

УДК 504.064.3

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-178-187

## Создание двухканальной лидарной системы дистанционного газоанализа атмосферы

*С. А. Садовников<sup>1</sup>✉, С. В. Яковлев<sup>1</sup>, Н. С. Кравцова<sup>1</sup>, Д. А. Тужилкин<sup>1</sup>, М. П. Герасимова<sup>1</sup>*

<sup>1</sup> Институт оптики атмосферы имени В. Е. Зуева СО РАН, г. Томск, Российская Федерация

e-mail: sadsa@iao.ru

**Аннотация.** На текущий момент одним из актуальных и бурно развивающихся направлений исследований является разработка систем дистанционного зондирования парниковых газов в атмосфере. Общеизвестна проблема влияния мешающего поглощения сторонних газов при восстановлении профиля концентрации целевой газовой составляющей. Цель исследования состоит в разработке двухканальной лидарной системы, обеспечивающей учет основного мешающего поглощения водяного пара при исследовании профилей концентрации углекислого газа. Для решения представленной цели предлагается использование одновременно трех методов дистанционного зондирования, а именно, метода дифференциального поглощения и рассеяния (ДПР) и трассовый метод, базирующийся на дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС). Представлены результаты разработки двухканальной инфракрасной лидарной системы для дистанционного зондирования парниковых газов в атмосфере. Экспериментально подтверждены характеристики основных узлов и элементов лидарной системы, подходящие для проведения работ по дистанционному газоанализу атмосферы. Проведены лабораторные эксперименты, моделирующие атмосферные измерения поглощения целевого газа (CO<sub>2</sub>) и тестовые натурные эксперименты, подтвердившие функциональность разработанной лидарной системы в атмосферных условиях. Разработанная система может быть использована при развитии измерительных комплексов карбоновых полигонов, для контроля газового состава атмосферы в промышленных центрах, на фоновых измерительных станциях и в районах болотных экосистем.

**Ключевые слова:** лидар, дифференциальное поглощение, ДОАС, атмосфера, углекислый газ, коллиматор, топографическая мишень

### Для цитирования:

*Садовников С. А., Яковлев С. В., Кравцова Н. С., Тужилкин Д. А., Герасимова М. П.* Создание двухканальной лидарной системы дистанционного газоанализа атмосферы // Вестник СГУГиТ. – 2024. – Т. 29, № 4. – С. 179–188. – DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-4-179-188

### Введение

На сегодняшний день лидары дифференциального поглощения и рассеяния получили наибольшее распространение среди систем дистанционного лазерного газоана-

лиза атмосферы [1–3]. Лазерные источники для подобных систем должны обеспечивать крайне высокую стабильность положения линий излучения относительно линий поглощения исследуемых газов и обладать до-

статочны узкими ширинами линий излучения.

Общеизвестная для систем данного класса проблема повышения ошибок восстановления концентраций целевых газов из-за мешающего поглощения сторонними газами решается либо тщательным подбором спектральных диапазонов зондирования (с разнесенными друг от друга линиями газов), либо использованием многоволновых или частотно-перестраиваемых лазеров, обеспечивающих учет поглощения сторонних газов.

В Институте оптики атмосферы им. В. Е. Зуева СО РАН (ИОА СО РАН) успешно разрабатываются и модернизируются лидары для исследования метеорологических параметров и газоанализа атмосферы [4–8].

Целью работы является разработка лидарной оптической системы комбинированного типа для одновременного измерения пространственно-разрешенных и усредненных вдоль трассы значений концентраций основных парниковых газов атмосферы ( $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ ) с использованием лазерного излучения параметрического генератора света в ближнем ИК-диапазоне спектра. Разработанный лидар может быть использован при развитии измерительных комплексов карбоновых полигонов, для контроля газового состава атмосферы в промышленных центрах, на фоновых измерительных станциях и в районах болотных экосистем.

#### ***Принцип функционирования двухканальной лидарной системы ИК- диапазона***

В рамках первого этапа выполнения исследовательского проекта [9] было проведено численное моделирование функции перекрытия лидарной системы, расчет которой является одним из первых этапов при проектировании и разработке лидарных систем, решающих задачи дистанционного газоанализа атмосферы. На основе полученных результатов определен предварительный элементный состав двухканальной лидарной оптической системы ИК-диапазона. В лидаре предполагается использование двух каналов регистрации: канала дифференциального поглощения

и рассеяния (ДПР) для восстановления пространственного распределения концентрации целевого газа и канала дифференциальной оптической абсорбционной спектроскопии (ДОАС) для восстановления усредненных значений концентраций газов.

Принцип работы системы заключается в следующем. Лазерный пучок расширяется зеркальным коллиматором и направляется в атмосферу к топоцели. Необходимость использования именно зеркального коллиматора возникает из-за крайне широкого диапазона длин волн генерации лазера с возможностью его перестройки. Вместе с тем, зеркальное исполнение требуется для обеспечения возможности проведения сравнительных измерений концентраций исследуемых газов в разных областях рассматриваемого спектрального диапазона. Для контроля выходной энергии в импульсе информативного излучения лидара в передающую часть включены два измерителя мощности / энергии. Для отвода излучения на измерители мощности / энергии используется плоскопараллельная пластина. Призма Волластона применяется для разделения излучения на разных длинах волн с ортогональной поляризацией. Лазерное излучение, направленное в атмосферу, по мере распространения вдоль исследуемой трассы претерпевает аэрозольное и молекулярное поглощение и рассеяние. Рассеянное в обратном направлении излучение собирается телескопом и в форме коллимированного пучка направляется в блок регистрации сигналов.

Для фокусировки обратно рассеянного излучения на чувствительную площадку фотодетекторов используются параболические зеркала с серебряным напылением. Применение параболических зеркал позволяет одинаково эффективно фокусировать эхо-сигналы во всем диапазоне генерации без внесения хроматических аберраций.

Регистрация лидарных сигналов и их последующая обработка обеспечивают возможность восстановления пространственного распределения и усредненных значений концентраций атмосферных газов вдоль трассы зондирования. Перестройка длины волны излучения лазерного источника мо-

жет обеспечить дистанционный контроль концентраций водяного пара и углекислого газа.

Использование ДОАС-канала с применением второго телескопа предназначено для восстановления интегральных значений концентрации исследуемого атмосферного газа на заданной трассе зондирования. Регистрация информативного излучения произ-

водится с помощью монохроматора / спектрографа M833 и линейчатого фотодетектора, для корректировки пространственно разрешенных профилей концентрации газа, восстановленных с использованием ДПР-канала регистрации.

Конструктивное исполнение разработанной лидарной системы представлено на рис. 1.

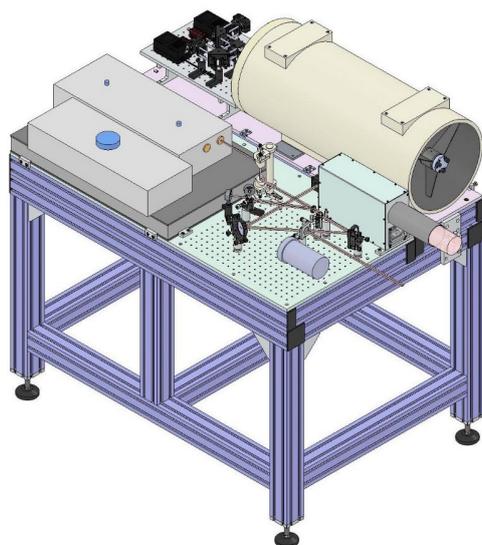


Рис. 1. Трехмерная модель лидарной системы

**Экспериментально зарегистрированные характеристики основных узлов и элементов лидарной оптической системы**

Для генерации излучения применяется комбинация задающего *Nd:YAG*-лазера и параметрического генератора света на основе кристаллов титанил-арсената калия. Данная лазерная система, созданная с привлечением компании *SOLAR LS* [10], обеспечивает генерацию излу-

чения в спектральном диапазоне  $4\ 800\text{--}5\ 100\ \text{см}^{-1}$ . Проведены эксперименты по регистрации выходных характеристик источника излучения, необходимых для работы и апробации лидарной системы в атмосферных условиях при ДПР/ДОАС-зондировании. На рис. 2 представлен пример измерения диаметра лазерного пучка с применением визуализатора ИК2-3Л [11]. Результаты измерения показали, что диаметр пучка составляет  $\sim 7,9\ \text{мм}$ .

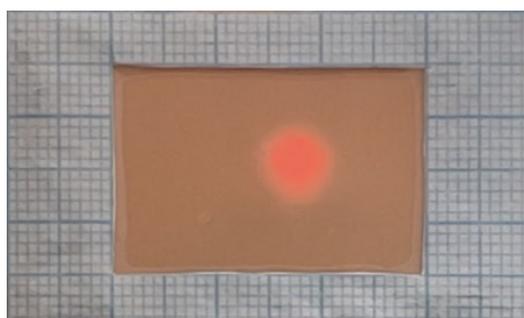


Рис. 2. Форма лазерного пучка

Для проверки частоты повторения импульсов источника излучения лидара ИК-пучок с помощью отклоняющей плоскопараллельной пластинки направляется на быстродействующий фотодетектор [12], сигнал регистрируется с использованием осциллографа. Частота повторения импульсов в информатив-

ном спектральном диапазоне работы лидарной оптической системы  $4\ 800\text{--}4\ 900\ \text{см}^{-1}$  составляет 10 Гц. На рис. 3 представлен пример проверки частоты повторения импульсов источника излучения лидарной оптической системы на длине волны  $2\ 005\ \text{нм}$  ( $4\ 987\ \text{см}^{-1}$ ), полученный на осциллографе [13].

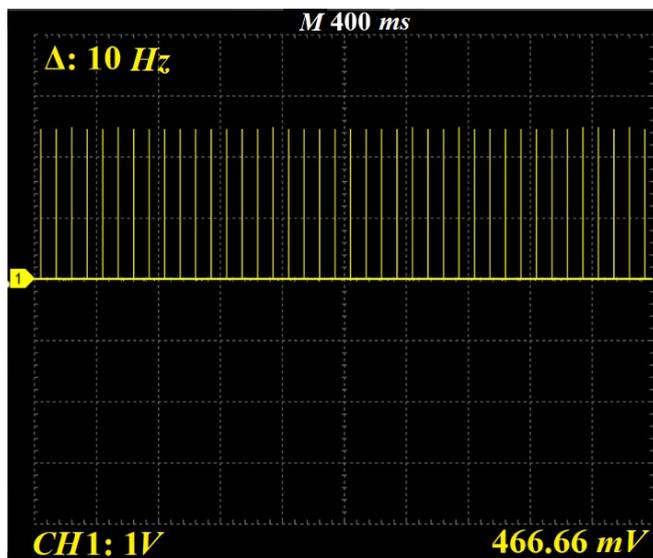


Рис. 3. Пример частоты повторения импульсов источника излучения лидарной оптической системы ( $\lambda = 2\ 005\ \text{нм}$ )

Для проверки длительности импульса источника излучения лидара ИК-пучок с помощью отклоняющей плоскопараллельной пластинки направляется на быстродействующий

фотодетектор [12], сигнал регистрируется с использованием осциллографа [13]. Измеренная длительность импульса излучения на длине волны  $2\ 005\ \text{нм}$  составляет 16 нс (рис. 4).

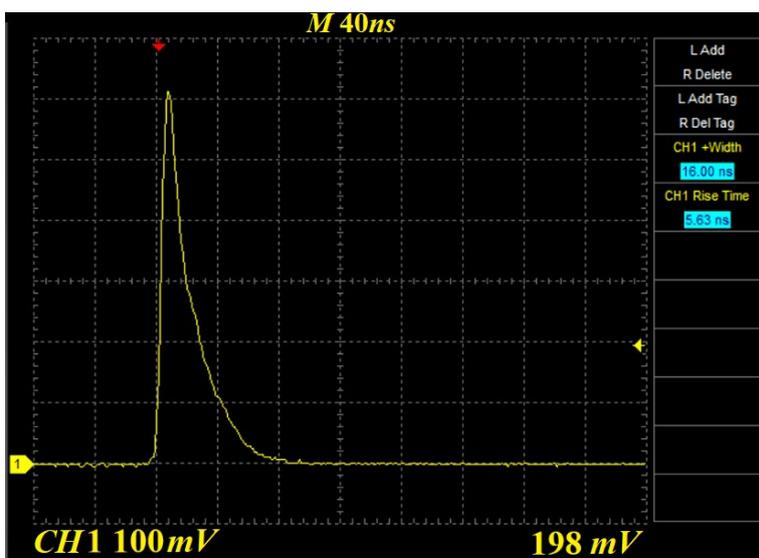


Рис. 4. Длительность импульса источника излучения лидарной оптической системы ( $\lambda = 2\ 005\ \text{нм}$ )

Проведены тестовые эксперименты по измерению формы контура и ширины линии генерации лазера в информативном диапазоне зондирования  $\text{CO}_2$  и  $\text{H}_2\text{O}$ . С использованием монохроматора / спектрографа *M833* и линейчатого фотодетектора, входящих в состав лидарной оптической системы, измерена ширина линии ее генерации на длинах волн (2 005 нм и 2 056 нм) в пределах полосы поглощения  $\text{CO}_2$ , где также на крыле линии присутствует поглощение  $\text{H}_2\text{O}$ . Ширина линии генерации, измеренная для длины волны излучения 2 005 нм, составляет 1,77 нм ( $4,40 \text{ см}^{-1}$ ) и 2 056 нм – 2,26 нм ( $5,34 \text{ см}^{-1}$ ).

Необходимо отметить, что в передающую часть лидара включен зеркальный коллиматор (рис. 5), предназначенный для уменьшения расходимости лазерного излучения. Коэффициент увеличения зеркального коллиматора равен 5. На рис. 6 показаны результаты проверки коэффициента увеличения зеркального коллиматора с использованием юстировочного лазерного диодного модуля *CPS635R* (635 нм) [14], двояковыпуклой линзы (диаметр 25,4 мм,  $f = 125 \text{ мм}$ ) и апертурной диафрагмы (диаметр 12 мм).

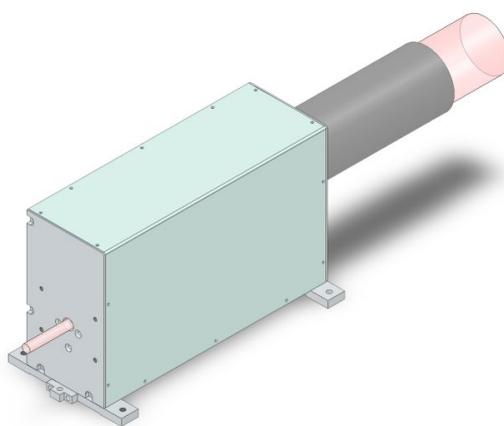


Рис. 5. Модель зеркального коллиматора (диаметр информативного лазерного пучка на входе 12 мм, диаметр информативного лазерного пучка на выходе 60 мм)

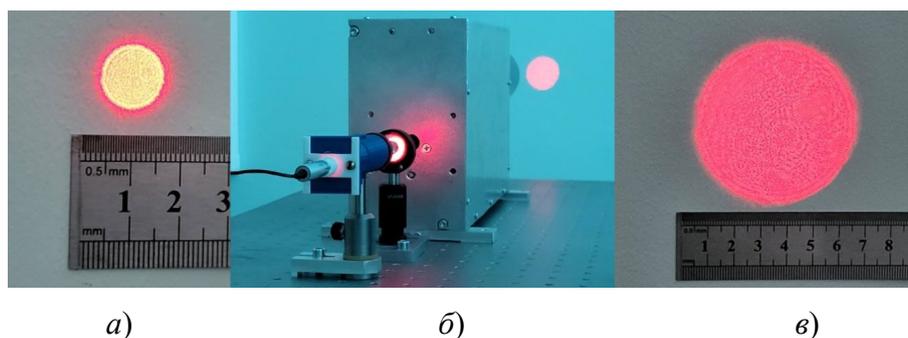


Рис. 6. Результаты измерения коэффициента увеличения коллиматора:

*а)* диаметр лазерного пучка (12 мм) на входе в коллиматор; *б)* юстировочный красный лазер, линза, апертурная диафрагма (12 мм) и коллиматор; *в)* диаметр лазерного пучка (60 мм) на выходе из коллиматора

Излучение, рассеянное из атмосферы в направлении лидара, собирается телескопом, сконструированным по схеме Мерсенна и изготовленным в ИОА СО РАН.

Диаметр приемной апертуры телескопа составляет 300 мм. Стоит заметить, что на выходе из телескопа формируется коллимированный пучок.

Излучение, рассеянное из атмосферы в направлении лидара и собранное телескопом, разделяется дихроичным зеркалом на два канала: ДПР- и ДОАС-каналы регистрации обратно рассеянного сигнала.

В ходе работ проведены лабораторные эксперименты, моделирующие атмосферные измерения, с использованием газовой кюветы (длина 100 мм, окно диаметром 40 мм, материал окон  $\text{CaF}_2$ ). Газовая кювета перед проведением измерений продувалась азотом ( $\text{N}_2$ ) для минимизации мешающего поглощения сторонними газами, и накачивалась углекислым газом ( $\text{CO}_2$ ) с давлением 1 атм. Для проведения измерений и калибровки по исследуемому целевому газу, газовая кювета ставилась на пути распространения лазерного излучения, в качестве приемника использовались монохроматор / спектрограф M833 и линейчатый фотодетектор,

входящие в состав лидарной оптической системы. В связи с тем, что была выбрана короткая трасса зондирования, было принято решение проводить калибровку и измерения на длине волны близ 2 005 нм ( $4\,987\text{ см}^{-1}$ ) в полосе поглощения  $\text{CO}_2$  с более высокой интенсивностью линий, нежели на длинах волн в полосе поглощения  $\text{CO}_2 \sim 2\,056\text{ нм}$  ( $4\,863\text{ см}^{-1}$ ). Результаты лабораторных экспериментов приведены на рис. 7. Из рисунка видно, что в рассматриваемом спектральном диапазоне, при работе на откалиброванной длине волны поглощения  $\text{CO}_2$  близ 2 005 нм ( $4\,987\text{ см}^{-1}$ ), возможен выбор пары длин волн с резонансным поглощением целевого газа для исследования фонового состояния атмосферы в приземном слое ( $p \approx 1\text{ атм}$ ) с использованием лидарной оптической системы, осуществляющей ДПР / ДОАС-горизонтальное зондирование.

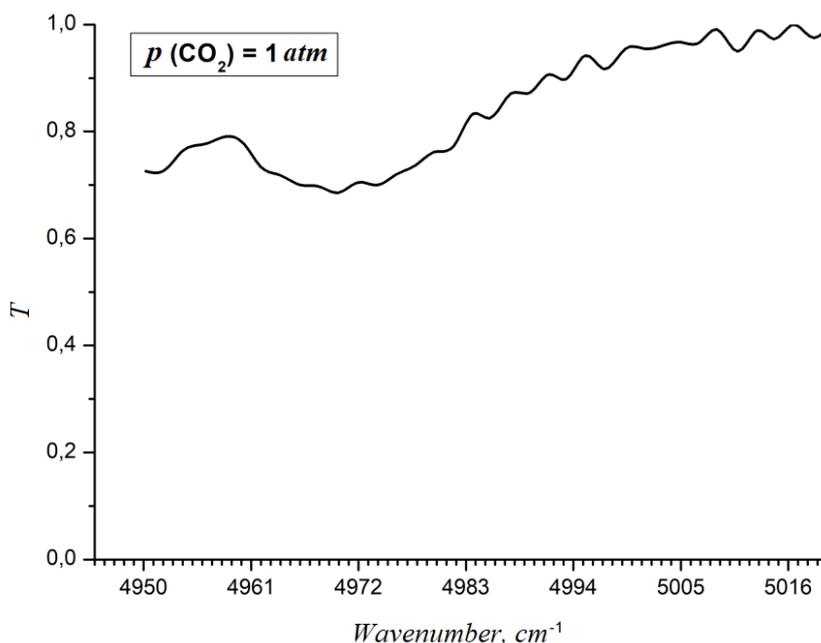


Рис. 7. Зарегистрированный спектр пропускания в полосе поглощения  $\text{CO}_2$  при значении концентрации целевого газа, соответствующем фоновому приземному атмосферному значению в условиях зондирования лета средних широт

Для проверки работы ИК двухканальной лидарной оптической системы на примере откалиброванной длины волны зондирования  $\text{CO}_2$  2 005 нм ( $4\,987\text{ см}^{-1}$ ) в условиях, соответствующих погодным атмосферным, проведены эксперименты по регистрации усредненного обратно рассеянного сигнала

с использованием топографической мишени с альбедо  $\sim 0,15$ , расположенной на пути распространения излучения. Условия работы лидарной системы соответствовали среднеклиматической модели лета средних широт ( $T = 302\text{ K}$ ,  $p = 0,97\text{ атм}$ , влажность 35 %, без осадков). Результат измерений

представлен на рис. 8. Из рис. 8 видно, что фотоприемная часть двухканальной лидарной оптической системы уверенно регистрирует обратно-рассеянный сигнал от топографической мишени, расположенной на расстоянии 168 м, на откалиброванной длине волны зондирования  $\text{CO}_2$  с горизонтальной атмосферной трассы на уровне 60 мВ.

ческой мишени, расположенной на расстоянии 168 м, на откалиброванной длине волны зондирования  $\text{CO}_2$  с горизонтальной атмосферной трассы на уровне 60 мВ.

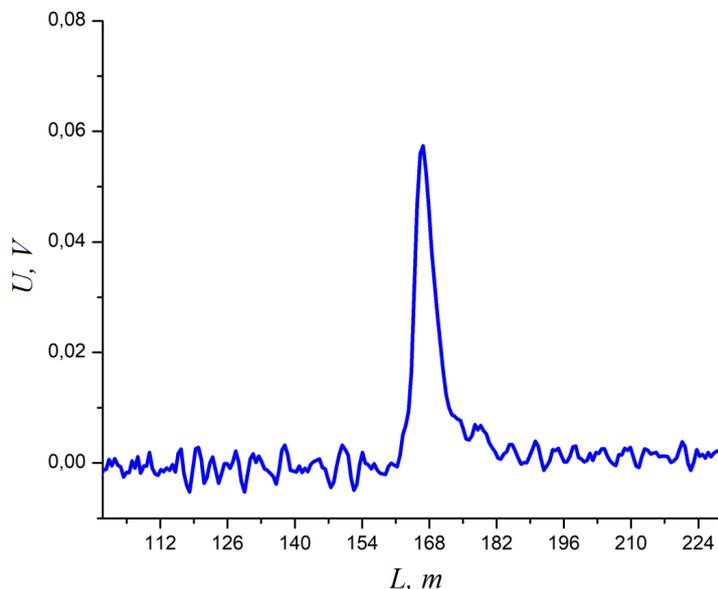


Рис. 8. Усредненный обратно-рассеянный сигнал от топографической мишени на горизонтальной атмосферной трассе при работе на откалиброванной длине волны зондирования  $\text{CO}_2$  2 005 нм ( $4\,987\text{ см}^{-1}$ )

### Заключение

Предложено конструкторское и техническое исполнение лидарной системы. Экспериментально зарегистрированы характеристики основных узлов и элементов лидарной системы:

- лидарная оптическая система генерирует информативное ИК-лазерное излучение в спектральном диапазоне  $4\,800\text{--}5\,100\text{ см}^{-1}$  с длительностью импульса 16 нс, шириной линии  $\leq 6,5\text{ см}^{-1}$  и частотой повторения импульсов 10 Гц;

- диаметр информативного ИК-лазерного пучка передатчика лидарной системы составляет  $\sim 7,9\text{ мм}$ ;

- коэффициент увеличения зеркального коллиматора лидарной системы составляет 5;

- при моделировании атмосферных измерений в газовой кювете выявлено, что на откалиброванной длине волны зондирования  $\text{CO}_2$  2 005 нм ( $4\,987\text{ см}^{-1}$ ) возможен выбор пары длин волн с резонансным по-

глощением целевого газа для исследования фонового состояния атмосферы в приземном слое ( $p \approx 1\text{ атм}$ );

- фотоприемная часть системы обеспечивает регистрацию обратно рассеянных сигналов на уровне 60 мВ с горизонтальной атмосферной трассы от топографической мишени с альбедо  $\sim 0,15$ , расположенной на расстоянии 168 м, на откалиброванной длине волны зондирования  $\text{CO}_2$ .

Таким образом, тестовые эксперименты показали возможность регистрации эхосигналов с применением разработанной двухканальной лидарной системы для дистанционного зондирования атмосферы и возможность перехода к следующему этапу исследовательской работы.

### Финансирование

Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-10203, <https://rscf.ru/project/22-79-10203/>.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Fix A., Steinebach F., Wirth M., Schäfler A., Ehret G. Development and application of an airborne differential absorption lidar for the simultaneous measurement of ozone and water vapor profiles in the tropopause region // *Appl. Opt.* – 2019. – V. 58. – N. 22. – P. 5892–5900.
2. Aiuppa A., Fiorani L., Santoro S., Parracino S., D'Aleo R., Liuzzo M., Maio G., Nuvoli M. New advances in dial-lidar-based remote sensing of the volcanic CO<sub>2</sub> flux // *Front. Earth Sci.* – 2017. – V. 5. – P. –13.
3. Veerabuthiran S., Razdan A. K., Jindal M. K., Sharma R. K., Sagar V. Development of 3.0–3.45 μm OPO laser based range resolved and hard-target differential absorption lidar for sensing of atmospheric methane // *Opt. Laser Technol.* – 2015. – V. 73. – P. 1–5.
4. Smalikho I. N., Banakh V. A., Razenkov I. A., Sukharev A. A., Falits A. V., Sherstobitov A.M. Comparison of Results of Joint Wind Velocity Measurements with the Stream Line and WPL Coherent Doppler Lidars // *Atmos. Ocean. Opt.* – 2022. – V. 35. – № S1. – P. S79–S91.
5. Razenkov I. A., Nadeev A. I., Zaitsev N. G. and Gordeev E. V. Turbulent UV Lidar BSE-5 // *Atmos. Ocean. Opt.* – 2020. – V. 33. – N. 04. – P. 406–414.
6. Razenkov I. A. Engineering and Technical Solutions When Designing a Turbulent Lidar // *Atmos. Ocean. Opt.* – 2022. – V. 35. – № S1. – P. S148–S158.
7. Marichev V. N., Bochkovsky D. A., Elizarov A. I. Optical Aerosol Model of the Western Siberian Stratosphere Based on Lidar Monitoring Results // *Atmos. Ocean. Opt.* – 2022. – V. 35. – № S1. – P. S64–S69.
8. 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 Sensing.* – 2023. – 15(15). – 3816.
9. Садовников С. А., Кравцова Н. С., Яковлев С. В., Герасимова М. П. Проектирование приемопередающей части двухканальной лидарной системы ИК-диапазона // *Вестник СГУГиТ.* – 2023. – Т. 28, № 2. – С. 136–144.
10. Solar laser system [Электронный ресурс]. – URL: <https://solarlaser.com/en/> (дата обращения: 03.02.2023).
11. PhotonTechSystem [Электронный ресурс]. – URL: <https://phts.ru/laser-beam-visualizers> (дата обращения: 03.02.2023).
12. IBSG [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.ibsg-st-petersburg.com/> (дата обращения: 03.02.2023).
13. Acute [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.acute.com.tw/en> (дата обращения: 03.02.2023).
14. Thorlabs [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.thorlabs.com/> (дата обращения: 03.02.2023).

## Об авторах

*Сергей Александрович Садовников* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией мониторинга парниковых газов.

*Семён Владимирович Яковлев* – кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией прогнозирования состояния атмосферы.

*Наталья Сергеевна Кравцова* – младший научный сотрудник лаборатории прогнозирования состояния атмосферы.

*Дмитрий Алексеевич Тужилкин* – младший научный сотрудник лаборатории дистанционного зондирования окружающей среды.

*Марианна Петровна Герасимова* – техник лаборатории мониторинга парниковых газов.

Получено 02.02.2024

© С. А. Садовников, С. В. Яковлев, Н. С. Кравцова,  
Д. А. Тужилкин, М. П. Герасимова, 2024

## Creation of a two-channel lidar system for remote gas analysis of the atmosphere

S. A. Sadovnikov<sup>1</sup>✉, S. V. Yakovlev<sup>1</sup>, N. S. Kravtsova<sup>1</sup>, D. A. Tuzhilkin<sup>1</sup>, M. P. Gerasimova<sup>1</sup>

<sup>1</sup> V. E. Zuev Institute of Atmospheric Optics of Siberian Branch  
of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation

e-mail: sadsa@iao.ru

**Abstract.** Currently, one of the current and rapidly developing areas of research is the development of remote sensing systems for greenhouse gases in the atmosphere. The problem of the influence of interfering absorption of foreign gases when restoring the concentration profile of the target gas component is well known. The goal of the study is to develop a two-channel lidar system that takes into account the main interfering absorption of water vapor when studying carbon dioxide concentration profiles. To solve the presented goal, it is proposed to use simultaneously three remote sensing methods, namely, the differential absorption and scattering (DAS) method and the trace method based on differential optical absorption spectroscopy (DOAS). The results of the development of a two-channel infrared lidar system for remote sensing of greenhouse gases in the atmosphere are presented. The characteristics of the main components and elements of the lidar system, suitable for carrying out work on remote gas analysis of the atmosphere, have been experimentally confirmed. Laboratory experiments were carried out simulating atmospheric measurements of the target gas (CO<sub>2</sub>) absorption and test field experiments that confirmed the functionality of the developed lidar system in atmospheric conditions. The developed system can be used in the development of measuring complexes for carbon test sites, for monitoring the gas composition of the atmosphere in industrial centers, at background measuring stations and in areas of swamp ecosystems.

**Keywords:** lidar, differential absorption, DOAS, atmosphere, carbon dioxide, collimator, topographic target

### REFERENCES

1. Fix, A., Steinebach, F., Wirth, M., Schäfler, A. & Ehret, G. (2019). Development and application of an airborne differential absorption lidar for the simultaneous measurement of ozone and water vapor profiles in the tropopause region *Appl. Opt.* 58(22), 5892–5900.
2. Aiuppa, A., Fiorani, L., Santoro, S., Parracino, S., D'Aleo, R., Liuzzo, M., Maio, G. & Nuvoli, M. (2017) New advances in dial-lidar-based remote sensing of the volcanic CO<sub>2</sub> flux *Front. Earth Sci.* 5, 1–13.
3. Veerabuthiran, S., Razdan, A. K., Jindal, M. K., Sharma, R. K. & Sagar, V. (2015). Development of 3.0–3.45 μm OPO laser based range resolved and hard-target differential absorption lidar for sensing of atmospheric methane *Opt. Laser Technol.* 73, 1–5.
4. Smalikho, I. N., Banakh, V. A., Razenkov, I. A., Sukharev A. A., Falits, A.V. & Sherstobitov, A. M. (2022). Comparison of Results of Joint Wind Velocity Measurements with the Stream Line and WPL Coherent Doppler Lidars. *Atmos. Ocean. Opt.* 35(S1), S79–S91.
5. Razenkov, I. A., Nadeev, A. I., Zaitsev, N. G. & Gordeev, E. V. (2020). Turbulent UV Lidar BSE-5. *Atmos. Ocean. Opt.* 33(4), 406–414.
6. Razenkov, I. A. (2022). Engineering and Technical Solutions When Designing a Turbulent Lidar. *Atmos. Ocean. Opt.* 35(S1), S148–S158.
7. Marichev, V. N., Bochkovsky, D. A. & Elizarov, A. I. (2022). Optical Aerosol Model of the Western Siberian Stratosphere Based on Lidar Monitoring Results. *Atmos. Ocean. Opt.* 35(S1), S64–S69.

8. Nasonov, S., Balin, Y., Klemasheva, M., Kokhanenko, G., Novoselov, M. & Penner, I. (2023). Study of Atmospheric Aerosol in the Baikal Mountain Basin with Shipborne and Ground-Based Lidars *Distantionnoye zondirovaniye [Remote Sensing]*. 15(15), 3816.
9. Sadovnikov, S. A., Yakovlev, S. V., Kravtsova, N. S. & Gerasimova, M. P. (2023). Designing the transceiver part of a two-channel infrared lidar system. *Vestnik SGUGiT [Vestnik SSUGT]*. 28(2), 136–144. [in Russian].
10. Solar laser system (n.d.). Retrieved from <https://solarlaser.com/en/> (accessed: February 03, 2023).
11. PhotonTechSystem (n.d.). Retrieved from <https://phts.ru/laser-beam-visualizers> (accessed: February 03, 2023).
12. IBSG (n.d.). Retrieved from <http://www.ibsg-st-petersburg.com/> (accessed: February 03, 2023).
13. Acute (n.d.). Retrieved from <https://www.acute.com.tw/en> (accessed: February 03, 2023).
14. Thorlabs (n.d.). Retrieved from <https://www.thorlabs.com/> (accessed: February 03, 2023).

### Author details

*Sergey A. Sadovnikov* – Ph. D., Head of the Laboratory for Atmospheric Prediction.

*Semyon V. Yakovlev* – Ph. D., Head of the Laboratory of Greenhouse Gas Monitoring.

*Natalya S. Kravtsova* – Junior Scientist, Laboratory for Atmospheric Prediction.

*Dmitry A. Tuzhilkin* – Junior Scientist, Laboratory for Remote Sensing of the Environment.

*Marianna P. Gerasimova* – Technician, Laboratory of Greenhouse Gas Monitoring.

Receives 02.02.2024

© *S. A. Sadovnikov, S. V. Yakovlev, N. S. Kravtsova,  
D. A. Tuzhilkin, M. P. Gerasimova, 2024*