

МОБИЛЬНЫЙ ИК-ЛИДАР ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО ПОГЛОЩЕНИЯ ДЛЯ ДИСТАНЦИОННОГО МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ МЕТАНА В АТМОСФЕРЕ

Н.С. Кравцова, Д.А. Тужилкин, С.А. Садовников, О.А. Романовский, С.В. Яковлев

Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Россия
kravtsova@iao.ru

MOBILE IR DIFFERENTIAL ABSORPTION LIDAR FOR REMOTE MONITORING OF ATMOSPHERIC METHANE CONCENTRATION

N.S. Kravtsova, D.A. Tuzhilkin, S.A. Sadovnikov, O.A. Romanovskii, S.V. Yakovlev

V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russia
kravtsova@iao.ru

Аннотация. Представлены результаты натурных полевых испытаний мобильного ИК-лидара по регистрации атмосферного отклика и восстановлению фоновых значений концентрации метана ~ 2.0 ppm на приземных горизонтальных атмосферных трассах зондирования. Разработан юстировочный блок для настройки углового положения выводного зеркала метанового лидара в полуавтоматическом режиме.

Ключевые слова: лидар, метан, дистанционное зондирование.

Abstract. This paper presents the results of full-scale field tests of a mobile IR lidar on recording the atmospheric response and on restoring background values of methane concentration of ~ 2.0 ppm along surface horizontal atmospheric sounding paths. An adjustment block was developed to regulate the angular position of output mirror of the methane lidar in semi-automatic mode.

Keywords: : lidar, methane, remote sensing.

ВВЕДЕНИЕ

Метан CH_4 является одним из наиболее важных органических веществ в атмосфере. Фоновое значение концентрации метана в приземном слое атмосферы на данный момент составляет ~ 2 ppm, увеличение данного значения приводит к усилению парникового эффекта. Поэтому требуется постоянный мониторинг распределения и динамики концентрации CH_4 для наблюдения повышения общего содержания данного газового компонента в атмосфере.

Метан имеет достаточно интенсивные линии поглощения в диапазоне длин волн от 1.5 до 8 мкм, в частности, близ 1.65, 2.3, 3.3–3.4 и 7.7 мкм [Yerasi et al., 2018]

Наиболее часто используемыми для лазерного дистанционного зондирования метана являются полосы поглощения метана ~ 1.65 [Bartholomew et al., 2017; Frish et al., 2013; Amediak et al., 2017; Григорьевский и др., 2021] и 3.3–3.4 мкм [Degtiarev et al., 2003; Murdock et al., 2008]. Технологии зондирования в этих диапазонах длин волн являются наиболее развитыми, причем наиболее сильная полоса поглощения метана приходится на средний ИК-диапазон ~ 3.3 – 3.4 мкм, что определяет информативность этого диапазона спектра для зондирования данного газового компонента. Таким образом, область спектра 3.3–3.4 мкм представляет несомненный интерес для практической реализации дистанционного мониторинга метана в атмосфере.

В Институте оптики атмосферы разработан и модернизируется стационарный ИК-лидар для исследования газового состава (в частности, метана) в атмосфере [Романовский и др., 2018]. Результаты, полученные в ходе выполнения данной работы, позволили определить концепцию мобильного ИК-лидара для мониторинга метана и в дальнейшем разработать

экспериментальный образец мобильного ИК-лидара дифференциального поглощения для исследования метана в атмосфере [Romanovskii et al., 2021].

Конструктивно лидар состоит из передающего блока (задающий лазер, оптический блок с ПГС производства фирмы SOLAR LS [<https://solarlaser.com>] и зеркало для вывода излучения в атмосферу), приемного блока (приемный телескоп, узкополосный фильтр, фотодетектор) и системы управления, сбора, накопления и обработки лидарных данных (АЦП, ПК). Конструктивное исполнение каркаса приемной части лидара позволяет проводить зондирование в горизонтальном направлении. Вывод излучения в атмосферу осуществляется двухдвойным зеркалом с золотым напылением.

Проведены первые тестовые испытания мобильного ИК-лидара для мониторинга метана в полевых условиях. Использовалась горизонтальная конфигурация лидара с выводным зеркалом, позволяющим задать направление лазерного излучения. На рис. 1 показана оптическая схема экспериментальных исследований.

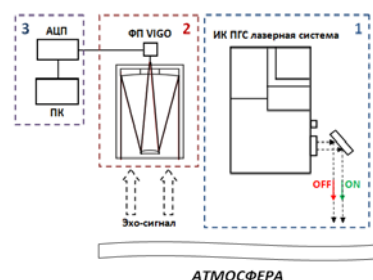


Рис. 1. Оптическая схема измерений в обсерватории «Фоновая» ИОА СО РАН. Горизонтальная конфигурация лидара с выводным зеркалом: 1 — передающая часть; 2 — приемная часть; 3 — система управления, сбора, накопления и обработки лидарных данных



Рис. 2. Мобильный ИК-лидар (а); б — зеркальный отражатель для проверки соосности красного (630 нм) и ИК-пучков (3428.428 нм и 3431.708 нм) в дальней зоне и направление распространения лазерного излучения

На рис. 2, а показан итог сборки и установки лидарной установки в месте проведения измерений. Проведена подготовительная юстировка основных узлов и элементов лидарной системы с использованием зеркального отражателя (панель б). Здесь же показано направление распространения лазерного излучения.

В ходе проведения экспериментов установлено, что при работе на открытой местности при высокой влажности в месте проведения экспериментов выходная энергия в импульсе на on-line длине волны зондирования (3428.428 нм) падает с заявленных ~ 4.3 мДж до значений 3.54 мДж, энергия в импульсе на offline длине волны (3431.708 нм) стабильна и соответствует значениям ~ 2.5 мДж. Факт нестабильности энергии в импульсе на информативной online длине волны зондирования нивелируется в будущем при работе с автомобильного кунга или трейлера, где будет реализован климатический контроль.

На рис. 3 показаны результаты полевых испытаний мобильного ИК-лидара. Получены лидарные сигналы (а, б), показывающие корректную автоматизированную работу приемной части лидарной системы и дифференциальное поглощение, достаточное для восстановления концентрации метана (рис. 3, в). В ходе проведения экспериментов на приземной горизонтальной трассе 500 м получены

фоновые значения концентрации метана (рис. 3, в).

Значения концентрации метана в месте проведения полевых измерений варьируют в пределах фонового значения и составляют ~ 2.0 ppm.

Необходимо отметить, что в процессе натуральных испытаний лидара возникла необходимость в увеличении скорости настройки параллельности распространения лазерного излучения относительно оптической оси приемного телескопа. Эта задача была решена в результате разработки программно-аппаратного комплекса, который представляет собой набор согласованных друг с другом элементов: плата Arduino, шаговые двигатели (ШД) с соответствующими им аппаратными драйверами управления ШД, напечатанные на 3D-принтере детали крепления ШД, разработанное программное обеспечение управления ШД для юстировки зеркала. На рис. 4 показана аппаратная часть устройства юстировочного блока.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В целом, результаты тестовых атмосферных испытаний показывают работоспособность мобильного лидара и возможность мониторинга фоновых значений концентрации метана при проведении измерений

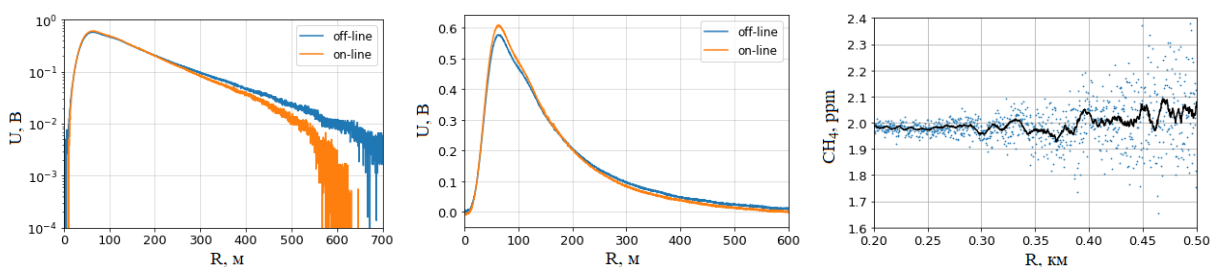


Рис. 3. Лидарные сигналы на информативных длинах волн зондирования метана: а — логарифмическая форма, б — линейная форма; усредненные значения концентрации метана (в), восстановленные из лидарных сигналов

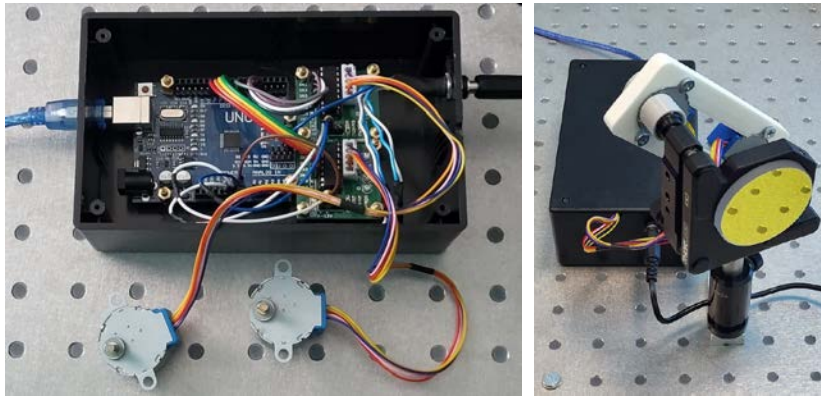


Рис. 4. Аппаратная часть устройства юстировочного блока для настройки углового положения выводного зеркала лидара (а) и внешний вид устройства в сборе с зеркалом (б)

По результатам тестовых атмосферных испытаний выработаны требования для дальнейшей модернизации мобильного лидара с целью увеличения дальности измерений до 3–5 км, стабильности выходных характеристик источника излучения лидара, увеличения чувствительности детекторов в приемной части лидара.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Григорьевский В.И., Садовников В.П., Элбакидзе А.В. Измерения фоновой концентрации метана дистанционным лидаром на километровых трассах в районе Московской области. *Журнал радиоэлектроники* [электронный журнал]. 2021. № 9.

Романовский О.А., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В. Дистанционный анализ содержания метана в атмосфере ИК-лидарной системой дифференциального поглощения в спектральном диапазоне 3300–3430 нм. *Оптика атмосферы и океана*. 2019. Т. 32, № 11. С. 896–901.

Amediek A., Ehret G., Fix A., et al. CHARM-F — a new airborne integrated-path differential-absorption lidar for carbon dioxide and methane observations: measurement performance and quantification of strong point source emissions. *Applied Optics*. 2017. Vol. 56, no. 18. P. 5182–5197.

Bartholomew J. et al. Wide area methane emissions mapping with airborne IPDA lidar. *Proc. SPIE*. 2017. Vol. 10406. P. 1040607.

Degtiarev E.V., Geiger A.R., Richmond R.D. Compact mid-infrared DIAL lidar for ground-based and airborne pipeline monitoring. *Proc. SPIE*. 2003. Vol. 4882. P. 432–442.

Frish M.B., et al. Low-cost lightweight airborne laser-based sensors for pipeline leak detection and reporting. *Proc. SPIE*. 2013. Vol. 8726. P. 87260C.

Murdock D. G., et al. Applications of real-world gas detection: Airborne Natural Gas Emission Lidar (ANGEL) system. *J. Appl. Remote Sens.* 2008. Vol. 2, no. 1. P. 023518.

Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Yakovlev S.V., et al. Mobile 3.4- μm differential absorption lidar system for remote sensing of the atmospheric methane. *Proc. SPIE*. 2021. Vol. 11916. P. 11916 1T.

Yerasi A., Tandy W.D., Emery W.J., Barton-Grimley R.A. Comparing the theoretical performances of 1.65- and 3.3- μm differential absorption lidar systems used for airborne remote sensing of natural gas leaks. *J. Appl. Remote Sens.* 2018. Vol. 12, no. 2. P. 026030.

URL: <https://solarlaser.com> (accessed on 3 February 2022).

URL: <ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/lists/particle> (accessed on 3 February 2022).

URL: <http://spaceweather.izmiran.ru/rus/dbs.html> (accessed on 3 February 2022).