

Лидарная система для измерения содержания углекислого газа в городских условиях

С.А. Садовников, Н.С. Кравцова[✉], М.П. Герасимова,
М.Ю. Аршинов, С.В. Яковлев*

*Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН
634055, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1*

Поступила в редакцию 10.03.2025;
после доработки 03.04.2025;
принята к печати 04.04.2025

Углекислый газ (CO_2) является одним из основных парниковых газов, изучение влияния которого на атмосферу в глобальном и региональном масштабах носит актуальный характер. Развитие технических средств дистанционного газоанализа атмосферы связано с разработкой новых и модернизацией существующих лидарных технологий зондирования. В настоящей работе представлены результаты разработки импульсной лидарной системы дифференциального поглощения для зондирования CO_2 в ближней ИК-области спектра (~ 2 мкм) на горизонтальных трассах в атмосфере. Описаны комплектация и техническое исполнение составных частей лидара, характеристики лидарной системы. Приведены данные лидарных измерений временного хода концентрации CO_2 в г. Томске в зимний период на выбранной трассе зондирования с использованием топографической мишени (лесополоса). Восстановлены концентрации CO_2 в диапазоне 435,2–445,1 ppm, соответствующие фоновому состоянию атмосферы. Для подтверждения корректности лидарных данных проведены синхронные измерения концентрации CO_2 с использованием мобильного газоанализатора; погрешность лидарных измерений составляет 1,3%. Результаты работы могут быть полезны при проектировании, изготовлении и модернизации импульсных лидарных систем ИК-диапазона для дистанционного зондирования CO_2 , а также других атмосферных газов.

Ключевые слова: лидар, углекислый газ, атмосфера, дифференциальное поглощение, дистанционное зондирование; lidar, carbon dioxide, atmosphere, differential absorption, remote sensing.

Введение

Контроль за состоянием атмосферы является важной задачей в эпоху глобального потепления. Основное внимание уделяется парниковым газам в атмосфере, а именно мониторингу пространственного распределения и/или временного хода их концентраций. Временной ход позволяет выделить пиковые нагрузки на атмосферу в течение суток и выявить основные антропогенные причины флуктуации их значений.

Углекислый газ (CO_2) — один из основных газовых компонентов атмосферы, вносящих вклад в парниковый эффект. Наиболее интенсивные линии поглощения CO_2 находятся в ближней и средней ИК-областях спектра [1], поэтому актуальны разра-

ботка и модернизация лидарных систем, использующих в передающей части лазерное излучение данных спектральных диапазонов.

В настоящее время наиболее развитым направлением мониторинга парниковых газов (в частности, CO_2) является дистанционное зондирование с помощью лидарных методов и технологий [2, 3], которые имеют некоторые преимущества перед спутниковыми (низкое пространственное разрешение) и *in situ* (только в локальных точках) измерениями при решении частных задач газоанализа. Средства дистанционного зондирования позволяют получать данные о распределении и усредненных значениях газов вдоль всей исследуемой трассы зондирования, а не в локальной точке, как в случае газоанализаторов. Зондирование CO_2 осуществляется методом дифференциального поглощения (Differential Absorption Lidar — DIAL) и трассовым методом (Integrated Path Differential Absorption — IPDA).

В работах [4, 5] представлены результаты создания многочастотной дифференциальной абсорбционной системы DIAL/IPDA для дистанционного зондирования CO_2 и H_2O вблизи 1,6 мкм. В То-

* Сергей Александрович Садовников (sadsa@iao.ru); Наталья Сергеевна Кравцова (kravtsova@iao.ru); Марианна Петровна Герасимова (gmrp@iao.ru); Михаил Юрьевич Аршинов (michael@iao.ru); Семён Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

кийском столичном университете создан наземный лидар дифференциального поглощения ($\lambda = 1,6$ мкм) [6] и проведены экспериментальные исследования по измерению вертикальных профилей CO_2 .

В статье [7] авторы сообщают о возможностях DIAL/IPDA-лидара ($\lambda = 2050,9718$ и $2050,8884$ нм) для дистанционного зондирования CO_2 в атмосфере. При частоте повторения импульсов 30 Гц, ширине линий генерации 60 МГц, энергии в импульсах на уровне 8 мДж авторам удалось восстановить концентрацию CO_2 в атмосфере на трассе длиной 0,9 км на уровне 404 ± 5 ppm. В публикациях [8, 9] сообщается о разработке бортовой двухимпульсной IPDA-лидарной системы для мониторинга CO_2 в атмосфере ($\lambda = 1572,024$ нм — on-line, $1572,085$ нм — off-line).

В Национальной физической лаборатории (Теддингтон, Англия) создан наземный DIAL-лидар для точной количественной оценки выбросов CO_2 на длине волны ~ 2 мкм [10]. При частоте повторения импульсов 10 Гц, ширине линии $0,297 \text{ см}^{-1}$, энергии в импульсе 15–20 мДж в режиме DIAL на расстоянии до 350 м удалось оценить выбросы CO_2 на терминале приема сжиженного природного газа в объеме 50 т/ч. В статье [11] представлен IPDA-лидар для мониторинга концентрации CO_2 ($\lambda = 1572$ нм) с точностью 5% (а также концентраций H_2O на $\lambda = 1544$ нм с точностью 3%). В NASA Langley Research Center разработан и прошел испытания импульсный лидар самолетного базирования для прецизионных измерений атмосферного CO_2 на $\lambda = 2050,9670$ нм. При измерении CO_2 в режиме IPDA исследуемая концентрация составила $405,22 \text{ ppm} \pm 1,02\%$ [12–14]. Создана DIAL-система ($\lambda = 1571,9$ нм) для мониторинга повышенных концентраций CO_2 близ антропогенного источника выбросов [15]. Концентрация CO_2 , измеренная с его помощью, находилась в диапазоне 420–530 ppm, при этом отклонение относительно газоанализатора Picarro достигало ~ 100 ppm.

В ИОА СО РАН успешно разрабатываются и модернизируются лидарные системы для контроля параметров атмосферы [16–21]. Также сформирована научная группа, занимающаяся исследованиями в области газоанализа атмосферы, в частности созданием и модернизацией лидарных технических средств зондирования газов естественного и антропогенного происхождения [22–25].

Цель настоящей работы — создание лидарной системы для IPDA-зондирования CO_2 и ее апробация для измерения временного хода концентраций целевого газа на приземной горизонтальной трассе зондирования. Представлены внешний вид и технические характеристики IPDA-системы, а также результаты натурных измерений концентрации CO_2 в городской среде в климатических условиях, соответствующих зиме средних широт.

Материалы и методы

Работа лидарной системы основана на IPDA-методе, который использует импульсное лазерное излучение на двух длинах волн. Одна из них близка к центру линии поглощения исследуемого газа (on-line), а другая находится вне линии поглощения (off-line) и используется в качестве опорной [26]. Измеряя разницу между зарегистрированными лидарными сигналами, прошедшими через атмосферу и отраженными/рассеянными от топографических мишеней, можно восстановить концентрацию газа вдоль пути распространения лазерного луча. Для исключения влияния альbedo отражающих/рассеивающих топоцелей, дрейфа коэффициента аэрозольного рассеяния и мешающего поглощения на результаты измерений подбираются наиболее близкие длины волны зондирования. Оптимальным является одновременная отправка on-line и off-line импульсов вдоль исследуемых трасс, однако и последовательная генерация тоже может применяться при соблюдении условия заморозенности атмосферы (временной промежуток между импульсами должен составлять не более 1 мс) [13].

Для снижения влияния флуктуаций температуры и давления на корректность результатов восстановления концентрации исследуемого газа необходимо проводить предварительный подбор и анализ пригодности линий поглощения для задач дистанционного зондирования с учетом их отклика на изменение данных параметров атмосферы. Такая работа была успешно проведена в [25]. Численная оценка диапазона чувствительности зондирования CO_2 (от 402 ppm) выполнена в более ранних работах [23, 25]. Верхний порог концентрации зависит от дальности зондирования и в различных сценариях наблюдения существенно варьируется.

Лидар (рис. 1) разработан на основе биаксиальной схемы зондирования и состоит из передающей (1, 2, 3) и приемной (4, 5) частей, системы управления, регистрации и обработки (6, 7). Передающая часть включает в себя параметрический генератор света [27], юстировочный лазер 650 нм [28], зеркальный коллиматор, разработанный в ИОА СО РАН, оптические и оптомеханические элементы Thorlabs [28]. Параметрический генератор света (ПГС) настроен на on- и off-line длины волн зондирования CO_2 , осуществляет генерацию и одновременную отправку двух лазерных импульсов в атмосферу. С помощью плоскопараллельной пластины излучение юстировочного лазера направлялось соосно инфракрасному и распространялось в направлении зеркального коллиматора. Излучение на длинах волн on- и off-line распространяется под углом $\sim 1^\circ$. Для устранения расхождения пучков применялись два D-образных зеркала.

Оптическая схема и внешний вид передающей части лидарной системы представлены на рис. 2.



Рис. 1. Лидарная система: 1 – ПГС; 2 – оптические, оптомеханические элементы и юстировочный лазер Thorlabs, расположенные на общем основании соосно с выходным излучением ПГС; 3 – зеркальный коллиматор; 4 – приемный телескоп; 5 – оптические и оптомеханические элементы и фотодетекторы Thorlabs; 6 – USB-осциллографы для регистрации лидарных и опорных сигналов; 7 – персональный компьютер (см. цветные рисунки на сайте <http://iao.ru/ru/content/vol.38-2025/iss.5>)

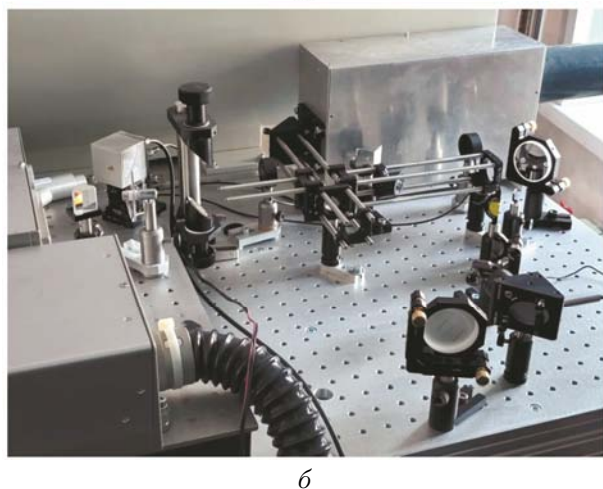
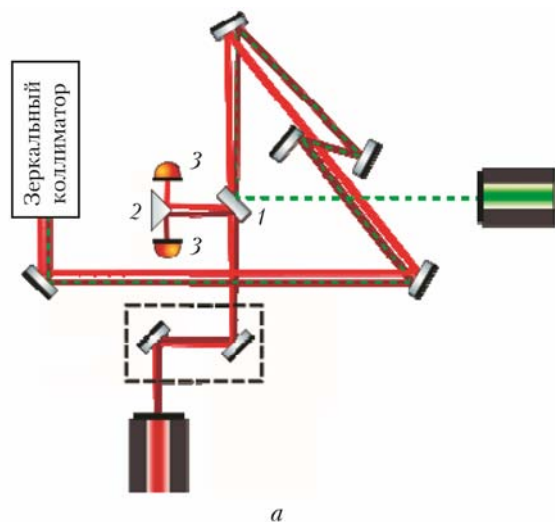


Рис. 2. Оптическая схема (а) (1 – плоскопараллельная пластина; 2 – треугольная призма; 3 – два измерителя энергии) и внешний вид (б) передающей части лидарной системы

Для обеспечения возможности функционирования лидарной системы в режиме IPDA оптическая схема передающего блока была дополнена плоскопараллельной пластиной 1, треугольной призмой с зеркальным напылением 2 и двумя измерителями энергии 3.

Приемная часть состоит из приемного телескопа Мерсенна ($D = 300$ мм), оптических и оптомеханических элементов Thorlabs и фотодетекторов Thorlabs (таблица). Каркасное исполнение оптомеханики Thorlabs позволяет достаточно быстро установить соосность обратнорассеянного излучения на пути «выходное отверстие телескопа – чувствительная площадка фотодетектора».

Характеристики лидарной системы

Параметр	Значение
<i>Передающая часть</i>	
Энергия в импульсе, мДж	≤ 14
Частота повторения импульсов, Гц	10
Ширина линии генерации, см ⁻¹	4,40–5,34
Диапазон перестройки, мкм	1,77–2,26
Длина волны (on-, off-line) зондирования CO ₂ , мкм	~ 2
Длительность импульса, нс	16
<i>Приемная часть</i>	
Телескоп	Мерсенн ($D = 300$ мм)
Рабочий диапазон фотодетектора, нм	900–2600
Диаметр фоточувствительной площадки, мм	0,5
Эквивалентная мощность шума фотодетектора (NEP), Вт/Гц ^{1/2}	10^{-12}
Ширина полосы пропускания интерференционных фильтров (FWHM), нм	10
Ширина полосы пропускания полосового фильтра (FWHM), нм	500
<i>Системы управления, регистрации и обработки</i>	
Рабочий диапазон пироэлектрических измерительных головок энергии, мкм	0,185–25
<i>USB-осциллограф для регистрации лидарных сигналов Acute TS3124H</i>	
Количество каналов	4
Полоса пропускания, МГц	200
Разрешение, бит	16
<i>USB-осциллограф для регистрации опорных сигналов Acute TS2202E</i>	
Количество каналов	2
Полоса пропускания, МГц	200
Разрешение, бит	8

Система управления, регистрации и обработки включает в себя USB-осциллограф для регистрации лидарных сигналов Acute TS3124H [29], USB-осциллограф для регистрации опорных сигналов Acute TS2202E [29], разработанное программное обеспечение для накопления, обработки лидарных сигналов, восстановления концентрации целевых газов и персональный компьютер (ноутбук). Внешний вид приемной части лидарной системы и технические элементы системы управления, регистрации и обработки представлены на рис. 3.

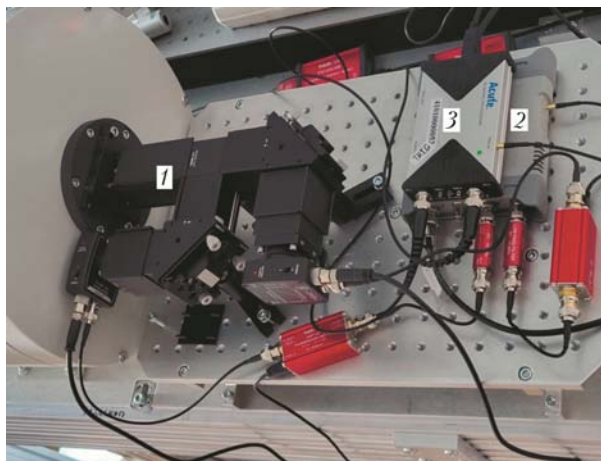


Рис. 3. Приемная часть лидарной системы и технические элементы систем управления, регистрации и обработки: 1 – оптические и оптомеханические элементы Thorlabs и фотодетекторы Thorlabs; 2 – USB-осциллограф для регистрации лидарных сигналов; 3 – USB-осциллограф для регистрации опорных сигналов

Системы управления, регистрации и обработки визуализируют в режиме реального времени лидарные сигналы и позволяют записывать данные с USB-осциллографов. Лидарные сигналы синхронно накапливаются с использованием разработанного программного обеспечения. Это позволяет записывать данные как в импульсном режиме, так и с усреднением с временным разрешением от секунд до минут.

Результаты и обсуждение

27 февраля 2025 г. проведены натурные испытания IPDA-лидарной системы в эксперименте по регистрации временного хода концентрации CO_2 . Лидар расположен в городской черте (56,476090° с.ш.; 85,046248° в.д.) на территории ИОА СО РАН. Городские условия подразумевают изменчивый массив застройки, включающий в себя здания, лесополосы, автомагистрали и объекты городской промышленной инфраструктуры. В качестве топографической мишени выступает лесополоса, расположенная на пути распространения лазерного излучения на расстоянии $R \sim 250$ м (рис. 4). За лесополосой располагается источник антропогенных выбросов (теплоэлектроцентральный).

Лидар работает по классическому IPDA-методу дифференциального поглощения (отправляет в атмосферу лазерные импульсы мощностью P_{on} , P_{off} на длинах волн зондирования λ_{on} , λ_{off} , регистрирует обратнорассеянный от топографической мишени сигнал и программно восстанавливает концентрацию CO_2 на выбранной трассе зондирования).

С целью проверки корректности функционирования лидара измерения проводились совместно с мобильным газоанализатором G4301 (Picarro Inc., США) [30], который располагался стационарно на трассе. Данные по состоянию атмосферы на момент измерений взяты с TOR-станции ИОА СО РАН [31]:

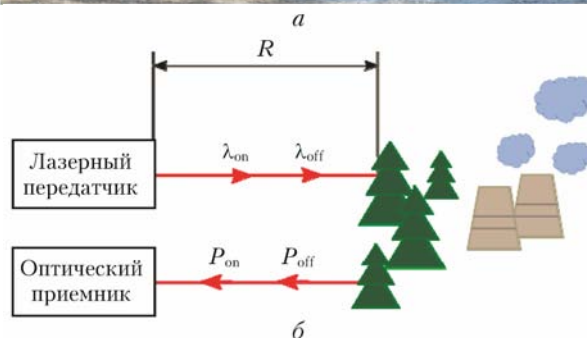


Рис. 4. Вид трассы зондирования (а) и схема проведения измерений (б)

температура -10°C , влажность 60%, скорость ветра 3 м/с, направление ветра 50° , давление 748,5 мм рт.ст. Временной интервал измерений и записи лидарных сигналов 20 мин. Лидарные сигналы регистрировались с пространственным разрешением 1,5 м.

Из лидарных сигналов восстановлена концентрация CO_2 , которая варьируется в диапазоне значений 435,2–445,1 ppm для выбранного временного интервала измерений 14:55–15:15 по томскому времени. Мобильный газоанализатор зарегистрировал изменение концентрации CO_2 с 436,1 до 439,3 ppm. Результаты восстановления концентрации CO_2 в сравнении с синхронными измерениями мобильным газоанализатором приведены на рис. 5. Пунктирными кривыми на рис. 5 показаны максимальные и минимальные значения восстанавливаемой из лидарных сигналов концентрации CO_2 до их обработки методом скользящего среднего.

Результаты, представленные на рис. 5, говорят о достаточном соответствии лидарных данных локальным *in situ* измерениями концентрации CO_2 (отклонение лидарных измерений от локальных измерений мобильным газоанализатором составило 1,3%). Имеется возможность увеличения дальности зондирования CO_2 в атмосфере при корректировке направления лазерного излучения и соблюдения

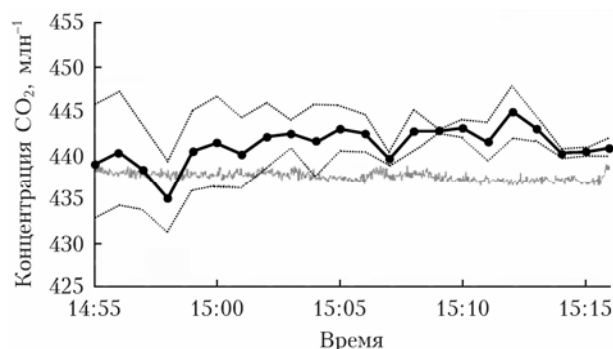


Рис. 5. Концентрация CO_2 : восстановленная из лидарных сигналов (черная кривая) и измеренная с использованием мобильного газоанализатора G4301 (Picarro Inc., США) (серая кривая) 27.02.2025 г.

соосности между приемной и передающей частями лидара. Также сделан предварительный вывод о том, что лидарная система готова для работы в режиме мониторинга атмосферы.

Заключение

Разработана лидарная система с характеристиками на уровне аналогов для измерения концентрации CO_2 на длине волны 2 мкм в приземном слое атмосферы на горизонтальных трассах. Описано ее техническое наполнение, которое включает в себя как коммерчески доступное оборудование и комплектующие, так специально изготовленные компоненты. Проведены одновременные измерения временного хода концентрации CO_2 двумя разными способами (лидарные и локальные) на трассе зондирования 250 м. Концентрация CO_2 по данным лидарных измерений варьируется в диапазоне ее фоновых значений 435,2–445,1 ppm. Ошибка лидарных данных относительно локальных измерений мобильным газоанализатором составляет 1,3%. Таким образом, подтверждена работоспособность разработанной лидарной системы и возможность ее использования в режиме непрерывного мониторинга фоновых и надфоновых значений концентраций CO_2 в городских условиях близ источников антропогенного воздействия на окружающую среду.

Благодарности. Авторы выражают благодарность сотрудникам ИОА СО РАН О.А. Рынкову, К.А. Рынкову и сотрудникам лаборатории климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН.

Финансирование. Исследование выполнено при поддержке РНФ (№ 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>).

Список литературы

- Gordon I.E., Rothman L.S., Hargreaves R.J., Hashemi R., Karlovets E.V., Skinner F.M., Conway E.K., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Wcislo P., Finenko A.A., Nelson K., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Coustenis A., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gamache R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Mlawer E.J., Nikitin A.V., Perevalov V.I., Rotger M., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Adkins E.M., Baker A., Barbe A., Canu E., Császár A.G., Dudaryonok A., Egorov O., Fleischer A.J., Fleurbaey H., Foltynowicz A., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Horneman V.-M., Huang X., Karman T., Karns J., Kassi S., Kleiner I., Kofman V., Kwabia-Tchana F., Lavrentieva N.N., Lee T.J., Long D.A., Lukashevskaya A.A., Lyulin O.M., Makhnev V.Yu., Matt W., Massie S.T., Melosso M., Mikhailenko S.N., Mondelain D., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Perrin A., Polyansky O.L., Raddaoui E., Raston P.L., Reed Z.D., Rey M., Richard C., Tóbiás R., Sadiq I., Schwenke D.W., Starikova E., Sung K., Tamassia F., Tashkun S.A., Vander Auwera J., Vasilenko I.A., Vigasin A.A., Villanueva G.L., Vispoel B., Wagner G., Yachmenev A., Yurchenko S.N. The HITRAN2020 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2022. V. 277. P. 107949. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2021.107949.

- Li J., Yu Z., Du Z., Ji Y., Liu C. Standoff chemical detection using laser absorption spectroscopy: A review // *Remote Sens.* 2020. V. 12, N 17. P. 2771. DOI: 10.3390/rs12172771.
- Романовский О.А., Яковлев С.В., Садовников С.А., Невзоров А.А., Невзоров А.В., Харченко О.В., Кравцова Н.С., Кустенев Ю.В. Наземные стационарные лидары дифференциального поглощения для мониторинга парниковых газов в атмосфере // *Оптика атмосф. и океана.* 2025. Т. 38, № 1. С. 72–84. DOI: 10.15372/AOO20250109.
- Wagner G.A., Plusquellic D.F. Ground-based, integrated path differential absorption LIDAR measurement of CO_2 , CH_4 , and H_2O near 1.6 μm // *Appl. Opt.* 2016. V. 55, N 23. P. 6292–6310. DOI: 10.1364/AO.55.006292.
- Wagner G.A., Plusquellic D.F. Multi-frequency differential absorption LIDAR system for remote sensing of CO_2 and H_2O near 1.6 μm // *Opt. Express.* 2018. V. 26, N 15. P. 19420–19434 (2018) DOI: 10.1364/OE.26.01.9420.
- Shibata Y., Nagasawa C., Abo M. Development of 1.6 μm DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO_2 concentration profiles // *Appl. Opt.* 2017. V. 56. P. 1194–1201. DOI: 10.1364/AO.56.001194.
- Mammez C.D., Dherbecourt J.-B., Gorju G., Pelon J., Melkonian J.-M., Godard A., Raybaut M. Atmospheric boundary layer CO_2 remote sensing with a direct detection LIDAR instrument based on a widely tunable optical parametric source // *Opt. Lett.* 2017. V. 42. P. 4044–4047. DOI: 10.1364/OL.42.004044.
- Zhu Y., Yang J., Chen X., Zhu X., Zhang J., Li S., Sun Y., Hou X., Bi D., Bu L., Zhang Y., Liu J., Chen W. Airborne validation experiment of 1.57 μm double-pulse IPDA LIDAR for atmospheric carbon dioxide measurement // *Remote Sens.* 2020. V. 12. 1999. DOI: 10.3390/rs12121999.
- Wang Q., Mustafa F., Bu L., Yang J., Fan C., Liu J., Chen W. Monitoring of atmospheric carbon dioxide over a desert site using airborne and ground measurements // *Remote Sens.* 2022. V. 14. P. 5224. DOI: 10.3390/rs14205224.
- Howes N., Innocenti F., Finlayson A., Dimopoulos C., Robinson R., Gardiner T. Remote measurements of industrial CO_2 emissions using a ground-based differential absorption lidar in the 2 μm wavelength region // *Remote Sens.* 2023. V. 15. P. 5403. DOI: 10.3390/rs15225403.
- Rosas W.P., Cézard N. Greenhouse gas monitoring using an IPDA lidar based on a dual-comb spectrometer // *Opt. Express.* 2024. V. 32, N 8. P. 13614–13627. DOI: 10.1364/OE.515543.

12. Refaat T.F., Singh U.N., Yu J., Petros M., Remus R., Ismail S. Double-pulse 2- μ m integrated path differential absorption lidar airborne validation for atmospheric carbon dioxide measurement // Appl. Opt. 2016. V. 55, N 15. P. 4232–4246. DOI: 10.1364/AO.55.004232.
13. Refaat T.F., Petros M., Antill C.W., Singh U.N., Choi Y., Plant J.V., Digangi J.P., Noe A. Airborne testing of 2- μ m pulsed ipda lidar for active remote sensing of atmospheric carbon dioxide // Atmosphere. 2021. V. 12. P. 412. DOI: 10.3390/atmos12030412.
14. Refaat T.F., Singh U.N. Carbon dioxide active remote sensing using pulsed 2- μ m lidar // Space-based Lidar Remote Sensing Techniques and Emerging Technologies. Springer Cham, 2024. P. 73–86. DOI: 10.1007/978-3-031-53618-2_7.
15. Stroud J.R., Dienstfrey W.J., Plusquellic D.F. Study on local power plant emissions using multi-frequency differential absorption LIDAR and real-time plume tracking // Remote Sens. 2023. V. 15. P. 4283. DOI: 10.3390/rs15174283.
16. Коханенко Г.П., Балин Ю.С., Боровой А.Г., Новоселов М.М. Исследования ориентации кристаллических частиц в ледяных облаках сканирующим лидаром // Оптика атмосфер. и океана. 2022. Т. 35, № 4. С. 319–325. DOI: 10.15372/AOO20220412; Kokhanenko G.P., Balin Yu.S., Borovoi A.G., Novoselov M.M. Studies of the orientation of crystalline particles in ice clouds by a scanning lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2022. V. 35, N 5. P. 509–516.
17. Nasonov S., Balin Y., Klemasheva M., Kokhanenko G., Novoselov M., Penner I. Study of atmospheric aerosol in the Baikal Mountain Basin with shipborne and ground-based lidars // Remote Sens. 2023. V. 15. P. 3816. DOI: 10.3390/rs15153816.
18. Бобровников С.М., Жарков В.И., Зайцев Н.Г., Трифонов Д.А. Применение комбинированного метода фоторегистрации в лидарных измерениях температуры атмосферы на главном зеркале Сибирской лидарной станции // Оптика атмосфер. и океана. 2023. Т. 36, № 10. С. 839–845. DOI: 10.15372/AOO20231008; Bobrovnikov S.M., Zharkov V.I., Zaitcev N.G., Trifonov D.A. Combined lidar signal registration technique for atmospheric temperature measurements with the primary mirror of the Siberian lidar station // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 1. P. 24–30.
19. Nevzorov A.A., Nevzorov A.V., Kharchenko O., Romanovskii Y.O. Lidar complex for control of the ozone-sphere over Tomsk, Russia // Atmosphere. 2024. V. 15. P. 622. DOI: 10.3390/atmos15060622.
20. Разенков И.А. Зондирование волн Кельвина–Гельмгольца турбулентным лидаром. II. Лидар УОР-5 // Оптика атмосфер. и океана. 2024. Т. 37, № 1. С. 61–72. DOI: 10.15372/AOO20240108; Razenkov I.A. Sounding of Kelvin–Helmholtz waves by a turbulent lidar: II—BSE-5 Lidar // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 2. P. 220–231.
21. Разенков И.А., Белан Б.Д., Михальчишин А.В., Ивлев Г.А. Применение турбулентного лидара для обеспечения авиационной безопасности // Оптика атмосфер. и океана. 2024. Т. 37, № 5. С. 393–402. DOI: 10.15372/AOO20240506; Razenkov I.A., Belan B.D., Mikhal'chishin A.V., Ivlev G.A. The use of the turbulent lidar for aviation safety // Atmos. Ocean. Opt. 2024. V. 37, N 4. P. 492–501.
22. Yakovlev S.V., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Kravtsova N.S. Remote sensing of atmospheric methane with IR OPO lidar system // Atmosphere. 2020. V. 11, N 1. P. 70. DOI: 10.3390/atmos11010070.
23. Садовников С.А., Романовский О.А., Яковлев С.В., Харченко О.В., Кравцова Н.С. Калибровка и полевые испытания мобильного ИК-лидара дифференциального поглощения для дистанционного зондирования метана в атмосфере // Опт. журн. 2022. Т. 89, № 6. С. 15–24. DOI: 10.17586/1023-5086-2022-89-06-15-24.
24. Yakovlev S.V., Sadovnikov S.A., Romanovskii O.A., Gerasimova M.P., Kravtsova N.S. Transceiving telescope for a mobile TDLAS system for remote sounding of anthropogenic methane // Opt. Laser Eng. 2024. V. 183. P. 108535. DOI: 10.1016/j.optlaseng.2024.108535.
25. Sadovnikov S.A., Yakovlev S.V., Kravtsova N.S., Romanovskii O.A., Tuzhilkin D.A. Dual-channel infrared OPO lidar optical system for remote sensing of greenhouse gases in the atmosphere: Design and characteristics // Sens. Int. 2025. V. 6. P. 100307. DOI: 10.1016/j.sintl.2024.100307.
26. Межерис Р.М. Лазерное зондирование атмосферы. М.: Мир, 1987. 550 с.
27. Solar laser system. URL: <https://solar-laser.com/ru/> (last access: 07.03.2025).
28. Thorlabs. URL: <https://www.thorlabs.com/> (last access: 07.03.2025).
29. Acute. URL: <https://www.acute.com.tw/en> (last access: 07.03.2025).
30. Аршинов М.Ю., Белан Б.Д., Давыдов Д.К., Козлов А.В., Фофанов А.В., Аршинова В.Г. Исследование пространственного распределения CO₂ и CH₄ в приземном слое атмосферы Западной Сибири с использованием мобильной платформы // Оптика атмосфер. и океана. 2020. Т. 33, № 7. С. 544–552. DOI: 10.15372/AOO20200707; Arshinov M.Yu., Belan B.D., Davydov D.K., Kozlov A.V., Fofonov A.V., Arshinova V.G. Study of the spatial distributions of CO₂ and CH₄ in the surface air layer over Western Siberia using a mobile platform // Atmos. Ocean. Opt. 2020. V. 33, N 6. P. 661–670.
31. Лаборатория климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН. Томск, 2025. URL: <https://lop.iao.ru/RU/tor/gas/> (дата обращения: 07.03.2025).

S.A. Sadovnikov, N.S. Kravtsova, M.P. Gerasimova, M.Yu. Arshinov, S.V. Yakovlev. Lidar system for measuring carbon dioxide concentration in urban areas.

Carbon dioxide (CO₂) is one of the main greenhouse gases; the study of its effect on the atmosphere on global and regional scales is of current importance. The development of technical means for remote gas analysis of the atmosphere is associated with the development of new and modernization of existing lidar sensing technologies. The paper presents the results of the development of a 2- μ m pulsed differential absorption lidar system for sensing CO₂ along horizontal paths in the atmosphere. The configuration and design of the lidar components are shown. Technical characteristics of the lidar system are provided. The results of lidar measurements of the time variation in CO₂ concentration within the city of Tomsk in winter along a selected sensing path using a topographic target (forest belt) are presented. CO₂ concentrations in the range of 435.2–445.1 ppm, corresponding to the background state of the atmosphere, were retrieved from recorded lidar signals. To confirm the correctness of the lidar data, the CO₂ concentration was synchronously measured using a mobile gas analyzer. Analysis of the results shows that the error of lidar measurements of the CO₂ concentration is 1.3%. The results of the work can be useful in the design, manufacture, and modernization of pulsed IR lidar systems for remote sensing of CO₂ and other atmospheric gases.