным и приближающимся к направлению движения ведущего воздушного потока (рис. 3). Резкое снижение скорости ветра отмечается вблизи оврага, а также на участках с высокой и плотной древесной растительностью. В среднем скорость ветра по сравнению с таковой на 6 м увеличилась в 4,1 раза и составляет $1,23 \text{ м/с}$. Среднее значение коэффициента турбулентного обмена по сравнению со значением на 6 метрах увеличилось в 10 раз и составляет $0,35 \text{ м}^2/\text{с}$. Максимальные значения коэффициента турбулентности приурочены к участкам модельной области с низкой растительностью из-за низкого сопротивления воздушному потоку.

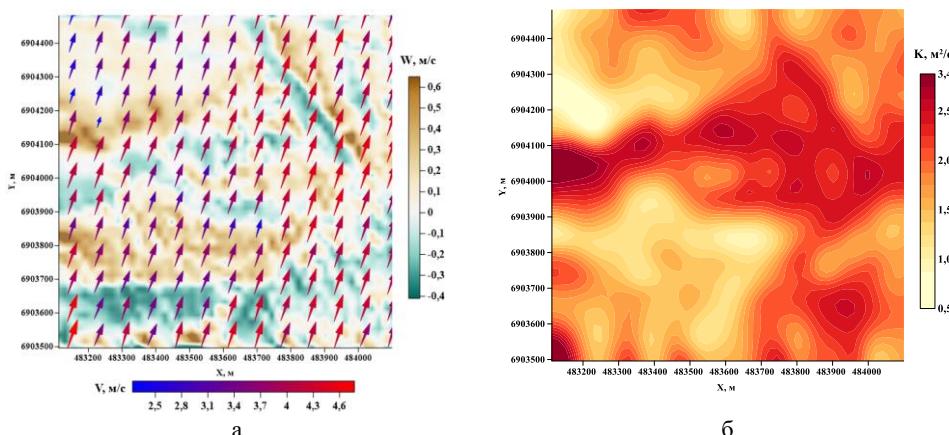


Рис. 4. Распределение поля скорости ветра (а) и коэффициента турбулентного обмена (б) на высоте 30 м над поверхностью 24.07.2023 в 11:00.

На высоте 30 м над земной поверхностью (уровень выше крон деревьев) поле скорости ветра становится достаточно однородным по направлению ведущего потока (рис. 4). Значения скорости ветра увеличиваются в среднем в 2,9 раза по сравнению с высотой 18 м. Минимальные скорости ветра наблюдаются в юго-западной части модельной области вблизи глубокого оврага за счет интенсивных восходящих и нисходящих движений. Среднее значение коэффициента турбулентного обмена увеличилось в 5,4 раза и составило $1,89 \text{ м}^2/\text{с}$. Минимальные значения коэффициента турбулентности также приурочены к участкам местности вблизи овражной системы. Сравнение смоделированной и измеренной скорости ветра показывает, что они почти одинаковы: измеренное значение скорости ветра на 30 м по данным метеорологической станции составляет $2,5 \text{ м/с}$, а по модельным данным – $2,9 \text{ м/с}$.

С помощью рассчитанных полей коэффициента турбулентного обмена и скорости ветра были найдены распределения вертикальных потоков CO_2 на разных высотах. На рис. 5–7 представлены распределения вертикальных потоков на высотах 6, 18 и 30 м над поверхностью.

Значение потока CO_2 на высоте 6 м над поверхностью варьируется от $-2,5 \text{ мкмоль}/\text{м}^2\text{с}$ до $+9,5 \text{ мкмоль}/\text{м}^2\text{с}$ (отрицательные значения потока CO_2 соответствуют поглощению, а положительные – эмиссии CO_2). Анализ пространственного распределения потоков показывает, что на большей части модельного участка преобладает вертикальный положительный поток CO_2 . Это связано с вкладом эмиссии CO_2 с поверхности почвы под пологом древесной растительности. Для участков с низкой растительностью на высоте 6 м над поверхностью в основном наблюдаются отрицательные потоки, соответствующие поглощению CO_2 травянистой и кустарниковой растительностью в процессе фотосинтеза. Исключение составляют участки над просекой, для которых наблюдается большой положительный поток вплоть до значений $9,5 \text{ мкмоль}/\text{м}^2\text{с}$, превосходящий более чем вдвое величину почвенного дыхания. По всей видимости, это вызвано эффектами адвекции, за счет которой на открытые участки происходит вынос воздуха из кронового пространства близрасположенного леса, с более низким содержанием CO_2 , чем в слое воздуха вблизи поверхности на открытых участках. В результате этого формально выражение для вертикального потока q_w оказывается положительным.

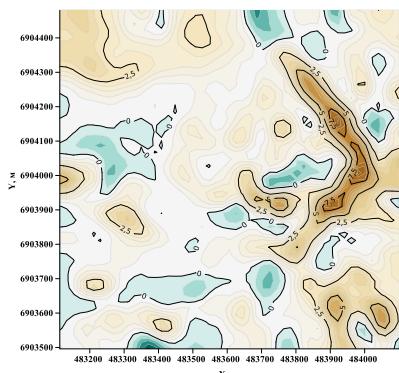


Рис. 5. Распределение вертикального потока CO_2 на высоте 6 м над поверхностью.

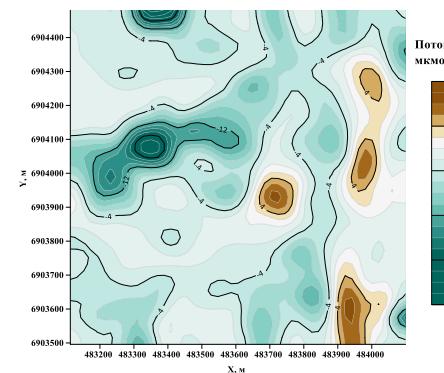


Рис. 6. Распределение вертикального потока CO_2 на высоте 18 м над поверхностью.

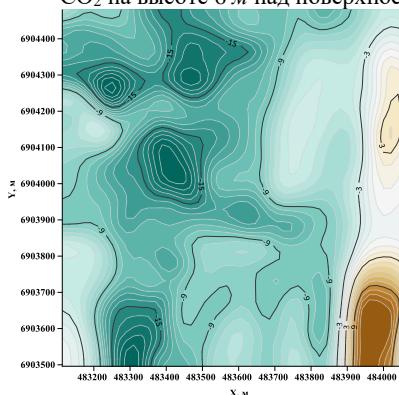


Рис. 7. Распределение вертикального потока CO_2 на высоте 30 м над поверхностью.

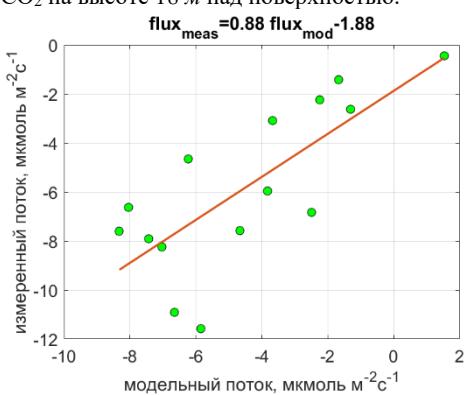


Рис. 8. Диаграмма рассеяния измеренных и смоделированных значений вертикального потока CO_2 на высоте 30 м над поверхностью в центре экспериментального участка за период с 5:00 до 12:00 24.07.2023.

На высоте 18 м над поверхностью поток CO₂ становится отрицательным для большей части экспериментального участка по причине поглощения CO₂ кронами деревьев в процессе фотосинтеза. Максимальное по абсолютной величине значение потока достигает 28 мкмоль/м²с и соответствует стоку CO₂ из атмосферы в растительности. Среднее значение потока составляет около –4 мкмоль/м²с. Положительные значения потока, связанные с эффектами адвекции за счет неоднородности растительности и рельефа, снова наблюдаются вблизи просеки, а также в юго-восточной части экспериментального участка.

На высоте 30 м распределение вертикального потока становится наиболее однородным при высоком коэффициенте турбулентного обмена. Исключение составляет восточная и особенно юго-восточная часть экспериментального участка. Максимальные положительные значения вертикального потока достигают 12 мкмоль/м²с, что скорее всего связано с горизонтальной адвекцией. В юго-восточной части участка имеет место локальное повышение рельефа и преобладание лесной древесной растительности. Для выбранного временного интервала (11:00) наблюдается преобладающее южное–юго-западное направление ветра. В результате воздух с меньшим содержанием CO₂ из области в пределах крон и над кронами деревьев на возвышении в юго-восточной части участка переносится севернее, оказывается дальше от поверхности земли и приводит к формированию профилей CO₂ с уменьшением его концентрации с высотой, и как следствие положительному вертикальному потоку. Во всех остальных частях экспериментального участка наблюдается отрицательный вертикальный поток, что соответствует поглощению CO₂ из атмосферы кронами деревьев. Среднее значение потока CO₂ для всего участка составляет –7,9 мкмоль/м²с.

Помимо расчета полей вертикальных потоков CO₂, также было проведено сравнение потоков, измеренных методом турбулентных пульсаций на высоте 30 м над поверхностью в центральной точке участка, с модельными локальными потоками. Сравнение проводилось для периодов времени с 5:00 до 12:00 с шагом в 30 мин 24.07.2023. Результаты сравнения приведены на рис. 8. Коэффициент детерминации R^2 при этом составил 0,4 при $p = 0,0015$. Максимальное расхождение модельных и экспериментальных значений потока имело место в 9:30 и 10:00. При исключении этих двух точек из статистики коэффициент детерминации несколько увеличивается, составив $R^2 = 0,5$ при $p = 0,0006$.

Проведенное исследование демонстрирует, что пространственная неоднородность подстилающей поверхности, включая рельеф и структуру растительности, оказывает существенное влияние на формирование полей ветра и вертикальных потоков CO₂. Полученные результаты подчеркивают важность учета локальных особенностей территории при моделировании газообмена в приземном слое атмосферы, особенно в условиях сложных ландшафтов, таких как таежные леса. Выявленные различия между локальными измерениями и интегральными оценками потоков CO₂ указывают на необходимость дальнейшего совершенствования методов масштабирования данных, включая разработку более точных параметризаций для учета адвективных процессов и неоднородности растительного покрова. Результаты

также подтверждают перспективность использования трехмерных гидродинамических моделей в сочетании с высокодетализированными входными данными для повышения точности прогнозирования углеродного баланса в лесных экосистемах. Дальнейшие исследования могут быть направлены на анализ сезонной динамики потоков и влияние различных метеорологических условий на пространственное распределение газообмена.

Заключение. Проведенные численные эксперименты по расчету поля скорости ветра, коэффициентов турбулентного обмена и вертикальных потоков CO₂ на экспериментальном участке “Ляльский” в Республике Коми показали значительную пространственную изменчивость поля ветра и потоков CO₂ внутри и над растительным покровом.

Результаты модельных экспериментов продемонстрировали хорошую согласованность смоделированных потоков с данными измерений на станции долговременного мониторинга потоков парниковых газов в центральной части исследуемого участка. Оценки интегральных потоков CO₂, проведенные для всего смоделированного участка, показали существенные отличия интегральных потоков от измерений потоков на станции мониторинга. Показано, что локальные потоки вблизи станции мониторинга могут значительно изменяться при разных направлениях ветра. Это обусловлено существенной пространственной неоднородностью подстилающей поверхности вокруг станции мониторинга, оказывающей существенное влияние на поле ветра и вертикальные потоки CO₂. Несмотря на выявленные различия, результаты расчетов демонстрируют принципиальную возможность масштабирования потоков и перехода от локальных измерительных данных к оценке интегральных потоков для большей территории за счет калибровки модели по экспериментальным данным и расчета пространственных распределений потоков с учетом структуры растительности и рельефа.

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках научного проекта № 075-15-2024-554 от 24.04.2024.

Поступила 04.04.2025

Получена с рецензии 16.06.2025

Утверждена 15.08.2025

ЛИТЕРАТУРА

1. Climate Change 2023: Synthesis Report. *Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds. H. Lee, J. Romero). IPCC, Geneva, Switzerland (2023), 35–115.
<https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647>
2. Bonan G.B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. *Science* **320** (2008), 1444–1449.
<https://doi.org/10.1126/science.1155121>
3. Бурба Г.Г., Курбатова Ю.А. и др. Метод турбулентных пульсаций. Краткое практическое руководство. *LI-COR Biosciences, IPEE, Russian National Academy of Sciences* (2016), 223.
<https://doi.org/10.13140/RG.2.1.5109.5449>

4. Garrat J. *The Atmospheric Boundary Layer*. Cambridge University Press, Cambridge, UK (1992).
5. Wyngaard J.C. *Turbulence in the Atmosphere*. Cambridge, Cambridge University Press (2010). <https://doi.org/10.1017/CBO9780511840524>
6. Aubinet M., Vesala T., Papale D. *Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis*. Dordrecht, Springer (2012), 438–439. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2351-1>
7. Sogachev A., Panferov O. Modification of Two-Equation Models to Account for Plant Drag. *Boundary Layer Meteorol.* **121** (2006), 229–266. <https://doi.org/10.1007/s1054600690735>
8. Кислов А.В., Суркова Г.П. *Климатология* (3-е изд.). Москва, ИНФРА-М (2016), 324.
9. Ольчев А.В., Мухартова Ю.В. и др. Влияние пространственной неоднородности растительного покрова и рельефа на вертикальные потоки CO₂ в приземном слое атмосферы. *Известия РАН. Физика атмосферы и океана* **53** (2017), 612–623. <https://doi.org/10.7868/S0003351517050087>
10. Pielke R. *Mesoscale Meteorological Modelling* (second ed.). San Diego, California, Academic Press (2002), 676.
11. Allen T., Zerroukat M. A Simple Immersed Boundary Forcing for Flows over Steep and Complex Orography. *Q. J. R. Meteorol Soc.* **146** (2020), 3488–3502. <https://doi.org/10.1002/qj.3857>
12. Ольчев А.В., Мухартова Ю.В. и др. 3D гидродинамическое моделирование потоков CO₂ и CH₄ в приземном слое атмосферы (на примере лесного участка “Рошни-Чу”). *Устойчивое развитие горных территорий* **15** (2023), 408–418. <https://doi.org/10.21177/1998-4502-2023-15-2-408-418>
13. Wilcox D.C. Turbulence Modeling for CFD. USA, CA, La Cañada, DCW Industries Inc. (1998).
14. Ball J.T., Woodrow I.E., Berry J.A. *A Model Predicting Stomatal Conductance and its Contribution to the Control of Photosynthesis under Different Environmental Conditions. Progress in Photosynthesis Research*. Springer, Dordrecht, Netherlands (1987), 221–224.
15. Leuning R. A Critical Appraisal of a Combined Stomatal-Photosynthesis Model for C₃ Plants. *Plant Cell Environ.* **18** (1995), 339–355. <https://doi.org/10.1111/j.1365-3040.1995.tb00370.x>
16. Мухартова Ю.В., Мангуря П.А. и др. Выбор граничных условий при моделировании процессов турбулентного переноса в приземном слое атмосферы. *Компьютерные исследования и моделирование* **10** (2018), 27–46. <https://doi.org/10.20537/2076-7633-2018-10-1-27-46>
17. Mukhartova I., Kurbatova J., et al. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. *Atmosphere* **14** (2023), 625. <https://doi.org/10.3390/atmos14040625>
18. Гулов С.К., Ольчев А.В. Карбоновые полигоны: мониторинг, геоинформационные системы, секвестрационные технологии. Москва, Научный мир (2025), 420.
19. Загирова С.В., Михайлов О.А., Елсаков В.В. Обмен диоксида углерода и влаги между ельником и атмосферой в весенне-летний период при разных погодных условиях. *Сибирский экологический журнал* **1** (2019), 55–70. <https://doi.org/10.15372/SEJ20190105>

Ա. Ա. ՆԱՐԻՄԱՆԻՔԵ, ՅՈՒ. Վ. ՄՈՒԽԱՐՏՈՎԱ, Ս. Վ. ԶԱԳԻՐՈՎԱ, Ա. Վ. ՕԼՉԵՎ

ՄՈԴԵԼՎՅԻՆ ՓՈՐՁԵՐԻ ԱՐԴՅՈՒԹՅՈՒՆԵՐԻ ՀԻՄԱՆ ՎՐԱ
ԶԵՐՄՈՑՎՅԻՆ ԳԱԶԵՐԻ ՀՈՍՔԵՐԻ ՏԱՐԱԾՎԿԱՆ
ՓՈՓՈԽՎԿԱՆՈՒԹՅԱՆ ԳՆԱՀԱՏՈՒՄԸ ՏԱՐԱՍԵՌ ՄԱԿԵՐԵՍԻ ՎՐԱ

Ամփոփում

Կատարված մոդելային փորձերի հիման վրա ստացվել են քամու դաշտի և ածխաթթու գազի (CO₂) հոսքերի տարածական փոփոխականության

գնահատականներ տարրեր բարձրություններում Կոմի Հանրապետության Լյալսկի արգելոցի ($62^{\circ}16'28''$ հյուսիսային լայնություն, $50^{\circ}39'54''$ արևելյան լայնություն) խիստ տարածեռ անտառային տարածքում: Հաշվարկները կատարվել են ջերմոցային զագերի փոխադրման RANS եռաչափ հիդրոդինամիկ մոդելի միջոցով: Մոդելի մուտքային պարամետրերն են անօդաչու թռչող սարքերից բուսականության և ռելիեֆի լիդարային հետազոտություններից ստացված տվյալները, հողի մակերեսային CO_2 հոսքերի չափումները և ERA5 վերավերլուծության տվյալները: Մոդելային փորձերի արդյունքները ցույց տվեցին քամու դաշտի և CO_2 հոսքերի զգայի տարածական փոփոխականություն անտառի ներսում և վերևում, որը պայմանավորված էր ռելիեֆի անհարթությամբ և բուսականության խճանկարային կառուցվածքով:

A. A. NARIMANIDZE, Iu. V. MUKHARTOVA, S. V. ZAGIROVA, A.V. OLCHEV

ESTIMATION OF SPATIAL VARIABILITY OF GREENHOUSE GAS FLUXES OVER HETEROGENEOUS SURFACE BASED ON THE RESULTS OF MODEL EXPERIMENTS

Summary

Model experiments were conducted to estimate the spatial variability of the wind field and carbon dioxide fluxes at different levels over a highly heterogeneous forest area in the Lyalsky Nature Reserve in the Republic of Komi, Russia ($62^{\circ}16'28''$ N, $50^{\circ}39'54''$ E). Calculations were performed using a three-dimensional, Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) hydrodynamic model of greenhouse gas transport. Lidar measurements of vegetation and topography from unmanned aerial vehicles, chamber measurements of CO_2 fluxes near the soil surface, and ERA5 reanalysis data were used as input parameters for the model. The model experiment results showed significant spatial variability of the wind field and CO_2 fluxes within and above the forest canopy. This variability is determined by surface topography roughness and vegetation mosaic structure. Comparing the simulated fluxes with the fluxes measured using the eddy covariance method at a long-term monitoring station revealed good agreement between the model calculations and the measurement results in the area adjacent to the station. However, significant spatial variability of vertical fluxes within the model area makes extrapolating point flux measurements to the entire study area problematic.