

УДК 551.510.42

DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

Оригинальная статья

Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков CO_2 над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений

Ю.В. Мухартова^{1,2}, А.В. Ольчев^{1,2}, И.А. Керимов^{2,3}, Е.С. Обаев¹

¹ Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова, Россия, 119991, г. Москва, Ленинские горы, 1, ГСП-1, e-mail: muhartova@yandex.ru;

² Грозненский государственный нефтяной технический университет им. акад. М.Д. Миллионщикова, Россия, 364051, г. Грозный, пр. Х.А. Исаева, 100;

³ Институт физики Земли им. О.Ю. Шмидта РАН, Россия, 123995, г. Москва, ул. Б. Грузинская, 10, стр. 1

Статья поступила: 29.09.2025, доработана: 05.12.2025, принята к публикации: 09.12.2025

Резюме: Актуальность работы. Изменение концентрации парниковых газов (ПГ) в атмосфере является одним из ключевых факторов глобального изменения климата. Для корректного понимания вклада различных экосистем в углеродный баланс необходимо количественно оценивать поверхностные потоки ПГ. Однако существующие методы, в частности метод турбулентных пульсаций, ограниченно применимы на территориях со сложным рельефом и мозаичной структурой растительного покрова. Это обуславливает необходимость разработки новых подходов, обеспечивающих надёжную оценку потоков ПГ в условиях пространственной неоднородности ландшафтов. **Цель работы.** Разработка и тестирование усовершенствованного инверсионного алгоритма восстановления поверхностных потоков ПГ в холмистой местности на основе данных концентраций ПГ в приземном слое атмосферы, получаемых, в том числе, с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). **Методы исследования.** Предложенный подход основан на решении прямой задачи для концентрации ПГ с последующей минимизацией расхождения между измеренными и смоделированными значениями на двух контрольных высотах в пределах приземного слоя. Для верификации алгоритма проведены численные эксперименты с использованием трёхмерной гидродинамической модели высокого разрешения, позволяющей воспроизводить поля скоростей, турбулентных характеристик и концентраций ПГ в реальных топографических условиях. **Результаты работы.** Модель апробирована для покрытого лесом холмистого участка в предгорьях Большого Кавказского хребта (Чеченская Республика, Россия). Численные эксперименты показали, что усовершенствованный алгоритм обеспечивает достоверное восстановление пространственной структуры потоков CO_2 при перепадах высот до 100 м. Сравнение с предыдущей версией модели выявило существенное повышение точности расчётов и снижение систематических ошибок при учёте топографических эффектов. Практическая значимость. Разработанный метод открывает возможности для количественной оценки потоков ПГ на участках, где традиционные микрометеорологические подходы неприменимы. Он может использоваться в системах дистанционного мониторинга углеродного баланса экосистем с использованием БПЛА и наземных платформ, а также адаптироваться для анализа пространственно неоднородных потоков других парниковых газов.

Ключевые слова: потоки парниковых газов, инверсионное моделирование, моделирование турбулентного переноса, наблюдения с БПЛА, карбоновые полигоны.

Благодарности: Работа выполнена в рамках реализации темы госзадания ГГНТУ имени академика М.Д. Миллионщикова, FZNU-2024-0002.

Для цитирования: Мухартова Ю.В., Ольчев А.В., Керимов И.А., Обаев Е.С. Усовершенствованный инверсионный метод восстановления потоков CO_2 над территориями со сложным рельефом на основе атмосферных измерений. *Геология и геофизика Юга России*. 2025. 15(4): 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

Original paper

An improved inversion method for recovering CO₂ fluxes over complex terrain areas based on atmospheric measurements

I.V. Mukhartova^{1,2}, A.V. Olchev^{1,2}, I.A. Kerimov^{2,3}, E.S. Obaev¹¹ Lomonosov Moscow State University, GSP-1, 1 Leninskie Gory, Moscow 119991, Russian Federation, e-mail: muhartova@yandex.ru;² Grozny State Oil Technical University, 100 H.A. Isaeva Ave., Grozny 364024, Russian Federation;³ Schmidt Institute of Physics of the Earth, Russian Academy of Sciences, 10/1 B. Gruzinskaya, Moscow 123242, Russian Federation

Received: 29.09.2025, revised: 05.12.2025, accepted: 09.12.2025

Abstract. Relevance. Changes in the concentration of greenhouse gases (GHGs) in the atmosphere are a key factor in global climate change. To correctly understand the contribution of different ecosystems to the carbon balance, it is necessary to quantitatively assess surface GHG fluxes. However, existing methods, particularly the eddy covariance method, are limited in their applicability to areas with complex terrain and varied vegetation. Therefore, new approaches are needed to reliably estimate GHG fluxes in spatially heterogeneous landscapes. **The aim** of this study is to develop and test an improved inversion algorithm for estimating surface GHG fluxes in hilly terrain. The algorithm will be based on GHG concentration data obtained from the surface layer of the atmosphere using unmanned aerial vehicles (UAVs). **Methods.** The proposed approach involves first solving the direct problem of GHG concentration and then minimizing the discrepancy between the measured and modeled values at two control heights within the surface layer. Numerical experiments were conducted using a high-resolution, three-dimensional hydrodynamic model to verify the algorithm. This model can reproduce velocity fields, turbulent characteristics, and GHG concentrations in real topographic conditions. **Results.** The model was tested in a forested, hilly area in the foothills of the Greater Caucasus Range in the Chechen Republic of Russia. The numerical experiments showed that the improved algorithm reliably reconstructs the spatial structure of CO₂ fluxes at elevation differences of up to 100 meters. Comparing the results with those of the previous model version revealed a significant increase in calculation accuracy and a reduction in systematic errors when accounting for topographic effects. **Practical significance.** The developed method provides an opportunity to quantitatively assess GHG fluxes in areas where classic micrometeorological approaches are not applicable. The method can be used in remote monitoring systems to assess the carbon balance of ecosystems using UAVs and ground platforms. It can also be adapted to analyze spatially heterogeneous fluxes of other GHGs.

Keywords: greenhouse gas fluxes, inverse modeling, turbulent transfer modeling, UAV measurements, carbon supersites.

Acknowledgements: The work was supported by the State Assignment of the Grozny State Oil Technical University (Project Reg. No. FZNU-2024-0002).

For citation: Mukhartova I.V., Olchev A.V., Kerimov I.A., Obaev E.S. An improved inversion method for recovering CO₂ fluxes over complex terrain areas based on atmospheric measurements. *Geologiya i Geofizika Yuga Rossii = Geology and Geophysics of Russian South*. (in Russ.). 15(4): 235–248. DOI: 10.46698/v6610-9093-2069-x

Введение

Изучение потоков парниковых газов (ПГ) в наземных экосистемах имеет ключевое значение для понимания механизмов современного изменения климата. Повышение глобальной температуры и рост повторяемости экстремальных погодных явлений большинство экспертов по климату связывают со стремительным увеличением концентрации ПГ в атмосфере [IPCC ..., 2022]. Наземные экосистемы при этом играют важнейшую роль в формировании глобального баланса углерода и других парниковых газов, выступая как их источниками, так и поглотителями. Для корректной оценки региональных и глобальных потоков CO_2 и других ПГ, а также для подготовки национальных отчётов об их эмиссии и поглощении, необходима достоверная информация о величине и пространственно-временной изменчивости поверхностных потоков.

В настоящее время во всём мире реализуется множество проектов, направленных на наблюдение потоков ПГ у поверхности Земли, создание глобальных сетей мониторинга, совершенствование технологий наземных измерений и разработку методов дистанционной оценки потоков [Olchev, 2025]. Наиболее широко применяемыми методами измерения потоков являются метод турбулентных пульсаций (eddy covariance) [Aubinet et al., 2012; Burba, 2013; Baldocchi et al., 2001; Villarreal, Vargas, 2021] и метод экспозиционных камер [Pumpanen et al., 2004]. Первый метод обеспечивает измерения потоков на уровне экосистемы и интегрирован в региональные и глобальные наблюдательные сети (ICOS, AmeriFlux, AsiaFlux, ChinaFlux, RuFlux, Fluxnet), что гарантирует сопоставимость данных на национальном и международном уровнях. Однако существенным недостатком данного подхода является его полная неприменимость для измерений над сложными, горизонтально неоднородными поверхностями. Метод экспозиционных камер, напротив, обеспечивает высокую точность локальных измерений потоков и не требует учёта ландшафтной неоднородности, однако чрезвычайно плохо масштабируется до уровня экосистемы.

Потребность в получении данных о потоках ПГ на региональном и глобальном уровнях, включая труднодоступные и топографически сложные территории, стимулировала развитие математических моделей различной степени сложности, основанных на использовании спутниковых наблюдений [Jagermeyr et al., 2014; Junttila et al., 2021; Maksyutov et al., 2021]. В подобных подходах обратные алгоритмы оценки потоков ПГ опираются на значения концентраций в приземном слое атмосферы, верифицируемые по данным наземных станций мониторинга. При этом в инверсионных схемах нередко используются региональные модели атмосферного переноса, позволяющие уточнять пространственное распределение потоков. Однако спутниковые методы обладают рядом ограничений: дискретностью наблюдений, влиянием облачности, неравномерным расположением наземных контрольных станций и недостаточным пространственным разрешением, что приводит к расхождениям между результатами различных инверсионных алгоритмов [Jin et al., 2024].

В последние годы активно развиваются методы оценки поверхностных потоков ПГ на основе данных, получаемых с беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) [Shaw et al., 2021; Kunz et al., 2020; Reuter et al., 2021; Bolek et al., 2024]. Преимущество таких методов заключается в возможности оперативного получения пространственно детализированных данных над участками с различными типами подсти-

лающей поверхности, включая районы со сложным рельефом и мозаичной структурой растительного покрова, где традиционные наземные методы оказываются малоэффективными. Эти подходы рассматриваются как физически обоснованный инструмент восстановления потоков с высоким пространственным разрешением, позволяющий получать оценки на локальном и мезомасштабном уровнях без необходимости детального знания биогеохимических характеристик источников и стоков ПГ в почве и растительности.

Несмотря на очевидные преимущества, применение дистанционных методов оценки потоков ПГ остаётся затруднительным в условиях пересечённого рельефа и мозаичной структуры растительного покрова. В таких случаях существенное влияние на формирование полей концентраций оказывают локальные турбулентные процессы и горизонтальные градиенты скоростей ветра, что осложняет интерпретацию измерений и повышает неопределённость оценок потоков. Поэтому совершенствование существующих технологий и разработка новых алгоритмов восстановления потоков ПГ для сложных ландшафтов остаются актуальной научной задачей.

В настоящей работе представлен усовершенствованный подход к обратному моделированию потоков парниковых газов на основе трёхмерной гидродинамической модели типа RANS (Reynolds-averaged Navier–Stokes), позволяющий восстанавливать пространственное распределение поверхностных потоков с высоким уровнем детализации. В отличие от ранее предложенных схем, разработанный алгоритм сочетает преимущества высокоразрешающего моделирования турбулентного переноса с данными дистанционных измерений, получаемыми с БПЛА. Основное внимание уделено оценке возможности восстановления потоков на границах различных типов землепользования и в районах со сложным рельефом.

Для проверки эффективности алгоритма проведены численные эксперименты с использованием результатов прямого моделирования, в которых в качестве «истинных» потоков и прокси-данных о распределении концентраций CO_2 применялись решения трёхмерной модели высокого разрешения [Mukhartova et al., 2024]. В качестве модельного примера рассмотрен поток CO_2 над холмистой поверхностью, характеризующейся множественными пространственно-неоднородными источниками и стоками в пределах растительного покрова и почвы. Более ранняя версия инверсионного алгоритма была представлена в работах [Мухартова и др., 2023; Mukhartova et al., 2024]. Модификация схемы аппроксимации граничных условий и структуры расчётной сетки позволила существенно повысить точность восстановления потоков и сократить вычислительные затраты.

Материалы и методы

В качестве экспериментальной территории был выбран покрытый лесом холмистый участок в предгорьях Большого Кавказского хребта, расположенный вблизи посёлка Рошни-Чу (43°03'47.0»с.ш., 45°23'13.3»в.д., Чеченская Республика, Россия). Территория входит в состав карбонового полигона “Way Carbon” [Керимов и др., 2023] и характеризуется выраженной топографической неоднородностью (перепад высот около 200 м) при относительно однородном лесном покрове. В летние сезоны 2022 и 2023 годов на площадке проводились полевые измерения скорости дыхания почвы, фотосинтеза и стволового дыхания деревьев. Полученные данные использовались как входные параметры для расчёта концентраций CO_2 в приземном слое атмосферы с применением прямой модели.

Для генерации прокси-данных о пространственном распределении концентраций CO_2 и расчёта целевого потока, с которым в дальнейшем сравнивались результаты решения обратной задачи, использовалась трёхмерная гидродинамическая RANS-модель [Mukhartova et al., 2024], описывающая поля скорости воздушного потока ($\vec{V}$) и позволяющая оценивать коэффициенты турбулентности для потока импульса (K) и переноса CO_2 (K_c). После определения полей скорости ветра и коэффициентов турбулентности при заданном распределении почвенного дыхания (q_h) вычислялось поле концентраций CO_2 в приземном слое атмосферы (C) для заданных источников (F_b) и стоков (F_{ph}) в растительном пологом:

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

где 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 $h(x, y)$. Начальное распределение концентрации принималось равным некоторому среднему значению C_0 . На боковых границах области задавались однородные условия сноса [Елизарова, 2007], что соответствует пренебрежимо малому горизонтальному градиенту C вблизи границ. Вертикальный поток CO_2 может быть определен по формуле [Blanken et al., 2009; Feigenwinter et al., 2008; Leuning et al., 2008]:

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

Полученное по формуле (2) распределение вертикального потока на заданной высоте далее будет рассматриваться как целевой поток при тестировании обратной задачи.

Главным ограничением прямой модели является необходимость знания пространственного распределения источников и стоков CO_2 , а также параметров, описывающих физиологические процессы (устычная проводимость, световая кривая фотосинтеза и др.). Для преодоления этих трудностей в предыдущих работах [Мухартова и др., 2023; Mukhartova et al., 2024] был предложен инверсионный метод, не требующий детализированной информации о распределении источников и стоков ПГ. Для решения обратной задачи необходимо иметь измерения концентраций ПГ на нескольких (как минимум двух) высотных уровнях над растительным пологом, что может быть реализовано с помощью БПЛА, оснащённых инфракрасными газоанализаторами. Постановка обратной задачи требует знания поля скорости ветра и коэффициентов турбулентной диффузии, которые могут быть определены на основе данных о рельефе (например, по результатам лидарной съёмки) и структуре растительности (LAD – Leaf Area Density), а также известных параметров ветрового режима на заданной высоте.

Предположим, что нужно оценить вертикальный поток ($q_w^*(x, y)$) на некоторой высоте h_{flux} над поверхностью. Обратное моделирование сводится к многократному решению прямой задачи в области выше h_{flux} :

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

с изменением искомого граничного потока ($q_w(x, y, h_{flux})$) таким образом, чтобы минимизировать функционал расхождения между измеренными и рассчитанными концентрациями на контрольных высотах:

$$M[q_w(x, y, h_{flux})] = \|C - C^{meas}\|^2 = \frac{1}{L_x L_y I} \sum_{i=1}^I \int_{\Pi} (C(x, y, h_i) - C_i^{meas}(x, y))^2 dx dy, \quad (4)$$

где I – число измерительных уровней, $C(x, y, h_i)$ – смоделированные значения концентрации на уровне h_i , $C_i^{meas}(x, y)$ – измеренные значения на том же уровне.

Минимизация функционала выполнялась итерационным методом внутренней точки для нелинейного программирования с контролем невыполнимости [Nocedal et al., 2014]. В качестве начального приближения потока использовалась оценка, полученная из выражения (2) заменой градиента концентрации конечной разностью по двум высотным уровням:

$$\begin{aligned} q_w^{ini}(x, y) = & -K_C(x, y, h_{flux}) \frac{C_2^{meas}(x, y) - C_1^{meas}(x, y)}{h_2 - h_1} + \\ & + \operatorname{sgn}(w(x, y, h_{flux})) w(x, y, h_{flux}) \frac{C_2^{meas}(x, y) - C_1^{meas}(x, y)}{h_2 - h_1} \Delta z. \end{aligned} \quad (5)$$

При проведении измерений целесообразно брать за уровень h_1 сам уровень h_{flux} . В качестве критерия завершения итерационного процесса при оценке функции $q_w(x, y, h_{flux})$ использовалось условие достижения функционалом $\|C - C^{meas}\|^2$ значений порядка квадрата инструментальной погрешности измерений концентрации. Такой подход позволяет контролировать сходимость и предотвращать переоптимизацию при наличии шумов в экспериментальных данных. Следует отметить, что метод обладает высокой чувствительностью к точности измерений концентрации, поэтому минимизация систематических ошибок при полевых наблюдениях имеет ключевое значение для корректного восстановления потоков.

Ранее было показано, что предложенный инверсионный подход обеспечивает удовлетворительное качество восстановления потоков над горизонтальными поверхностями с мозаичной растительностью, однако даёт существенные ошибки при наличии выраженного рельефа [Mukhartova et al., 2024]. В упомянутой работе в качестве поверхности потока h_{flux} принималась поверхность, огибающая рельеф на постоянной высоте от поверхности земли, при этом потоки оценивались одновременно для всей исследуемой территории в ряде дискретных точек, равномерно распределённых по площади, без учёта локальных уклонов. Несмотря на то, что результаты подтвердили принципиальную возможность применения подхода, в районах со значительными перепадами вы-

сот ошибки восстановления достигали 50 %. Численное решение задачи (3) при этом выполнялось на той же расчётной сетке с неравномерным шагом по высоте, что и в прямой задаче (1). В усовершенствованной версии алгоритма, представленной в данной работе, расчёт выполнялся по отдельным подобластям, что позволило существенно сократить вычислительное время и повысить горизонтальное разрешение. В новой схеме поверхность h_{flux} задавалась в виде горизонтальной плоскости, что обеспечило более корректную аппроксимацию граничных условий в разностной схеме задачи (3). Для увеличения точности расчётов была применена новая структура сетки с вертикальным сгущением узлов вблизи поверхности h_{flux} . Контрольные уровни h_1 и h_2 также задавались в виде горизонтальных плоскостей, причём уровень h_1 совпадал с h_{flux} . Такое построение расчётной области позволило существенно уменьшить погрешность при восстановлении потока и повысить устойчивость итерационного процесса в условиях сложного рельефа.

Результаты численных экспериментов

Численные эксперименты проводились для полуденного времени ясного летнего дня 2023 года при преобладающем юго-западном направлении ветра. Для проверки работоспособности и точности инверсионной модели использовались прокси-поля концентраций CO_2 , рассчитанные с помощью прямой модели, а также соответствующее им распределение целевого потока. Входными параметрами прямой модели служили результаты полевых измерений скорости дыхания почвы и фотосинтеза, данные о направлении и скорости ветра, температуре, влажности воздуха и приходящей фотосинтетически активной радиации (ФАР). Для имитации измерений концентрации добавлялась инструментальная погрешность (1 ppm), соответствующая типичным характеристикам используемых датчиков.

Смоделированное пространственное распределение вертикальных потоков CO_2 , полученное с использованием полной прямой модели, а также ошибка их восстановления исходной версией алгоритма [Mukhartova et al., 2024] представлены на рисунке 1. Отрицательные значения потока соответствуют переносу CO_2 из атмосферы к подстилающей поверхности, положительные – направлению потока от растительного полога в атмосферу.

Для тестирования инверсионного алгоритма восстановления вертикального потока CO_2 в качестве целевого распределения использовались потоки, смоделированные прямой моделью для выбранной подобласти (обозначенной рамкой на рис. 2а и 2с), где исходная версия алгоритма демонстрировала значительные ошибки. Заданный уровень h_{flux} , на котором производилась оценка потока, был расположен на высоте 5 м над пологом растительности в точке максимальной отметки рельефа. Имитация измерений концентрации выполнялась для двух уровней: $h_1 = h_{flux}$ и $h_2 = h_1 + 10$ м.

На первом этапе исследования проводилась верификация согласованности между результатами упрощённой модели (3) и полной прямой модели. Для этой подобласти поля концентраций CO_2 рассчитывались на двух высотах h_1 и h_2 с использованием целевого потока в качестве граничного условия задачи (3).

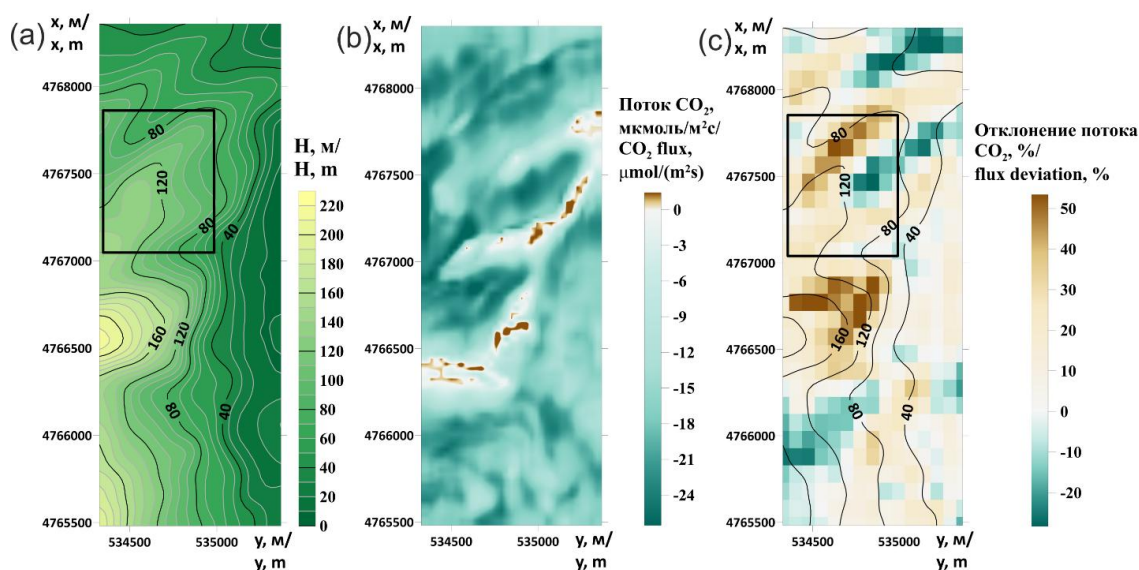


Рис. 1. (a) Рельеф экспериментальной площадки и выбранной подобласти (указана рамкой); (b) смоделированное пространственное распределение вертикальных потоков CO_2 , полученное с использованием полной прямой модели; (c) ошибка восстановления вертикальных потоков CO_2 исходной версией инверсионного алгоритма [Mukhartova et al., 2024]. Изолинии соответствуют относительной высоте поверхности /

Fig. 1. (a) Topography of experimental site and selected test subdomain (indicated by the frame); (b) modeled vertical CO_2 flux distribution obtained from the full forward model; (c) errors in retrieving vertical CO_2 fluxes with the original version of the inverse algorithm [Mukhartova et al., 2024]. Contour lines correspond to the relative height of the surface

Сравнение полученных распределений концентраций показало их хорошее соответствие результатам полной модели (рис. 2). Наилучшее совпадение наблюдалось в юго-западной части подобласти, где уровень h_{flux} был минимально удалён от поверхности. Наибольшие расхождения отмечены в северо-западной и восточной частях, соответствующих понижению рельефа. Это свидетельствует о снижении точности решения обратной задачи с увеличением высоты, на которой выполняются измерения концентрации CO_2 . Различия между результатами упрощённой и полной моделей объясняются тем, что в задаче (3) на нижней границе задаётся только вертикальный поток без учёта горизонтальной адвекции, а также тем, что обе задачи решаются на разных расчётных сетках. Однако величина этих различий оказалась меньше предполагаемой инструментальной погрешности, что позволяет считать их допустимыми в рамках данного исследования.

На следующем этапе эксперимента выполнялось восстановление полей вертикальных потоков CO_2 . Результаты численного моделирования показали, что точность восстановления остаётся высокой для участков с ровным рельефом, но снижается при уклонах поверхности более 20° . Это обусловлено уменьшением вертикальных и горизонтальных градиентов концентрации на удалении от поверхности вследствие интенсивного турбулентного перемешивания, а также снижением чувствительности алгоритма при низких контрастах концентраций (менее 1 ppm), сопоставимых с инструментальной погрешностью. В связи с этим расчёты ограничивались подобластями, где расстояние между поверхностью земли и горизонтальным уровнем измерений (h_{flux}) не превышало 100 м.

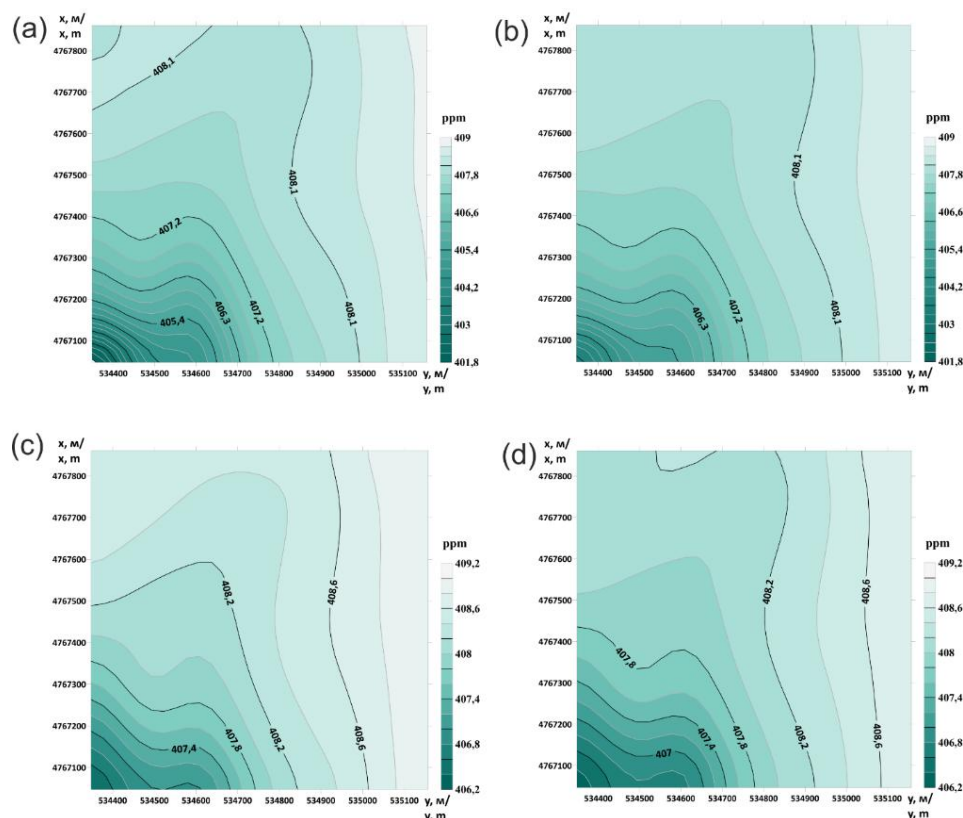
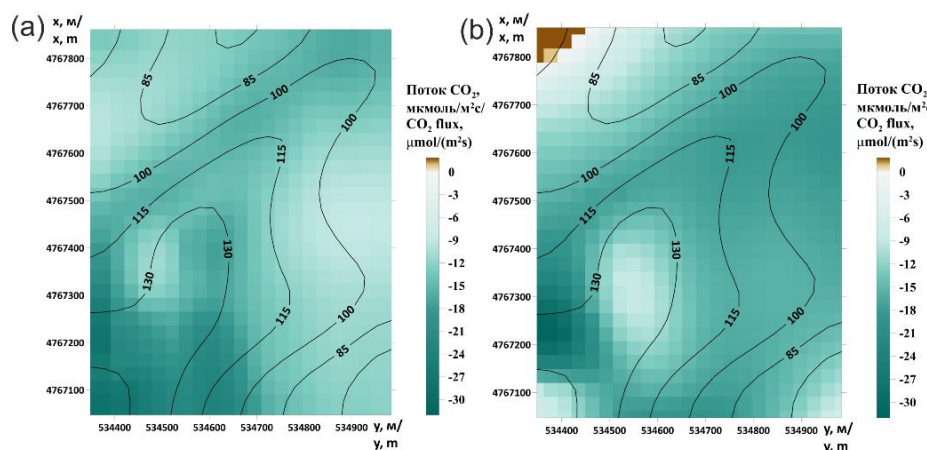


Рис. 2. Пространственное распределение концентраций CO_2 : (a) и (c) – вычисленные с помощью полной прямой задачи на уровнях h_1 и h_2 соответственно; (b) и (d) – вычисленные на уровнях h_1 и h_2 из упрощенной задачи (3) с целевым потоком в качестве входных данных /

Fig. 2. Spatial distribution of CO_2 concentrations: (a) and (c) calculated from solving the full forward problem at levels h_1 and h_2 , respectively; (b) and (d) calculated at levels h_1 and h_2 from the simplified model (3) with the target flux as input data

На рисунке 3 приведены распределения целевого потока CO_2 , его начального приближения, полученного по формуле (5), восстановленного потока и карты отклонений относительно целевых значений. Начальное приближение верно передаёт порядок величины потока, но не отражает пространственную структуру. В отличие от него, потоки, восстановленные с помощью инверсионного алгоритма, демонстрируют как качественное, так и количественное совпадение с целевыми значениями, что указывает на существенное повышение точности по сравнению с исходной версией алгоритма, особенно в центральной части тестовой подобласти.



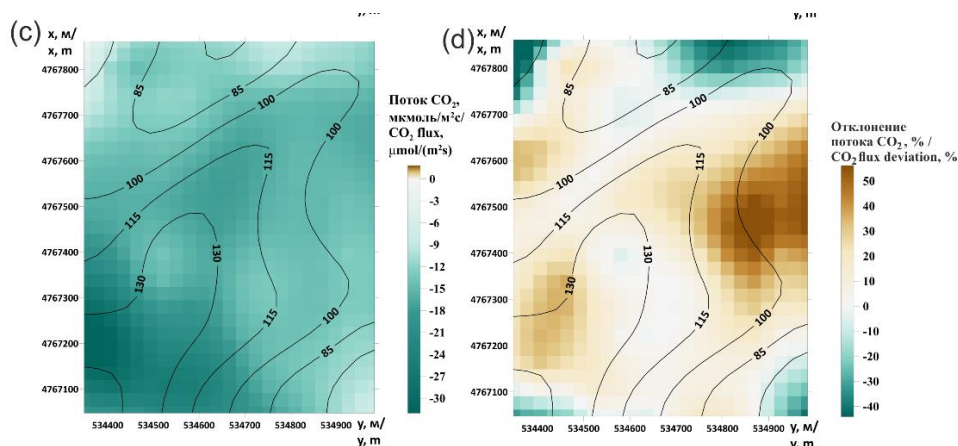


Рис. 3. Пространственные распределения: целевого потока CO₂ (a); начального приближения вертикального потока CO₂ (b); потока CO₂, полученного из инверсионного моделирования (c); отклонения оцененного потока от целевого (d) (в % с учетом знака отклонения).

Изолинии соответствуют относительной высоте поверхности /

Fig.3. Spatial distributions of: target CO₂ flux (a); initial approximation of the vertical CO₂ flux (b); the CO₂ flux retrieved from the inverse modeling (c); deviation of the retrieved flux from the target flux (d) (in %, taking into account the sign of the deviation). Contour lines correspond to the relative height of the surface

Обсуждение результатов

Полученные результаты показывают, что усовершенствованный инверсионный алгоритм демонстрирует стабильное восстановление пространственного распределения потоков CO₂ в условиях сложного рельефа. Улучшение точности по сравнению с предыдущей версией метода связано, прежде всего, с модификацией расчётной сетки, обеспечивающей сгущение узлов вблизи поверхности (h_{flux}), и новой схемой аппроксимации граничных условий. Эти изменения позволили повысить чувствительность модели к вертикальным градиентам концентрации и уменьшить влияние ошибок, связанных с усреднением по высоте.

Сопоставление результатов инверсионного моделирования с данными прямых расчётов показало, что алгоритм адекватно воспроизводит как величины потоков, так и их пространственную структуру в пределах основной части модельного домена. Наибольшее согласие отмечено для областей с плавным рельефом и однородной растительностью, где турбулентный перенос имеет квазистационарный характер. Напротив, на склонах с уклонами более 20° погрешность восстановления возрастает вследствие усиления горизонтальной адвекции и формирования локальных зон вихревого обмена. Эти особенности согласуются с результатами других работ, указывающих на сложность применения инверсионных методов в условиях сильной топографической неоднородности [Feigenwinter et al., 2008; Mukhartova et al., 2024].

Важным результатом численных экспериментов является выявление зависимости точности восстановления потоков от высоты измерения концентраций CO₂. Как показали тесты, при увеличении расстояния между уровнями h_1 и h_2 чувствительность алгоритма снижается, особенно в зонах интенсивного турбулентного перемешивания. Это связано с уменьшением вертикального градиента концентрации и, как следствие, с потерей информативности данных. Таким образом, для обеспечения устойчивого решения обратной задачи измерение концентраций должно выполняться в нижней части приземного слоя, предпочтительно в пределах 10–20 м от поверхности пологой растительности.

Дополнительным фактором, влияющим на качество восстановления потоков, является пространственная неоднородность растительного покрова. Даже при небольших изменениях плотности листовой поверхности и высоты деревьев локальные различия в сопротивлении переносу могут вызывать искажения в полях концентрации. В перспективе планируется включить в алгоритм параметризацию неоднородности растительности по данным лидарной съёмки (LAD), что позволит уточнить структуру турбулентных потоков и повысить точность инверсии.

Сравнение результатов с аналогичными исследованиями, выполненными для равнинных участков [Mukhartova et al., 2024; Kunz et al., 2020], показывает, что эффективность инверсионного подхода в условиях холмистой местности снижается не более чем на 20–25 % при перепадах высот до 100 м. Это свидетельствует о высокой устойчивости метода и возможности его практического применения для оценки потоков ПГ в природных экосистемах, где традиционные микрометеорологические методы неприменимы.

Таким образом, предложенный алгоритм обеспечивает компромисс между вычислительной эффективностью и физической достоверностью и может рассматриваться как инструмент для высокоточной реконструкции пространственно неоднородных потоков парниковых газов в пределах ограниченных территорий. В дальнейшем планируется расширить подход за счёт адаптации его к многоуровневым данным наблюдений и интеграции с региональными моделями атмосферного переноса.

Заключение

Проведённые численные эксперименты подтвердили эффективность усовершенствованного инверсионного алгоритма восстановления потоков ПГ в условиях сложного рельефа. Модель, основанная на трёхмерной гидродинамической RANS-схеме, обеспечивает достоверное воспроизведение пространственной структуры потоков CO_2 и демонстрирует устойчивость к вариациям исходных параметров.

Модификация схемы аппроксимации граничных условий и структуры расчётной сетки позволила повысить горизонтальное разрешение модели, улучшить аппроксимацию вблизи поверхности и сократить вычислительные затраты. В результате средняя ошибка восстановления потоков значительно снизилась по сравнению с ранее применяемой версией алгоритма, особенно в областях с умеренным рельефом и плавными изменениями высот.

Установлено, что точность восстановления потоков CO_2 зависит от высоты измерений, характера турбулентного перемешивания и топографических особенностей. Наибольшие расхождения наблюдаются в зонах с резкими изменениями уклонов и выраженной горизонтальной адвекцией, где формируются локальные турбулентные структуры. Тем не менее, даже в этих условиях погрешность остаётся в пределах, приемлемых для практического применения метода.

Полученные результаты подтверждают возможность использования разработанного подхода для оценки пространственно неоднородных потоков ПГ в природных экосистемах, где применение традиционных микрометеорологических методов затруднено. Алгоритм может быть использован при мониторинге потоков CO_2 и других парниковых газов на карбоновых полигонах, а также при дистанционных исследованиях с применением беспилотных летательных аппаратов.

В дальнейшем планируется адаптация алгоритма для многоуровневых измерений концентраций ПГ и интеграция с региональными моделями атмосферного переноса. Это позволит расширить масштаб применения метода, повысить точность

оценки пространственно-временной изменчивости углеродного обмена и обеспечить более полное понимание роли экосистем в региональном углеродном балансе.

Литература

1. Елизарова Т.Г. Квазигазодинамические уравнения и методы расчета вязких течений. М.: Научный мир, 2007. – 351 с.
2. Керимов И.А., Эльжаев А.С., Додуев А.А. Геофизические исследования на карбоновом полигоне Чеченской республики. // *Геология и геофизика Юга России*. – 2023. – Т. 13. № 3. – С. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004.
3. 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. – Т. 13. № 4. – 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012.
4. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer: Dordrecht, The Netherlands, 2012. – p. 438.
5. Baldocchi D., Falge E., Gu L. et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. // *Bulletin of the American Meteorological Society*. – 2001. – Vol. 82. Issue 11. – pp. 2415–2434.
6. 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. – Vol. 95. – pp. 61–76.
7. Bolek A., Heimann M., Gockede M. UAV-based in situ measurements of CO₂ and CH₄ fluxes over complex natural ecosystems. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2024 – Vol. 17. – pp. 5619–5636. DOI: 10.5194/amt-17-5619-2024.
8. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln- Nebraska: LI-COR Biosciences, 2013. – 354 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.4247.8561.
9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D. et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148. Issue 1. – pp. 12–24.
10. 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. / Eds. H.-O. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. et al. – Cambridge: Cambridge University Press, 2022. – 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
11. Jagermeyr J., Gerten D., Lucht W., Hostert P., Migliavacca M., Nemani R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. // *Global Change Biology*. – 2014. – Vol. 20. Issue 4. – pp. 1191–1210.
12. Jin Z., Tian X., Wang Y., Zhang H., Zhao M., Wang T., Ding J., Piao S. A global surface CO₂ flux dataset (2015–2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system. // *Earth System Science Data*. – 2024. – Vol. 16. Issue 6. – pp. 2857–2876. DOI: 10.5194/essd-16-2857-2024.
13. Junttila S., Kelly J., Kljun N. et al. Upscaling northern peatland CO₂ fluxes using satellite remote sensing data. // *Remote Sensing*. – 2021. – Vol. 13. – Art. No. 818. DOI: 10.3390/rs13040818.
14. 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. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2020. – Vol. 13. – pp. 1671–1692. DOI: 10.5194/amt-13-1671-2020.
15. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2008. – Vol. 148. – pp. 1777–1797.

16. Maksyutov S., Oda T., Saito M. et al. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO₂ fluxes based on the NIES-TM-FLEXPART coupled transport model and its adjoint. // *Atmospheric Chemistry and Physics*. – 2021. – Vol. 21. – pp. 1245–1266. DOI: 10.5194/acp-21-1245-2021.
17. Mukhartova I., Sogachev A., Gibadullin R., Pridacha V., Kerimov I., Olchev A. An Inverse Modeling approach for retrieving high-resolution surface fluxes of greenhouse gases from measurements of their concentrations in the atmospheric boundary layer. // *Remote Sensing*. – 2024 – Vol. 16. – Art. No. 2502. DOI: 10.3390/rs16132502.
18. Nocedal J., Oztoprak F. Waltz R.A. An interior point method for nonlinear programming with infeasibility detection capability. // *Optimization Methods and Software*. – 2014. – Vol. 29. – pp. 837–854.
19. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. // *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. – 2025. – Vol. 61. (Suppl 1). – pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166.
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkkinen K., Vesala T. et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. // *Agricultural and Forest Meteorology*. – 2004. – Vol. 123. – pp. 159–176.
21. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K. et al. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. // *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2021. – Vol. 14. – pp. 153–172. DOI: 10.5194/amt-14-153-2021.
22. Shaw J.T., Shah A., Yong H., Alle G. Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: A review. // *Philosophical Transactions A*. – 2021. – Vol. 379. – pp. 1–21. DOI: 10.1098/rsta.2020.0450.
23. Villarreal S., Vargas R. Representativeness of FLUXNET sites across Latin America. // *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. – 2021. – Vol. 126. – pp. 1–18. DOI: 10.1029/2020JG006090.

References

1. Elizarova T.G. Quasi-gas dynamic equations and methods for calculating viscous flows. Moscow. Nauchnyi Mir. 2007. 351 p. (In Russ.)
2. Kerimov I.A., Elzhaev A.S., Doduev A.A. Geophysical research on the carbon polygon on the Chechen Republic. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 3. pp. 49–62. DOI: 10.46698/VNC.2023.42.75.004. (In Russ.)
3. Mukhartova I.V., Gibadullin R.R., Olchev A.V., Kerimov I.A. Modeling approach for retrieving vertical greenhouse gas fluxes over non-uniform areas. *Geology and Geophysics of Russian South*. 2023. Vol. 13. No. 4. pp. 149–161. DOI: 10.46698/VNC.2023.68.39.012. (In Russ.)
4. Aubinet M., Vesala T., Papale D. Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis. Springer. Dordrecht, The Netherlands. 2012. p. 438.
5. Baldocchi D., Falge E., Gu L. et al. FLUXNET: A new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 2001. Vol. 82. Issue 11. pp. 2415–2434.
6. 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. Vol. 95. pp. 61–76.
7. Bolek A., Heimann M., Gockede M. UAV-based in situ measurements of CO₂ and CH₄ fluxes over complex natural ecosystems. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2024 Vol. 17. pp. 5619–5636. DOI: 10.5194/amt-17-5619-2024.
8. Burba G. Eddy covariance method for scientific, industrial, agricultural and regulatory applications: A field book on measuring ecosystem gas exchange and areal emission rates. Lincoln- Nebraska: LI-COR Biosciences. 2013. 354 p. DOI: 10.13140/RG.2.1.4247.8561.

9. Feigenwinter C., Bernhofer C., Eichelmann U., Heinesch B., Hertel M., Janous D. et al. Comparison of horizontal and vertical advective CO₂ fluxes at three forest sites. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148. Issue 1. pp. 12–24.
10. 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. Eds. H.-O. Portner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegria, M. et al. Cambridge. Cambridge University Press. 2022. 3056 p. DOI: 10.1017/9781009325844.
11. Jagermeyr J., Gerten D., Lucht W., Hostert P., Migliavacca M., Nemani R. A high-resolution approach to estimating ecosystem respiration at continental scales using operational satellite data. *Global Change Biology*. 2014. Vol. 20. Issue 4. pp. 1191–1210.
12. Jin Z., Tian X., Wang Y., Zhang H., Zhao M., Wang T., Ding J., Piao S. A global surface CO₂ flux dataset (2015–2022) inferred from OCO-2 retrievals using the GONGGA inversion system. *Earth System Science Data*. 2024. Vol. 16. Issue 6. pp. 2857–2876. DOI: 10.5194/essd-16-2857-2024.
13. Junttila S., Kelly J., Kljun N. et al. Upscaling northern peatland CO₂ fluxes using satellite remote sensing data. *Remote Sensing*. 2021. Vol. 13. Art. No. 818. DOI: 10.3390/rs13040818.
14. 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. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2020. Vol. 13. pp. 1671–1692. DOI: 10.5194/amt-13-1671-2020.
15. Leuning R., Zegelin S.J., Jones K., Keith H., Hughes D. Measurement of horizontal and vertical advection of CO₂ within a forest canopy. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2008. Vol. 148. pp. 1777–1797.
16. Maksyutov S., Oda T., Saito M. et al. Technical note: A high-resolution inverse modelling technique for estimating surface CO₂ fluxes based on the NIES-TM–FLEXPART coupled transport model and its adjoint. *Atmospheric Chemistry and Physics*. 2021. Vol. 21. pp. 1245–1266. DOI: 10.5194/acp-21-1245-2021.
17. Mukhartova I., Sogachev A., Gibadullin R., Pridacha V., Kerimov I., Olchev A. An Inverse Modeling approach for retrieving high-resolution surface fluxes of greenhouse gases from measurements of their concentrations in the atmospheric boundary layer. *Remote Sensing*. 2024 Vol. 16. Art. No. 2502. DOI: 10.3390/rs16132502.
18. Nocedal J., Oztoprak F. Waltz R.A. An interior point method for nonlinear programming with infeasibility detection capability. *Optimization Methods and Software*. 2014. Vol. 29. pp. 837–854.
19. Olchev A.V. Estimation of carbon dioxide and methane emissions and absorption by land and ocean surfaces in the 21st century. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*. 2025. Vol. 61. (Suppl 1). pp. S74–S100. DOI: 10.1134/S0001433825701166.
20. Pumpanen J., Kolari P., Ilvesniemi H., Minkinen K., Vesala T. et al. Comparison of different chamber techniques for measuring soil CO₂ efflux. *Agricultural and Forest Meteorology*. 2004. Vol. 123. pp. 159–176.
21. Reuter M., Bovensmann H., Buchwitz M., Borchardt J., Krautwurst S., Gerilowski K. et al. Development of a small unmanned aircraft system to derive CO₂ emissions of anthropogenic point sources. *Atmospheric Measurement Techniques*. 2021. Vol. 14. pp. 153–172. DOI: 10.5194/amt-14-153-2021.
22. Shaw J.T., Shah A., Yong H., Alle G. Methods for quantifying methane emissions using unmanned aerial vehicles: A review. *Philosophical Transactions A*. 2021. Vol. 379. pp. 1–21. DOI: 10.1098/rsta.2020.0450.
23. Villarreal S., Vargas R. Representativeness of FLUXNET sites across Latin America. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 2021. Vol. 126. pp. 1–18. DOI: 10.1029/2020JG006090.