

УДК 551.510.42

DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Оригинальная статья

Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью

Ю.В. Мухартова^{1,2}, Р.Р. Гибадуллин^{1,2}, А.В. Ольчев^{1,2}, И.А. Керимов^{2,3}

¹ МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, ГСП-1;

² ГГНТУ им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х. Исаева, 100;

³ ИФЗ им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10 стр. 1, muhartova@yandex.ru

Статья поступила: 26.09.2023, доработана: 05.12.2023, принята к публикации: 07.12.2023

Резюме: Актуальность работы. Основные используемые на данный момент методы измерения потоков парниковых газов в полевых условиях, такие как метод экспозиционных камер и метод турбулентных пульсаций, имеют ряд методических ограничений. Это затрудняет их широкое использование на местности с неоднородной подстилающей поверхностью, особенно в горных регионах. Поэтому весьма актуальной является задача разработки новой рабочей методики для оценки потоков парниковых газов, применимой над поверхностями со сложным рельефом и неоднородной растительностью, основанной на методах дистанционного зондирования и математическом моделировании. **Цель работы** заключается в формулировке методики оценки потоков парниковых газов на основе данных измерений концентрации парниковых газов на двух уровнях над поверхностью и применения трехмерной гидродинамической модели турбулентного переноса парниковых газов. Также цель работы включает исследование репрезентативности предложенной методики. **Методы исследования.** С помощью разработанной ранее гидродинамической модели, модифицированной для учета влияния рельефа, оценивается коэффициент турбулентного обмена для парниковых газов и поле скорости ветра. При наличии измеренных полей концентрации парникового газа на двух уровнях над поверхностью (например, с помощью БПЛА) и модельных данных для коэффициента турбулентности и скорости ветра поток парникового газа оценивается по предложенной в работе приближенной формуле, включающей в себя аппроксимацию вертикального турбулентного и адвективного потоков. Приближенная формула может также использоваться как начальное приближение при решении обратной задачи оценки потока парникового газа, также сформулированной в работе. **Результаты работы.** На основе ряда численных экспериментов, проведенных для лесного участка карбонового полигона в Рошни-Чу (Чеченская республика) и предложенной в работе аналитической оценки получено распределение потоков CO₂ над кронами деревьев, проведено их сравнение с теоретически ожидаемым распределением, а также найдены оптимальные уровни над поверхностью для проведения измерений концентрации парниковых газов.

Ключевые слова: парниковые газы, обратная задача, неоднородная поверхность, карбоновый полигон, дистанционное зондирование, трехмерная гидродинамическая модель.

Благодарности: Исследования на карбоновом полигоне в Чеченской республике и численные эксперименты выполнены в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М. Д. Миллионщикова.

ва, FZNU-2021-0012. Разработка математической модели выполнена при поддержке Программы развития МГУ, проект № 23-Ш07-55.

Для цитирования: Мухартова Ю.В., Гибадуллин Р.Р., Ольчев А.В., Керимов И.А. Модельный подход для восстановления приземных вертикальных потоков парниковых газов над неоднородной подстилающей поверхностью. *Геология и геофизика Юга России*. 2023. 13(4): 149-161 DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

GEOECOLOGY

DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Original paper

Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas

I.V. Mukhartova ^{1,2}, R.R. Gibadullin ^{1,2}, A.V. Olchev ^{1,2}, I.A. Kerimov ^{2,3}

¹ Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1 Leninskie Gory,
Moscow 119991, Russian Federation;

² Grozny State Oil Technical University named after Academician M.D. Millionshchikov, 100
Ave. H.A. Isaeva, Grozny 364051, Russian Federation;

³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10, build.1, B.
Gruzinskaya Str., Moscow 123242, Russian Federation, mukhartova@yandex.ru

Received: 26.09.2023, revised: 05.12.2023, accepted: 07.12.2023

Abstract: Relevance of the work. The main methods currently used to measure greenhouse gas fluxes in the field, such as the chamber method and the eddy covariance method, have a number of methodological limitations. This makes it difficult to apply these methods widely in terrain with inhomogeneous underlying surface, especially in mountainous regions. Therefore, the task of developing a new working methodology for estimating greenhouse gas fluxes applicable over surfaces with complex topography and inhomogeneous vegetation based on remote sensing methods and mathematical modeling is very urgent. **The aim of the paper** is to formulate a methodology for retrieving greenhouse gas fluxes based on the data of greenhouse gas concentration measurements at two levels above the surface and the application of a three-dimensional hydrodynamic model of turbulent greenhouse gas transport. Aim of the paper also includes the study of the representativeness of the proposed methodology. **Research Methods.** Using a previously developed hydrodynamic model modified to account for the effect of topography, the turbulent exchange coefficient for greenhouse gases (GHG) and the wind speed field are estimated. With measured GHG concentration fields at two levels above the surface (e.g., using a UAV) and model data for the turbulence coefficient and wind speed, the GHG flux is estimated using the rough formula proposed in the paper, which includes an approximation of the vertical turbulent and advective fluxes. The proposed formula can also be used as a first approximation for solving inverse problem of GHG flux retrieval, which is also given in the paper. **Results.** Based on a series of numerical experiments that were carried out for the forest area of the Carbon Experimental Site in Roshni-Chu (Chechen Republic) and the analytical evaluation proposed in the paper, the distribution of CO₂ fluxes over the tree canopy was obtained. They compared with the theoretically expected distribution, and the optimal levels above the surface for measuring greenhouse gas concentrations were found.

Keywords: greenhouse gases, inverse problem, heterogeneous surface, carbon polygon, remote sensing, 3D hydrodynamic model.

Acknowledgements: Field measurements at the Roshni-Chu forest site in the Chechen Republic and modeling experiments were supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2021-0012). The development of the model was supported by the MSU Development Program, Project No. 23-SCH07-55.

For citation: Mukhartova I.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 2023. 13(4): 149-161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012

Введение

В настоящее время в связи с растущей антропогенной нагрузкой на атмосферу задача исследования и оценки потоков парниковых газов (ПГ) между подстилающей поверхностью и атмосферой является весьма актуальной [Pörtner et al., 2022; Dong et al., 2021; Yue et al., 2018]. Внимание также уделяется исследованию уровня загрязнения атмосферного воздуха в городских условиях [Заалишвили и др., 2023]. Основными современными методами для измерения потоков парниковых газов в полевых условиях являются метод экспозиционных камер и метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet, et al., 2012; Pumpanen et al., 2004]. Однако в силу имеющихся методических ограничений широкое использование этих методов сильно затруднено. Для корректного использования метода турбулентных пульсаций необходима горизонтальная однородность подстилающей поверхности и пренебрежимо малые дивергенция и конвергенция воздушного потока [Foken, 2008]. Метод экспозиционных камер может использоваться для измерения потоков у поверхности почвы с невысокой растительностью, в том числе на местности с сильно расчлененным рельефом, однако для получения пространственного распределения потоков на исследуемом участке требуется проведение большого числа одновременных измерений в различных точках исследуемого участка [Molchanov et al., 2017]. Особую сложность представляет измерение потоков данными методами в горных регионах как в связи со значительной неоднородностью поверхности, так и зачастую из-за их труднодоступности. В связи с этим исследованиям потоков парниковых газов в горных регионах, в частности, на Кавказе, до недавнего времени уделялось мало внимания. Таким образом, весьма актуальной является задача разработки новой рабочей методики для оценки потоков парниковых газов, применимой над поверхностями со сложным рельефом и неоднородной растительностью. Значительную роль при этом могут играть методы дистанционного зондирования [Pirk et al., 2022; Basu et al., 2013; Yang et al., 2017; Sharma et al., 2022; Reuter et al., 2021; Kunz et al., 2020] и математическое моделирование.

Предложенная в данной работе методика оценки потоков ПГ основана на использовании измеренных полей концентрации ПГ на двух уровнях над поверхностью (например, с помощью БПЛА), и трехмерной гидродинамической модели, позволяющей вычислять установившееся распределение поля скорости ветра, коэффициента турбулентности и концентрации ПГ. В работе предложено приближенное выражение для определения потоков, проведено исследование вычисляемого с его помощью потока в зависимости от высоты измерительных уровней над поверхностью и погрешности измерения концентраций. Сформулирована и проанализирована постановка обратной задачи оценки вертикальных потоков, для которой указанное приближенное выражение может использоваться как начальное приближение.

1. Гидродинамическая модель

Для вычисления распределения скорости ветра в атмосферном пограничном слое с учетом структуры рельефа и растительного покрова была использована трехмерная гидродинамическая модель, основанная на усредненном уравнении Навье-

Стокса, разложении Рейнольдса и применении гипотезы Буссинеска. Первоначальная конфигурация модели [Mukhartova et al., 2023] была модифицирована с учетом рельефа.

Предположим, что Π – участок местности прямоугольной формы $\{(x, y) \in \Pi : x \in (0, L_x), y \in (0, L_y)\}$, в пределах которого рельеф описывается функцией $h(x, y)$. Выберем систему координат так, чтобы минимальное значение $h(x, y)$ соответствовало $z = 0$, и рассмотрим задачу в прямоугольном параллелепипеде $\{(x, y) \in \Pi, z \in (0, H)\}$, где верхняя граница области H соответствует высоте атмосферного пограничного слоя. Скорость воздушного потока $\vec{V} = \{u, v, w\}$ представим в виде суммы $\vec{V} = \bar{\vec{V}} + \vec{V}'$, где $\bar{\vec{V}}$ – средняя скорость, $\vec{V}'$ – отклонения скорости потока от среднего. В предположении о несжимаемости воздуха ($\rho = \text{const}$) для $\bar{\vec{V}}$ получаем систему уравнений:

$$\frac{\partial \bar{\vec{V}}}{\partial t} + (\bar{\vec{V}}, \nabla) \bar{\vec{V}} = -\frac{1}{\rho} \nabla P - (\nabla, \bar{\vec{V}}') \bar{\vec{V}}' + \vec{F}_{cor} + \vec{F}_d + \vec{F}_r + \vec{g}, \quad \text{div } \bar{\vec{V}} = 0,$$

где ρ – средняя плотность воздуха, $P = \bar{P} + \delta P$ – давление, $\bar{P}$ – среднее давление, δP – компонента давления, обусловленная взаимодействием с препятствиями, $\vec{g}$ – ускорение свободного падения, $\vec{F}_{cor} = \{f\bar{v}, -f\bar{u}, 0\}$ – сила Кориолиса, $\vec{F}_d = -c_d PLAD |\bar{\vec{V}}| \bar{\vec{V}}$ – сопротивление растительности, $PLAD$ –

проективная плотность элементов растительности. Рельеф в модели рассмотрен как слабопроницаемое препятствие с большим коэффициентом сопротивления и учитывается с помощью выражения $\vec{F}_r = -TOPO |\bar{\vec{V}}| \bar{\vec{V}}$, где функция $TOPO(x, y, z)$ равна коэффициенту сопротивления G_0 , если $z \in [0, h(x, y)]$, и нулю, если $z > h(x, y)$. Компоненты турбулентного потока момента импульса имеют вид:

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

где E – турбулентная кинетическая энергия (ТКЭ), $K = C_\mu E^2 / \varepsilon$ – коэффициент турбулентности, ε – скорость диссипации ТКЭ, C_μ – функция устойчивости.

При использовании замыкания полуторного порядка функции E и $\omega = \varepsilon / E$ находятся из уравнений типа диффузия-адвекция [Mukhartova et al., 2023; Sogachev, Panferov, 2006; Sogachev et al., 2002]. Граничные условия задачи подробно описаны в работе [Mukhartova et al., 2023]. Начальные условия выбираются согласованными с логарифмическим профилем распределения скорости ветра в приземном слое атмосферы и соответствующими выражениями для E и ω , которые были бы справедливы над однородной подстилающей поверхностью:

$$|\bar{\vec{V}}_0(x, y, z)| = \frac{u_*(x, y)}{\kappa} \ln \frac{z - h(x, y)}{z_0}, \quad E_0(x, y, z) = u_*^2(x, y) \cdot C_\mu^{-1/2}, \quad \omega_0(x, y, z) = \frac{u_*(x, y) \cdot C_\mu^{1/2}}{\kappa(z - h(x, y))},$$

где κ - постоянная фон Кармана, z_0 - параметр шероховатости поверхности (для низкой растительности), $u_*(x, y)$ - динамическая скорость, описываемая как:

$$u_*(x, y) = \kappa V_{\max} \cdot \left(\ln \frac{H - h(x, y)}{z_0} \right)^{-1}.$$

Задача для компонент скорости ветра и коэффициента K решается как задача на установление и позволяет получить распределение $\bar{V}$ и K с учетом структуры подстилающей поверхности.

Прямая задача для вычисления распределения концентрации искомого ПГ над поверхностью заключается в решении уравнения диффузии-реакции-адвекции с соответствующими начальными и граничными условиями:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V}, \nabla)C = \text{div}(K_C \nabla C) + F_b - F_{ph}, & t > 0, (x, y) \in \Pi, z \in (h(x, y), H), \\ C|_{t=0} = C_0, \quad C|_{z=H} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial x} \Big|_{x=0, x=L_x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y} \Big|_{y=0, y=L_y} = 0, \quad -K_C \frac{\partial C}{\partial n} \Big|_{z=h(x, y)} = q_n(x, y), \end{cases} \quad (1)$$

где нижняя граница области описывается функцией $h(x, y)$, $\bar{n}$ – единичная нормаль к границе $z = h(x, y)$, направленная вверх. В уравнении (1) $\bar{V}$ – известное установившееся распределение средней скорости воздушного потока, $K_C = K/Sc$ – коэффициент турбулентной диффузии для рассматриваемого ПГ, Sc – число Шмидта, значение C_0 соответствует средней концентрации ПГ в приземном слое атмосферы, $\vec{q}(x, y)$ – поток соответствующего ПГ у поверхности почвы, $q_n = (\vec{q}, \bar{n})$ – проекция потока на нормаль $\bar{n}$, слагаемое F_b описывает источники ПГ внутри растительного покрова, слагаемое F_{ph} описывает его стоки внутри растительного покрова. Условия Неймана для концентрации на боковых границах области не являются условиями непроницаемой стенки. Скорость ветра на этих границах не равна 0, и условия Неймана для C являются так называемыми условиями сноса [Елизарова 2005]. В данном случае их можно также интерпретировать как предположение о пренебрежимо малом горизонтальном градиенте концентрации вблизи границ в направлении нормали к границе, если границы расположены достаточно далеко от центральной части расчетной области, представляющей наибольший интерес при исследовании. Начально-краевая задача (1) также решается как задача на установление. Когда установившееся пространственное распределение концентрации найдено, турбулентные потоки ПГ могут быть оценены по формуле $\vec{q}^{turb} = \overline{C'V'} = -K_C \nabla C$, а для адвективных потоков можно использовать выражения [Blanken et al., 2009; Feigenwinter et al., 2008; Leuning et al., 2008]:

$$q_u^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{u}) \bar{u} \frac{\partial C}{\partial x} dz, \quad q_v^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{v}) \bar{v} \frac{\partial C}{\partial y} dz, \quad q_w^{adv} = \int_{z-\Delta z/2}^{z+\Delta z/2} \text{sgn}(\bar{w}) \bar{w} \frac{\partial C}{\partial z} dz.$$

Предположим теперь, что из измерений известны распределения концентрации ПГ на двух уровнях над поверхностью: $C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y)$ на уровне $h(x, y) + h_1$ и $C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y)$ на уровне $h(x, y) + h_2$, где $h_2 > h_1 > h_{\text{forest}}$, h_{forest} –

максимальная высота деревьев в древостое. Используя гидродинамическую модель, можно найти $K_C^{(1)}(x, y) = K_C(x, y, h(x, y) + h_1)$ и $K_C^{(2)}(x, y) = K_C(x, y, h(x, y) + h_2)$, а также $w^{(1)}(x, y) = w(x, y, h(x, y) + h_1)$ и $w^{(2)}(x, y) = w(x, y, h(x, y) + h_2)$. Вертикальную составляющую потока можно в первом приближении оценить по формуле

$$\tilde{q}_w = -K_C^{(m)} \frac{C_{\text{exp}}^{(2)} - C_{\text{exp}}^{(1)}}{h_2 - h_1} + \text{sgn}(\bar{w}^{(m)}) \bar{w}^{(m)} \frac{C_{\text{exp}}^{(2)} - C_{\text{exp}}^{(1)}}{h_2 - h_1} \Delta z, \quad (2)$$

$$\text{где } K_C^{(m)} = \frac{K_C^{(1)} + K_C^{(2)}}{2}, \quad \bar{w}^{(m)} = \frac{\bar{w}^{(1)} + \bar{w}^{(2)}}{2}.$$

Формула (2) дает достаточно грубое приближение потока, и в случае, когда его точности для целей задачи недостаточно, оно может быть использовано как начальное приближение для решения обратной задачи по оценке потока. Обратная задача основана на многократном решении упрощенной задачи (3) для распределения концентрации выше некоторого уровня $h(x, y) + h_{\text{flux}}$, $h_{\text{flux}} > h_{\text{forest}}$:

$$\begin{cases} \frac{\partial C}{\partial t} + (\bar{V}, \nabla)C = \text{div}(K_C \nabla C), \quad t > 0, (x, y) \in \Pi, z \in (h(x, y) + h_{\text{flux}}, H), \\ C|_{t=0} = C_0, \quad C|_{z=H} = C_0, \quad \frac{\partial C}{\partial x}\bigg|_{x=0, x=L_x} = 0, \quad \frac{\partial C}{\partial y}\bigg|_{y=0, y=L_y} = 0, \quad (\bar{V}, \bar{n})C - K_C \frac{\partial C}{\partial n}\bigg|_{z=h(x, y)+h_{\text{flux}}} = q_n(x, y) \end{cases} \quad (3)$$

при различных значениях $q_n(x, y) = (\bar{q}, \bar{n})|_{z=h(x, y)+h_{\text{flux}}}$. При этом $q_n(x, y)$ изменяется направленно, так чтобы минимизировать функционал

$$\|C^{\text{exp}} - C^{\text{mod}}\|^2 = \frac{\int_{\Pi} \left\{ \left(C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y) - C(x, y, h(x, y) + h_1) \right)^2 + \left(C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y) - C(x, y, h(x, y) + h_2) \right)^2 \right\} dx dy}{\int_{\Pi} dx dy} \quad (4)$$

2. Численные эксперименты

В качестве объекта изучения для проверки и исследования разработанной модели была выбрана экспериментальная площадка лесного участка карбонового полигона в Рошни-Чу в Чеченской республике, расположенного в предгорных районах Большого Кавказского хребта (43°03'47.0"с.ш., 45°23'13.3"в.д.) [Керимов и др., 2023]. Участок Рошни-Чу представляет собой переходный тип от низкогорных ландшафтов горнолесной зоны к горно-долинному лесо-лугово-кустарниковому подтипу. Площадь исследуемой территории около 243 га. Рельеф участка сильно расчлененный с перепадом высот от 400 до 600 метров. Растительность представлена смешанными буково-грабовыми лесами, с участием дуба кавказского, ильма полевого, ольхи черной и бородавчатой, и клена полевого. Отличительной особенностью растительного покрова является присутствие диких плодовых видов древесной и кустарниковой растительности [Керимов и др., 2021]. Рельеф рассматриваемого участка и его границы на спутниковом снимке представлены на рисунке 1.

В ходе полевых работ летом 2022 года были проведены измерения почвенных потоков CO_2 и дыхания стволов деревьев на рассматриваемой территории. Почвенные потоки измерялись с помощью портативной почвенной камеры, соединенной с мобильным газоанализатором G4301 (Picarro, США).

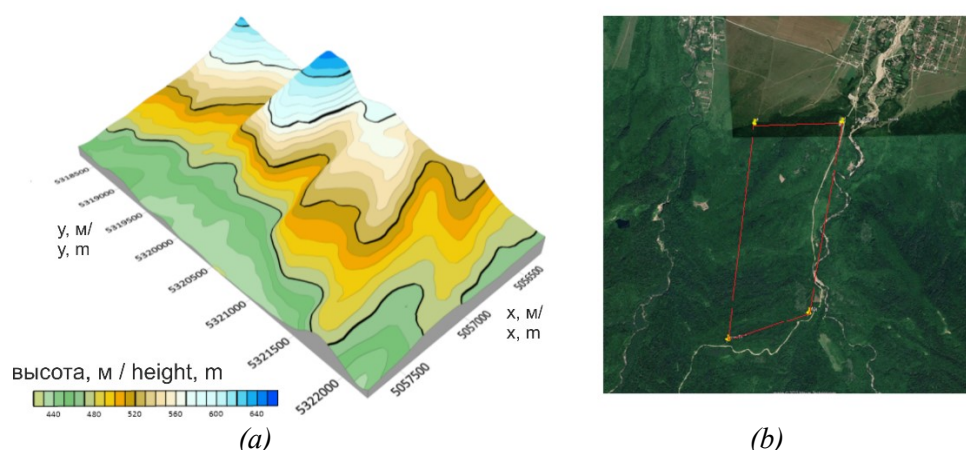


Рис. 1. Рельеф (a) и спутниковый снимок (b) экспериментального участка Рошни-Чу. Красная линия обозначает границы экспериментального участка /

Fig. 1. Topography (a) and satellite image (b) of the Roshni-Chu experimental site. The red line indicates the boundaries of the experimental site

Для оценки $LAI(x,y)$ были использованы данные Landsat 8 по NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). Данные по структуре растительности и рельефа, пространственному распределению источников и стоков CO_2 у поверхности почвы и внутри растительности использовались в качестве входных параметров гидродинамической модели. Для численных экспериментов был выбран ясный солнечный день (погодные условия для 26 августа 2022 года) с преобладающим юго-восточным направлением ветра.

Из-за отсутствия экспериментально измеренных концентраций $C_{exp}^{(1)}(x,y)$ и $C_{exp}^{(2)}(x,y)$ на двух уровнях над поверхностью, для исследования разработанного алгоритма оценки потоков значения $C_{exp}^{(1)}(x,y)$ и $C_{exp}^{(2)}(x,y)$ были смоделированы путем внесения инструментальной погрешности в результаты решения задачи (2). Задача (2) решалась численно на достаточно детальной сетке с шагом 40 м по направлениям x и y (37 узлов сетки по направлению x и 100 по направлению y) и квазиравномерной сетке по высоте. По вертикали было выделено 524 слоя с минимальным шагом 0.5 м и максимальным шагом 19 м вблизи верхней границы области. Вычисленные значения концентрации C на уровнях $h(x,y)+h_1$ и $h(x,y)+h_2$ интерполировались на грубую сетку, содержащую 10 точек по направлению x и 20 точек по направлению y , и к полученным значениям добавлялась погрешность $dC = \delta C \cdot r_n$, если $|r_n| \leq 1$, и $dC = \delta C \cdot \text{sgn}(r_n)$, если $|r_n| > 1$, где δC - максимально возможная погрешность, r_n - случайная величина, имеющая нормальное распределение. В качестве примера на рисунке 2 приведены результаты имитации экспериментальных данных по концентрации CO_2 на уровнях 45 м и 60 м над поверхностью земли.

С помощью смоделированных “экспериментальных” данных по формуле (2) были проведены оценки вертикальных потоков CO_2 (рис. 3).

Из рисунка 3 видно, что грубая оценка потока по формуле (2) дает довольно сильное завышение эмиссии CO_2 в отдельных точках модельной области и слабо воспроизводит пространственную структуру теоретического

распределения потока. Из этого можно сделать вывод, что для корректного использования оценки (2) необходима предварительная обработка измеренных полей концентраций CO_2 . Для этого была проведена фильтрация значений $C_{\text{exp}}^{(1)}(x, y)$ и $C_{\text{exp}}^{(2)}(x, y)$ с помощью фильтра Гаусса. Использование фильтрованных данных $C_{\text{filt}}^{(1)}(x, y)$ и $C_{\text{filt}}^{(2)}(x, y)$ в оценке потока (2) существенно улучшает точность оценки. Значения потока, полученные в узлах грубой сетки, далее интерполировались на исходную подробную сетку с помощью кубической интерполяции (рис. 4).

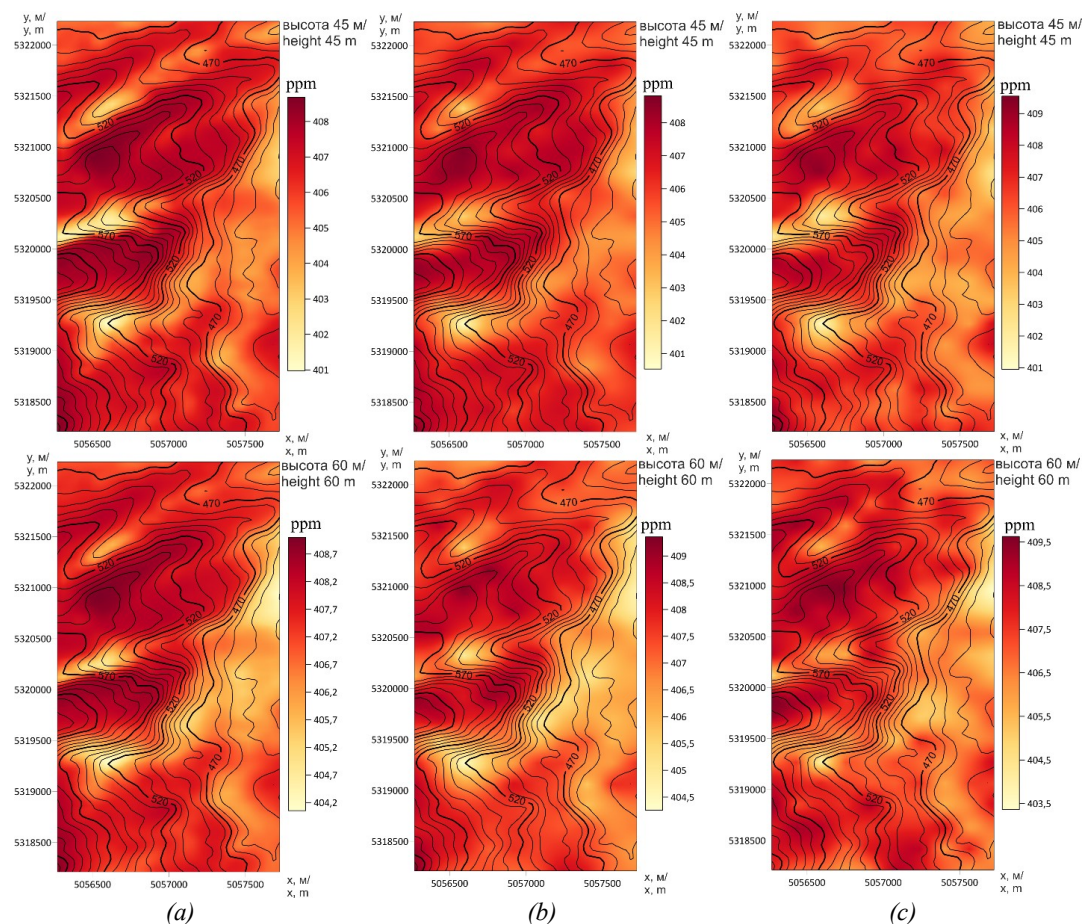


Рис. 2. “Теоретические” распределения концентрации CO_2 на двух уровнях над поверхностью (a), имитация экспериментальных данных с погрешностью $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$ (b) и $\delta C = 1 \text{ ppm}$ (c). Верхний ряд графиков соответствует высоте 45 м над поверхностью, нижний – высоте 60 м /
Fig. 2. “Theoretical” CO_2 concentration distributions at two levels above the surface (a), simulated experimental data with the error $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$ (b) and $\delta C = 1 \text{ ppm}$ (c). The upper row of plots corresponds to 45 m above the surface, while the lower row corresponds to 60 m above the surface

Из рисунка 4 можно видеть, что даже первое приближение потока по формуле (2) отражает как пространственную структуру потока CO_2 в значительной части модельной области, так и порядок скорости поглощения. Значения эмиссии CO_2 на отдельных участках при этом остаются завышенными. Возможно, это объясняется достаточно грубым учетом вертикальной адвекции в выражении (2). При необходимости получить большую точность потока CO_2 найденное распределение может быть использовано как первое приближение в обратной задаче.

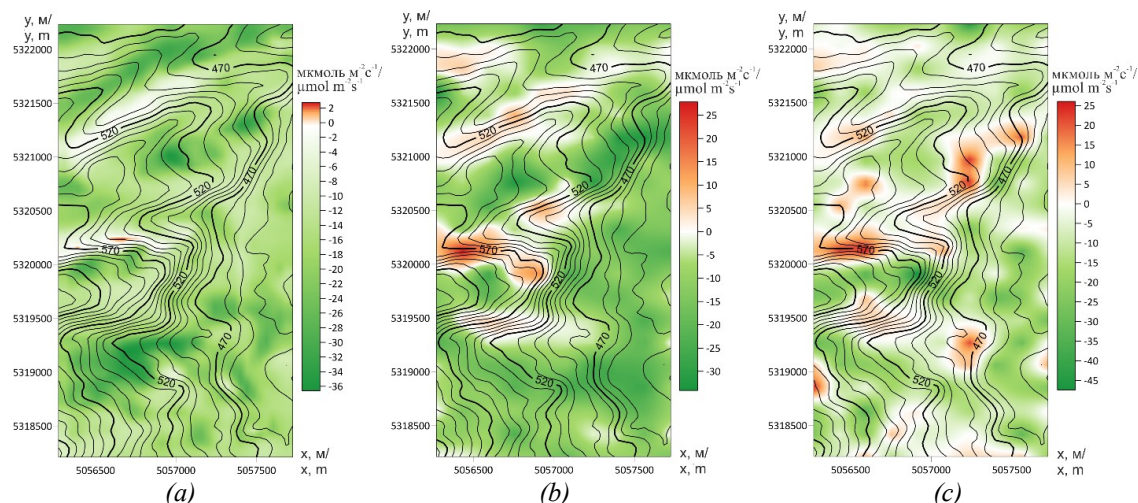


Рис. 3 Теоретический (a) и оцененный по формуле (2) вертикальный поток CO_2 на высоте 30 м над поверхностью: (b) $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$, (c) $\delta C = 1 \text{ ppm}$ /

Fig. 3 Theoretical (a) and estimated by formula (2) vertical CO_2 flux at 30 m above the surface: (b) $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$, (c) $\delta C = 1 \text{ ppm}$.

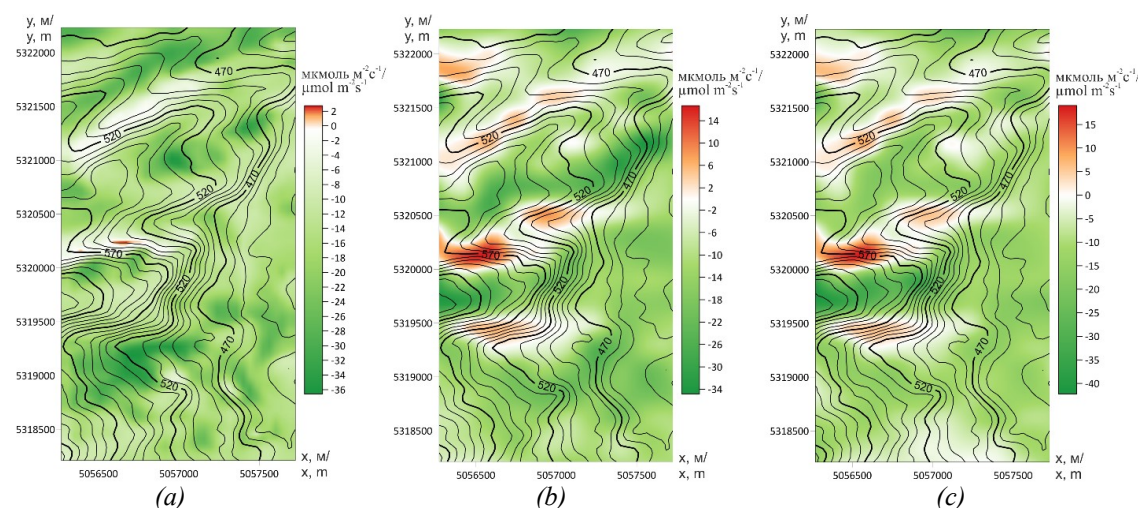


Рис. 4. Теоретический (a) и интерполированный на подробную сетку поток CO_2 , оцененный по формуле (2) с помощью фильтрованных данных: (b) $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$, (c) $\delta C = 1 \text{ ppm}$ /

Fig. 4. Theoretical (a) and grid-interpolated CO_2 flux estimated from filtered data (formula 2): (b) $\delta C = 0.5 \text{ ppm}$, (c) $\delta C = 1 \text{ ppm}$.

Следующим шагом исследования было решение задачи (3) при теоретическом значении потока $q_n(x, y)$ в качестве входных данных. Так как на основе задачи (3) будет построена обратная задача, необходимо провести предварительную оценку выражения (4) для различных высот h_1 и h_2 над поверхностью в тестовом случае. Результаты численных экспериментов в случае $\delta C = 1 \text{ ppm}$ приведены в таблице 1.

Приведенные в таблице 1 данные показывают, что выбирать уровень h_1 над поверхностью выше 45 м для рассматриваемой территории нецелесообразно, так как при этом норма разности модельных и измеренных значений концентрации CO_2 начинает расти. Выбирать его слишком низко над кронами деревьев также не следует,

так как в этой области сильна неоднородность концентрации CO_2 , обусловленная неоднородностью растительности. При выбранном уровне h_1 высота уровня h_2 в пределах приземного слоя не сильно влияет на норму разности модельных и экспериментальных данных. Для рассматриваемой модельной области и используемой при численном решении сетки наиболее удачным оказывается выбор высот $h_1=45$ м и $h_2=60$ м.

Таблица 1 / Table 1

Норма разности (4) модельных и “экспериментальных” значений концентрации CO_2 (ppm) / Norm of difference (4) between model and “experimental” CO_2 concentration values (ppm)

$h_1, \text{ м}$ \ $h_2, \text{ м}$	35	40	45	50	55	60
40	2.0257	-	-	-	-	-
45	1.9191	1.6718	-	-	-	-
50	1.9311	1.6972	1.6082	-	-	-
55	1.9227	1.7793	1.6112	1.6088	-	-
60	1.9129	1.6740	1.5936	1.6452	1.6316	-
65	1.9133	1.6959	1.5984	1.6458	1.6671	1.6738

Заключение

Предложен подход к оценке потоков парниковых газов над поверхностью со сложным рельефом и неоднородной растительностью, основанный на использовании измерений концентрации парниковых газов на двух уровнях над поверхностью и трехмерной гидродинамической модели. На основе данных полевых измерений на участке карбонового полигона Рошни-Чу с помощью гидродинамической модели проведены расчеты потоков CO_2 на высоте 30 м над поверхностью. Полученное пространственное распределение вертикального потока рассматривалось как “теоретическое” при исследовании предложенного метода. Показано, что даже грубая оценка потока воспроизводит порядки величин поглощения (хотя и переоценивает эмиссию) и структурные особенности неоднородности потока. Полученная приближенная оценка потока может выступать в качестве начального приближения при решении сформулированной обратной задачи по оценке потоков парниковых газов. Найдены оптимальные высоты для проведения измерений на исследуемой территории.

Литература

1. Елизарова Т.Г. Лекции: Математические модели и численные методы в динамике жидкости и газа. Подходы, основанные на системах квазигазодинамических и квазигидродинамических уравнений. – М.: Физический факультет МГУ. – 2005. – 224 с.
2. Заалишвили В.Б., Кануков А.С., Корбесова К.В., Майсурадзе М.В. Определение уровня загрязнения атмосферного воздуха урбанизированной территории автомобильным транспортом. // Геология и Геофизика Юга России. – 2023. – 13(2). – С. 133-148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011.

3. Керимов И.А., Гайрабеков У.Т., Махмудова Л.Ш. Карбоновый полигон Чеченской Республики: I. Ландшафтные особенности и структура. // Грозненский естественнонаучный бюллетень. – 2021. – Т. 6. № 3(25). – С. 35–47.
4. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской республики. // Геология и геофизика Юга России. – 2023. – 13(3). – С. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.
5. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. – Springer: Dordrecht. The Netherlands. – 2012. – pp. 438.
6. Basu S., Guerlet S., Butz A., Houweling S., Hasekamp O., Aben I., Krummel P., Steele P., Langenfelds R., Torn M., et al. Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. // Atmos. Chem. Phys. – 2013. – 13. – pp. 8695–8717. DOI:10.5194/acp-13-8695-2013.
7. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. // Colorado Biogeochemistry. – 2009. – 95. – p. 61–76.
8. Dong F., Qin C., Zhang X., Zhao X., Pan Y., Gao Y., Zhu J., Li Y. Towards Carbon Neutrality: The Impact of Renewable Energy Development on Carbon Emission Efficiency Int. J. Environ. Res. Public Health. – 2021. – 18. 13284. DOI:10.3390/ijerph182413284.
9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D., Kolle O., Lagergren F., Lindroth A., Minerbi S., et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. // Agric. For. Meteorol. – 2008. – 148. – p. 12–24.
10. Foken T. The energy balance closure problem: an overview. // Ecol. Appl. – 2008. – 18. – p. 1351–1367.
11. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B. and Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. // Atmos. Meas. Tech. – 2020. – 13. – p. 1671–1692. DOI:10.5194/amt-13-1671-2020.
12. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. // Agric. For. Meteorol. – 2008. – 148. – p. 1777–1797.
13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of Clear-Cutting on Soil CO₂ Emission. // Biology Bulletin. – 2017. – 44 (2). – p. 218–223.
14. Mukhartova I., Kurbatova J., Tarasov D., Gibadullin R., Sogachev A., Olchev A. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. // Atmosphere. – 2023. – 14(4). – p. 625, DOI: 10.3390/atmos14040625.
15. Pirk N., Aalstad K., Westermann S., Vatne A., van Hove A., Tallaksen L.M., Cassiani M. and Katul G. Inferring surface energy fluxes using drone data assimilation in large eddy simulations. // Atmos. Meas. Tech. – 2022. – 15. – p. 7293–7314. DOI:10.5194/amt-15-7293-2022.
16. Pörtner H.O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., et al. (Eds.) IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. – Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, –2022. – p 3056. DOI:10.1017/9781009325844.
17. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. // Agric. For. Meteorol. – 2004. – 123. – p. 159–176.
18. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K., Lindauer M., Kubistin D. and Burrows J.P. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. // Atmos. Meas. Tech. – 2021. – 14. – p. 153–172. DOI:10.5194/amt-14-153-2021.
19. Sharma S., Dhal S., Rout T., et al. Drones and machine learning for estimating forest

carbon storage. // Carbon res. – 2022. – 1. – pp. 21. DOI:10.1007/s44246-022-00021-5.

20. Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag. // Bound. Layer Meteorol. – 2006. – 121. – pp. 229-266.

21. Sogachev A., Menzhulin G.V., Heimann M., Lloyd J. A simple three-dimensional canopy-planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. // Tellus. – 2002. – 54B. – pp. 784-819.

22. Yang D.X., Zhang H.F., Liu Y., Chen B.Z., Cai Z.N. and Lu D.R. Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using Carbon Tracker-China // Adv. Atmos. Sci. – 2017. – 34. – p. 965–976. DOI: 10.1007/s00376-017-6221-4.

23. Yue X.L., Gao Q.X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. // Adv. Clim. Chang. Res. – 2018. – 9. – p. 243–252. DOI:10.1016/j.accre.2018.12.003.

References

1. Elizarova T.G. Lectures: Mathematical models and numerical methods in fluid and gas dynamics. Approaches based on systems of quasi-gas-dynamic and quasi-hydrodynamic equations. –M.: Faculty of Physics, MSU. 2005. 224 p. (in Russ.)

2. Zaalishvili V.B., Kanukov A.S., Korbesova K.V., Maisuradze M.V. Determination of air pollution levels caused by road transport in urbanized areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 2. pp. 133–148. DOI: 10.46698/VNC.2023.76.91.011. (in Russ.)

3. Kerimov I.A., Gairabekov U.T., Makhmudova L.Sh. Carbon polygon of the Chechen Republic: I. Landscape features and structure. *Groznsenskiy Estestvennonauchniy Bulletin*. 2021. Vol. 6. No. 3. Issue 25. pp. 35–47. (in Russ.)

4. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon of the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. 13(3). pp. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. (in Russ.)

5. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy Covariance: A Practical Guide to Measurement and Data Analysis. Springer: Dordrecht, The Netherlands. 2012. p. 438.

6. Basu S., Guerlet S., Butz A., Houweling S., Hasekamp O., Aben I., Krummel P., Steele P., Langenfelds R., Torn M., et al. Global CO₂ fluxes estimated from GOSAT retrievals of total column CO₂. *Atmos. Chem. Phys.* 2013. 13. pp. 8695–8717. DOI:10.5194/acp-13-8695-2013.

7. Blanken P.D., Williams M.W., Burns S.P., Monson R.K., Knowles J., Chowanski K., Ackerman T. A comparison of water and carbon dioxide exchange at a windy alpine tundra and subalpine forest site near Niwot Ridge. *Colorado Biogeochemistry*. 2009. 95. pp. 61–76.

8. Dong F., Qin C., Zhang X., Zhao X., Pan Y., Gao Y., Zhu J., Li Y. Towards Carbon Neutrality: The Impact of Renewable Energy Development on Carbon Emission Efficiency *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2021. . Vol. 18. No. 24. 13284. DOI:10.3390/ijerph182413284.

9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D., Kolle O., Lagergren F., Lindroth A., Minerbi S., et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. *Agric. For. Meteorol.* 2008. 148. pp. 12–24.

10. Foken T. The energy balance closure problem: an overview. *Ecol. Appl.* 2008. Vol. 18. Issue 6. pp. 1351–1367.

11. Kunz M., Lavric J.V., Gasche R., Gerbig C., Grant R.H., Koch F.T., Schumacher M., Wolf B., Zeeman M. Surface flux estimates derived from UAS-based mole fraction measurements by means of a nocturnal boundary layer budget approach. *Atmos. Meas. Tech.* 2020. Vol. 13, Issue 4. pp. 1671–1692. DOI:10.5194/amt-13-1671-2020.

12. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. *Agric. For. Meteorol.* 2008. Vol. 148. Issue 11. pp. 1777–1797.

13. Molchanov A.G., Kurbatova Yu.A., Olchev A.V. Effect of Clear-Cutting on Soil CO₂ Emission. *Biology Bulletin*. 2017. 44 (2). pp. 218–223.

14. Mukhartova I., Kurbatova J., Tarasov D., Gibadullin R., Sogachev A., Olchev A. Modeling Tool for Estimating Carbon Dioxide Fluxes over a Non-Uniform Boreal Peatland. *Atmosphere*. 2023. 14(4). pp. 625. DOI: 10.3390/atmos14040625.
15. Pirk N., Aalstad K., Westermann S., Vatne A., van Hove A., Tallaksen L.M., Cassiani M. and Katul G. Inferring surface energy fluxes using drone data assimilation in large eddy simulations. *Atmos. Meas. Tech.* 2022. Vol. 15. Issue 24. pp. 7293–7314. DOI:10.5194/amt-15-7293-2022.
16. Pörtner H.O., Roberts D.C., Tignor M., Poloczanska E.S., Mintenbeck K., Alegría A., Craig M., Langsdorf S., Löschke S., Möller V., et al. (Eds.) IPCC, 2022: Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability; Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press: Cambridge, UK; New York, NY, USA, 2022. pp. 3056. DOI:10.1017/9781009325844.
17. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T., Niinisto S., Lohila A., Larmola T., Morero M., Pihlatie M., et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agric. For. Meteorol.* 2004. Vol. 123. pp. 159–176.
18. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K., Lindauer M., Kubistin D. and Burrows J.P. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. *Atmos. Meas. Tech.* 2021. Vol. 14. pp. 153–172. DOI:10.5194/amt-14-153-2021.
19. Sharma S., Dhal S., Rout T., et al. Drones and machine learning for estimating forest carbon storage. *Carbon res.* 2022. Vol. 1. pp. 21. DOI:10.1007/s44246-022-00021-5.
20. Sogachev A., Panferov O. Modification of two-equation models to account for plant drag. *Bound. Layer Meteorol.* 2006. Vol. 2. Issue 121. pp. 229–266.
21. Sogachev A., Menzhulin G.V., Heimann M., Lloyd J. A simple three-dimensional canopy-planetary boundary layer simulation model for scalar concentrations and fluxes. *Tellus*. 2002. 54B. pp. 784–819.
22. Yang D.X., Zhang H.F., Liu Y., Chen B.Z., Cai Z.N. and Lu D.R. Monitoring carbon dioxide from space: Retrieval algorithm and flux inversion based on GOSAT data and using Carbon Tracker-China. *Adv. Atmos. Sci.* 2017. Vol. 34. pp. 965–976. DOI: 10.1007/s00376-017-6221-4.
23. Yue X.L., Gao Q.X. Contributions of natural systems and human activity to greenhouse gas emissions. *Adv. Clim. Chang. Res.* 2018. Vol. 9. Issue 4. pp. 243–252. DOI:10.1016/j.accre.2018.12.003.