

## ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ АТМОСФЕРЫ, ГИДРОСФЕРЫ И ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

УДК 551.510.411; 551.501.816

# Дистанционный анализ содержания метана в атмосфере ИК-лидарной системой дифференциального поглощения в спектральном диапазоне 3300–3430 нм

О.А. Романовский, С.А. Садовников, О.В. Харченко, С.В. Яковлев\*

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

Поступила в редакцию 2.09.2019 г.

Разработана лидарная система дифференциального поглощения на основе параметрических генераторов света, позволяющих перестраивать лазерное излучение в ИК-диапазоне длин волн. Проведены эксперименты по дистанционному мониторингу содержания метана на приземной горизонтальной трассе зондирования в спектральном диапазоне 3300–3430 нм. На основе результатов измерений восстановлены концентрации  $\text{CH}_4$  вдоль трассы длиной 800 м в исследуемом диапазоне с пространственным разрешением 100 м.

*Ключевые слова:* лидар, инфракрасный диапазон, параметрическая генерация света, дифференциальное поглощение, метан; lidar, infrared region, optical parametric oscillator, differential absorption, methane.

### Введение

Современные источники лазерного излучения, предназначенные для решения атмосферных задач, созданы на основе широкодиапазонных ИК-молекулярных лазеров, а также параметрических преобразователей частоты на нелинейных кристаллах, позволяющих путем генерации обертонов, гармоник, суммарных и разностных частот излучения лазеров перекрыть спектральный диапазон от 2 до 18 мкм. Этот диапазон — наиболее перспективный для контроля практически всех газовых компонент атмосферы. Спектры излучения существующих лазеров с приемлемыми для лидарных измерений энергетическими параметрами перекрывают лишь некоторые его участки, поэтому разработка систем, позволяющих контролировать весь этот диапазон методом дифференциального поглощения (МДП), на сегодняшний день является актуальной задачей.

Успехи в исследованиях и производстве нелинейно-оптических кристаллов позволяют создавать все новые системы газоанализа [1–3] и тем самым расширять возможности дистанционного контроля состояния окружающей среды. Так, в работе [4] представлена лидарная система дифференциального поглощения на основе двух кристаллов  $\beta\text{-BaV}_2\text{O}_4$  (ВВО) усилителей оптической мощности, накачиваемых Nd:YAG-лазером, с длительностью импульсов ~3 нс, частотой следования импульсов до 100 Гц и диапазоном перестройки 400–2500 нм. В качестве

экспериментальных результатов авторы представили вертикальное распределение водяного пара по трассе 1500 м на длинах волн  $\lambda_{\text{on}} = 1187,869$  и  $\lambda_{\text{off}} = 1187,716$  нм с пространственным разрешением измерений 15 м. Использование кристалла ниобата лития  $\text{LiNbO}_3$  с накачкой Nd:YAG-лазером позволило [5, 6] реализовать систему газоанализа с диапазонами перестройки длины волны лазерного излучения 1410–1850 и 2900–4100 нм, энергией в импульсе 1–45 мДж, шириной линии излучения 3–3,5  $\text{cm}^{-1}$ . В технических характеристиках системы указана возможность детектирования  $\text{CH}_4$  с использованием топографических целей на расстоянии 2–5 км, с чувствительностью прибора 1 ppm интегрально по трассе.

Лидарная система дифференциального поглощения на основе параметрического генератора света (ПГС) с КТР и накачкой Nd:YAG-лазером с выходной энергией в импульсе 70–100 мДж впервые позволила провести измерения суточных колебаний  $\text{CO}_2$  на  $\lambda = 1570$  нм [7]. В [8] представлен лазерный источник на кристаллах с периодической доменной структурой, работающий в спектральном диапазоне 3300–3700 нм. Сообщается, что разработанный авторами источник излучения дает возможность одновременного детектирования  $\text{H}_2\text{O}$  и  $\text{CH}_4$ . В одной из новых публикаций [9] представлена более подробная информация об аналогичной системе с рабочими длинами волн вблизи 2000 нм.

Использование кристаллов  $\text{LiNbO}_3$  с периодической доменной структурой позволяет исследовать концентрации таких газовых составляющих, как  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ , что является одним из шагов в реализации многокомпонентной системы газоанализа на базе подобного источника излучения [9]. В [10] пред-

\* Олег Анатольевич Романовский (roa@iao.ru); Сергей Александрович Садовников (sadsa@iao.ru); Ольга Викторовна Харченко (olya@iao.ru); Семен Владимирович Яковлев (ysv@iao.ru).

ставлены результаты разработки лазера на основе Nd:YLF-лазера с диодной накачкой и КТР ПГС. С его помощью авторами успешно проведены интегральные по трассе длиной порядка 2 км измерения концентрации углекислого газа. В результате дальнейших исследований реализована система, пригодная для проведения работ в полевых условиях, с возможностью автоматического детектирования  $\text{CO}_2$  и  $\text{CH}_4$  в трех измерениях [11]. В [12] говорится о создании уникального по функциональности лидара дифференциального поглощения на передвижной платформе, предназначенного для дистанционного зондирования паров ключевых веществ, используемых для изготовления взрывчатых субстанций (ацетон и нитрометан). Использование спектроскопических баз данных и проведение лабораторных измерений показало, что для детектирования паров  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}$  и  $\text{CH}_3\text{NO}_2$  по МДП оптимален спектральный диапазон 3000–3500 нм. Выходная энергия лазерного импульса составляет 12 мДж, диаметр пучка – 22 мм, длительность импульса – 5,2 нс, частота следования импульсов – 10 Гц, время перестройки длины волны – 0,3 с, ширина линии излучения – порядка  $5 \text{ см}^{-1}$ .

Активное развитие направления подтверждается большим количеством патентов и публикаций, посвященным разработке ИК-лидаров дифференциального поглощения и методик для газоанализа атмосферы: многоканального лидара с использованием нескольких ПГС [13], лидара самолетного базирования [14], метода комбинирования МДП и частотных гребенок [15], широкополосного перестраиваемого источника лазерного излучения [16–18], лидара для зондирования атмосферного метана в диапазоне 3000–3450 нм [19], лидаров [20–22].

Целью работы являлась разработка лидарной системы дистанционного контроля фоновых и надфоновых значений концентрации метана на приземных тропосферных трассах зондирования.

## ИК-лидарная система дифференциального поглощения

В Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН создана ИК-лидарная система дифференциального поглощения на основе ПГС для изучения

распределения газовых компонент в приземном слое атмосферы (или в нижней тропосфере), имеющих значимое поглощение в средней ИК-области спектра 3000–4000 нм. В этот диапазон попадают полосы поглощения  $\text{CH}_4$  (3300–3430 нм), что дает возможность исследовать его общее содержание в нижней тропосфере.

На рис. 1 и 2 показан внешний вид ИК-лидарной системы дифференциального поглощения, приемного телескопа и зеркального коллиматора. Характеристики системы приведены в таблице.

## Описание экспериментов и результаты измерений

С помощью разработанной лидарной системы проведена серия лабораторных экспериментов по измерению поглощения лазерного излучения метаном в составе молекулярной смеси. Для экспериментов выбран спектральный диапазон 3300–3430 нм, в котором находится достаточно сильная полоса поглощения метана (в этом диапазоне зондирования были отобраны пары длин волн зондирования оп- и offline [23, 24]). Использовалась молекулярная смесь  $\text{CH}_4:\text{N}_2$  (в соотношении 2:98) в кювете при давлении 1 атм.

Оптическая схема экспериментов показана на рис. 3.

В качестве источника излучения лидарной системы используется ПГС-лазер, подробно описанный в [24–27]. Излучение лазерной системы с помощью плоскопараллельных пластин  $\text{CaF}_2$  и поворотного зеркала направлялось в газовую кювету КГ-01 (длинной 100 мм, окно диаметром 40 мм, материал окон  $\text{CaF}_2$ ). До прохождения через газовую кювету часть излучения отводилась за счет отражения от пластины  $\text{CaF}_2$  (коэффициент деления 50/50) на термоохлаждаемый фотодиод 2 для регистрации опорного сигнала. Термоохлаждаемым фотодиодом 3 измерялся информативный сигнал на выходе из газовой кюветы. Спектры пропускания газовой смеси рассчитывались из отношения опорного и информативного сигналов. Коэффициент поглощения излучения ПГС-лазера молекулярной смесью в газовой кювете рассчитывался в соответствии с законом Бугера. Наличие в схеме зеркального коллиматора и приемного



Рис. 1. ИК-лидарная система дифференциального поглощения



Рис. 2. Приемный телескоп и зеркальный коллиматор

### Технические характеристики ИК-лидарной системы

Характеристика	Значение
<i>Лазерная система</i>	
Диапазон перестройки длины волны, нм	3300–3430
Максимальная энергия в импульсе, мДж	6
Ширина линии излучения, см <sup>-1</sup>	1
Длительность импульса, нс	10–13
Частота повторения импульсов, Гц	10
Расходимость пучка, мрад	2
<i>Зеркальный коллиматор</i>	
Фокусное расстояние параболического зеркала № 1, мм	15
Фокусное расстояние параболического зеркала № 2, мм	152,4
<i>Оптическая приемная система</i>	
Тип	Кассегрен
Эффективное фокусное расстояние, мм	1457
Диаметр приемной апертуры, мм	300
Диаметр кружка рассеяния (на 532 нм), мкм	70
<i>Аналого-цифровой преобразователь сигналов</i>	
Число аналоговых выходов	4
Полоса пропускания, МГц	100
Разрешение, бит	12
Частота дискретизации по всем каналам, Гвыб./с	1
<i>Фотодетектор</i>	
Спектральный диапазон, мкм	1–4
Диаметр фоточувствительной площадки фотодиода, мкм	300
Время нарастания, нс	50
Обнаружительная способность $D^*$ , см · Гц <sup>1/2</sup> · Вт <sup>-1</sup>	$4 \times 10^9$

телескопа позволяет регистрировать обратнорассеянное излучение из атмосферы и одновременно использовать кювету в качестве калибровочного элемента при проведении натурных измерений. Зеркальный коллиматор состоит из двух параболических зеркал с фокусными расстояниями 15 и 152,4 мм соответ-

венно и позволяет уменьшить расходимость лазерного излучения. При проведении измерений в атмосфере часть излучения посредством отражения от двух пластин CaF<sub>2</sub> отводится на измеритель мощности (ИМО) для контроля энергии выходного излучения. Лазер на длине волны 532 нм используется для юстировки выходного излучения ИК-лидарной системы и обеспечения совмещения осей видимого и ИК-излучения. Спектрометр необходим для контроля длины волны выходного излучения ИК-лидарной системы. Термоохлаждаемый фотодиод 1 регистрирует обратнорассеянный сигнал из атмосферы, собранный приемным телескопом.

На рис. 4 показаны коэффициенты поглощения излучения ПГС-лазера, рассчитанные с использованием базы данных HITRAN [28] и измеренные в ходе вышеописанных лабораторных экспериментов.

В исследуемом спектральном диапазоне (3300–3430 нм) была произведена настройка на более чем 60 длин волн ПГС-лазера, включая как информативные, так и неинформативные длины волн зондирования метана, информация о которых полезна при проведении калибровки ПГС-лидарной системы.

Спектры пропускания газовой смеси измерялись путем перестройки длины волны лазерного излучения. После обработки экспериментальных данных восстанавливались коэффициенты поглощения метана (рис. 4), подтверждающие спектральное положение линий излучения лидара, а также наличие в реальной атмосфере линий поглощения исследуемой газовой составляющей, представленных в спектроскопических базах данных.

Несоответствие коэффициентов поглощения в неинформативных для газоанализа областях спектра может быть обусловлено мешающим поглощением сторонними газами. Измеренные коэффициенты поглощения (по значениям энергии лазерного импульса после прохождения через газовую кювету) хорошо согласуются с рассчитанными по базе данных HITRAN

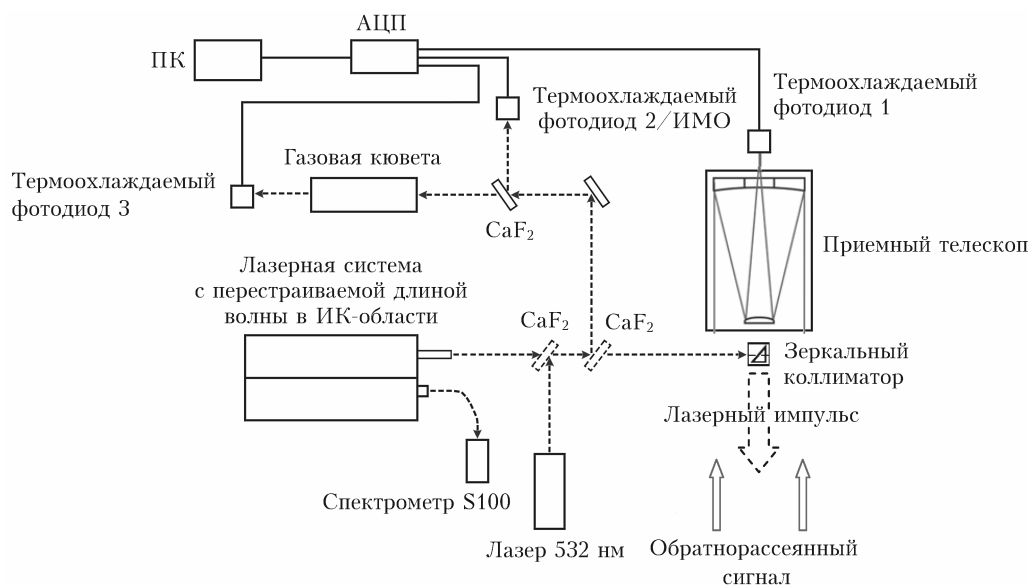


Рис. 3. Оптическая схема экспериментов с использованием ИК-лидарной системы дифференциального поглощения

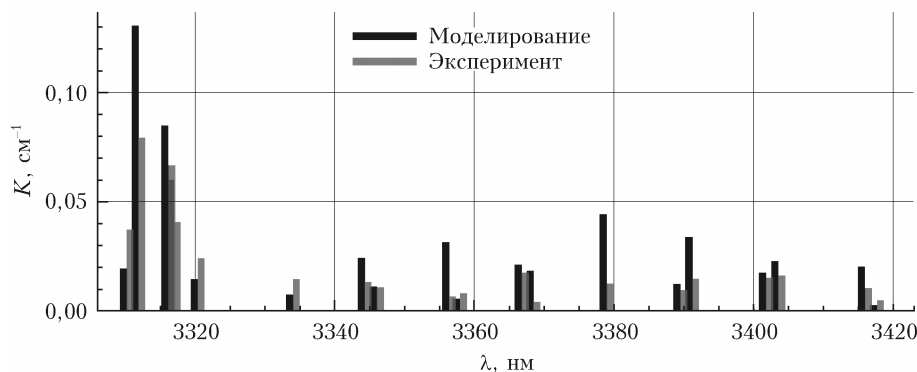


Рис. 4. Рассчитанный и измеренный коэффициенты поглощения излучения ПГС-лазера в молекулярной смеси  $\text{CH}_4:\text{N}_2$  (в соотношении 2:98 при давлении 1 атм) в информативном диапазоне длин волн зондирования метана 3300–3430 нм (13.12.2018 г.)



Рис. 5. Направление распространения зондирующего излучения

значениями коэффициентов поглощения на выбранных информативных длинах волн зондирования. В дальнейшем при проведении измерений  $\text{CH}_4$  в атмосфере принято решение использовать следующую пару длин волн зондирования: 3415,711 (online) и 3417,484 нм (offline).

С использованием ИК-лидарной системы (см. рис. 3) проведены также натурные эксперименты по изучению распределения концентрации  $\text{CH}_4$  на паре длин волн зондирования 3415,711 и 3417,484 нм с пространственным разрешением 100 м (геометрия эксперимента показана на рис. 5). Измерения проводились в г. Томске 1.02.2019 г.

На рис. 6 (цв. вкладка) показан лидарный сигнал, полученный при перестройке длины волны в спектральном диапазоне 3300–3430 нм (проводилось попеременное накопление сигналов на информативных длинах волн на дискретных наборах линий излучения лидарной системы, время переключения между длинами волн составляло 35–50 мс, время усреднения – 6,4 с).

На рис. 7 приведено распределение концентрации  $\text{CH}_4$  вдоль трассы зондирования длиной 800 м, измеренное в ходе эксперимента, в сравнении с данными, полученными на TOR-станции ИОА СО РАН [29, 30], где концентрации метана измеряется в круглосуточном режиме. Стоит заметить, что и ИК-лидарная система, и TOR-станция расположены в одном здании.

Рис. 6 и 7 показывают, что разработанная система позволяет проводить исследование и контроль распределения концентрации  $\text{CH}_4$  в приземном слое атмосферы. Результаты измерений хорошо согласуются с данными численного моделирования

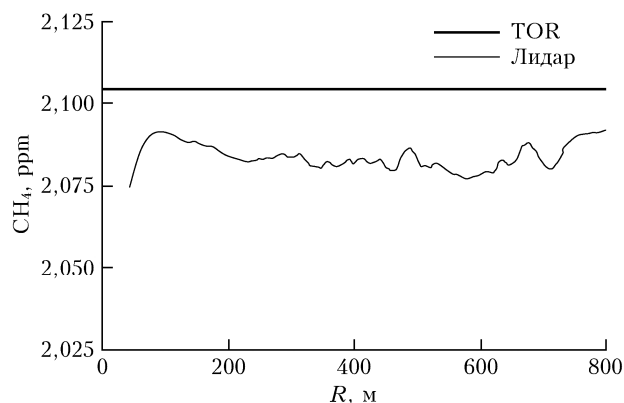


Рис. 7. Результаты измерения концентрации  $\text{CH}_4$  на приземной атмосферной трассе 800 м с пространственным разрешением 100 м (1.02.2019 г.)

и TOR-станции и подтверждают возможность использования такой системы для восстановления концентраций  $\text{CH}_4$ , близких к фоновым и надфоновым значениям.

## Заключение

Создана лидарная система дифференциального поглощения, позволяющая осуществлять прием и обработку обратнорассеянных сигналов в ИК-диапазоне спектра на приземных тропосферных трассах зондирования атмосферы. Проведены измерения поглощения метаном ПГС-лазерного излучения в лабораторных условиях и в условиях реальной атмосферы. Результаты экспериментов показывают, что разработанная лидарная система позволяет

исследовать и контролировать распределения концентрации метана на приземных горизонтальных трассах зондирования протяженностью до 800 м в среднем ИК-диапазоне спектра. Значения концентрации метана (~ 2,1 ppm), восстановленные из лидарных сигналов, находятся в хорошем согласии с данными измерений метана, полученными на TOR-станции ИОА СО РАН.

Работа выполнена при финансовой поддержке гранта Президента РФ № МК-932.2019.8 (в части разработки и реализации лидарной системы для измерения концентрации метана в условиях реальной атмосферы) и гранта РФФИ № 19-45-700003 (в части реализации лабораторной схемы измерений поглощения ПГС-лазерного излучения метаном в инфракрасном диапазоне зондирования).

1. *Reghunath A.T., Malhotra P., Kumar Y., Bhushan B.* Design of a tunable mid-IR OPO source for DIAL detection of trace gases // *Proc. SPIE.* 2006. V. 6409. P. 64091B-1–11. URL: <https://doi.org/10.1117/12.697916> (last access: 2.08.2019).
2. *Douglass K.O., Maxwell S.E., Plusquellic D.F., Hodges J.T., van Zee R.D., Samarov D.V., Whetstone J.R.* Construction of a high power OPO laser system for differential absorption LIDAR // *Proc. SPIE.* 2011. V. 8159. P. 81590D-1–9. URL: <https://doi.org/10.1117/12.894089> (last access: 2.08.2019).
3. *Barrientos-Barria J., Dherbecourt J., Raybaut M., Godard A., Melkonian J.M., Lefebvre M.H., Faure B., Souhaité G.* 3.3–3.7  $\mu\text{m}$  Nested cavity OPO pumped by an amplified micro-laser for portable DIAL // 2013 Conf. on Lasers & Electro-Optics Europe & Intern. Quantum Electronics Conf. DOI: 10.1109/CLEOE-IQEC.2013.6800859.
4. *Amoruso S., Amodeo A., Armenante M., Boselli A., Mona L., Pandolfi M., Pappalardo G., Velotta R., Spinelli N., Wang X.* Development of a tunable IR lidar system // *Optics and Lasers in Engineering.* 2002. V. 37, N 5. P. 521–532. URL: [https://doi.org/10.1016/S0143-8166\(01\)00115-4](https://doi.org/10.1016/S0143-8166(01)00115-4) (last access: 2.08.2019).
5. *Айрапетян В.С.* Измерение спектров поглощения атмосферного метана лидарным комплексом с перестройкой длины волны излучения в диапазоне 1,41–4,24 мкм // *Журн. прикладной спектроскопии.* 2009. Т. 76, № 2. С. 285–290.
6. *Айрапетян В.С.* Параметрический генератор света с плавной и(или) дискретной перестройкой частоты излучения // *Оптика атмосф. и океана.* 2008. Т. 21, № 10. С. 906–909.
7. *Amediek A., Fix A., Wirth M., Ehret G.* Development of an OPO system at 1.57  $\mu\text{m}$  for integrated path DIAL measurement of atmospheric carbon dioxide // *Appl. Phys. B.* 2008. V. 92, N 2. P. 295–302. URL: <https://doi.org/10.1007/s00340-008-3075-6> (last access: 2.08.2019).
8. *Barrientos-Barria J., Dobroc A.A., Coudert-Alteirac H., Raybaut M., Cezard N., Dherbecourt J.-P., Faure B., Souhaité G., Melkonian J.-M., Godard A., Lefebvre M., Pelon J.* 3.3–3.7  $\mu\text{m}$  OPO/OPA optical source for multispecies 200 m range integrated path differential absorption lidar // *Applications of lasers for sensing and free space communications.* Opt. Soc Am. (2013). URL: <https://doi.org/10.1364/LSC.2013.LTh1B.4>.
9. *Mammez D., Cadiou E., Dherbecourt J.-P., Raybaut M., Melkonian J.-M., Godard A., Gorju G., Pelon J., Lefebvre M.* Multispecies transmitter for DIAL sensing of atmospheric water vapour, methane and carbon dioxide in the 2  $\mu\text{m}$  region // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9645. P. 964507-1–9. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2194754> (last access: 2.08.2019).
10. *Robinson I., Jack J.W., Rae C.F., Moncrieff J.B.* Development of a laser for differential absorption lidar measurement of atmospheric carbon dioxide // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9246. P. 92460U-1–6. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2068023> (last access: 2.07.2019).
11. *Robinson I., Jack J.W., Rae C.F., Moncrieff J.B.* A robust optical parametric oscillator and receiver telescope for differential absorption lidar of greenhouse gases // *Proc. SPIE.* 2015. V. 9645. P. 96450U-1–7. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2197251> (last access: 2.07.2019).
12. *Mitev V., Babichenko S., Borelli R., Fiorani L., Grigorov I., Nuvoli M., Palucci A., Pistilli M., Puiu Ad., Rebane O., Santoro S.* Lidar extinction measurement in the mid-infrared // *Proc. SPIE.* 2014. V. 9292. P. 92923W-1–4. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2075832> (last access: 2.07.2019).
13. *Mid-infrared light hydrocarbon dial lidar:* Patent number 5250810. USA, G 01 N 21/35. Geiger A.R.; Filed 23.04.1992; Publication Date 05.10.1993.
14. *Multi-sensors and differential absorption LIDAR data fusion:* Patent number 7411196. USA, G 01 S 17/02. Kalayeh H.M.; Filed 18.07.2006; Publication Date 22.02.2007.
15. *Method and apparatus for wavelength locking free optical frequency comb based differential absorption Lidar:* Patent number 8541744. USA, G 01 S 17/10. Liu J.; Filed 9.03.2013; Publication Date 24.09.2013.
16. *High-energy, broadband, rapid tuning frequency converter:* Patent number 8837538. USA, H 01 S 3/0092. Foltynowicz R. Filed 26.09.2012; Publication Date 31.01.2013.
17. *Айрапетян В.С.* Лазерное дистанционное зондирование взрывчатых веществ методом дифференциального поглощения и рассеяния // *Журн. прикладной спектроскопии.* 2017. Т. 84, № 6. С. 987–992.
18. *Ayrapetyan V.S., Fomin P.A.* Laser detection of explosives based on differential absorption and scattering // *Opt. Laser Technol.* 2018. V. 106. P. 202–208. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2018.04.001> (last access: 2.07.2019).
19. *Veerabuthiran S., Razdan A.K., Jindal M.K. et al.* Development of 3.0–3.45  $\mu\text{m}$  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. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2015.04.007> (last access: 2.07.2019).
20. *Mitev V., Babichenko S., Bennes J., Borelli R., Dolfi-Bouteyre A., Fiorani L., Hespel L., Huet T., Palucci A., Pistilli M., Puiu A., Rebane O., Sobolev I.* Mid-IR DIAL for high-resolution mapping of explosive precursors // *Proc. SPIE.* 2013. V. 8894. P. 88940S-1–13. URL: <https://doi.org/10.1117/12.2028374> (last access: 2.07.2019).
21. *Cadiou E., Mammez D., Dherbecourt J.-B., Gorju G., Pelon J., Melkonian J.-M., Godard A., Raybaut M.* Atmospheric boundary layer CO<sub>2</sub> remote sensing with a direct detection LIDAR instrument based on a widely tunable optical parametric source // *Opt. Lett.* 2017. V. 42, N 5. P. 4044–4047. URL: <https://doi.org/10.1364/OL.42.004044> (last access: 2.07.2019).
22. *Shibata Y., Nagasawa C., Abo M.* Development of 1.6  $\mu\text{m}$  DIAL using an OPG/OPA transmitter for measuring atmospheric CO<sub>2</sub> concentration profiles // *Appl. Opt.* 2017. V. 56, N 4. P. 1194–1201. URL: <https://doi.org/10.1364/AO.56.001194> (last access: 2.07.2019).
23. *Романовский О.А., Садовников С.А., Харченко О.В., Яковлев С.В.* Широкодиапазонный ИК-лидар для га-

- зоанализа атмосферы // Журн. прикладной спектроскопии. 2018. Т. 85, № 3. С. 448–453.
24. Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Садовников С.А., Суханов А.Я., Харченко О.В., Яковлев С.В. Параметрический генератор света в задачах зондирования газовых составляющих атмосферы в спектральном диапазоне 3–4 мкм // Оптика атмосфер. и океана. 2017. Т. 30, № 7. С. 598–604. DOI: 10.15372/AOO20170708.
  25. Матвиенко Г.Г., Романовский О.А., Садовников С.А., Суханов А.Я., Харченко О.В., Яковлев С.В. Исследование возможности применения лазерной системы на основе параметрического генератора света для лидарного зондирования состава атмосферы // Оптический журнал. 2017. Т. 84, № 6. С. 58–65.
  26. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Development of Near/Mid IR differential absorption OPO lidar system for sensing of atmospheric gases // Opt. Laser Technol. 2019. V. 116. P. 43–47. URL: <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2019.03.011> (last access: 2.08.2019).
  27. Romanovskii O.A., Sadovnikov S.A., Kharchenko O.V., Yakovlev S.V. Near/mid-IR OPO lidar system for gas analysis of the atmosphere: simulation and measurement results // Optical Memory & Neural Networks (Inform. Opt.). 2019. V. 28, N 1. P. 1–10. DOI: 10.3103/S1060992X19010053.
  28. Gordon I.E., Rothman L.S., Hill C., Kochanov R.V., Tan Y., Bernath P.F., Birk M., Boudon V., Campargue A., Chance K.V., Drouin B.J., Flaud J.-M., Gama-che R.R., Hodges J.T., Jacquemart D., Perevalov V.I., Perrin A., Shine K.P., Smith M.-A.H., Tennyson J., Toon G.C., Tran H., Tyuterev V.G., Barbe A., Császár A.G., Devi V.M., Furtenbacher T., Harrison J.J., Hartmann J.-M., Jolly A., Johnson T.J., Karman T., Kleiner I., Kyuberis A.A., Loos J., Lyulin O.M., Massie S.T., Mikhailenko S.N., Moazzen-Ahmadi N., Müller H.S.P., Naumenko O.V., Nikitin A.V., Polyansky O.L., Rey M., Rotger M., Sharpe S.W., Sung K., Starikova E., Tashkun S.A., Auwera J. Vander, Wagner G., Wilzewski J., Wcislo P., Yu S., Zak E.J. The HITRAN2016 Molecular Spectroscopic Database // J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. 2017. V. 203. P. 3–69. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2017.06.038> (last access: 2.08.2019).
  29. URL: <http://lop.iao.ru/EN/tor/gas/> (last access: 1.02.2019).
  30. Давыдов Д.К., Белан Б.Д., Антохин П.Н., Антохина О.Ю., Антонович В.В., Аршинова В.Г., Аршинов М.Ю., Ахлестин А.Ю., Белан С.Б., Дудорова Н.В., Ивлев Г.А., Козлов А.В., Пестунов Д.А., Рассказчикова Т.М., Савкин Д.Е., Симоненков Д.В., Скляднева Т.К., Толмачев Г.Н., Фазлиев А.З., Фофанов А.В. Мониторинг атмосферных параметров: 25 лет ТОР-станции ИОА СО РАН // Оптика атмосфер. и океана. 2018. Т. 31, № 10. С. 845–853. DOI: 10.15372/AOO20181011.

**О.А. Романовский, С.А. Садовников, О.В. Харченко, С.В. Яковлев. Remote analysis of methane content in the atmosphere by an IR DIAL lidar system in the 3300–3430-nm spectral range.**

A differential absorption lidar (DIAL) system based on optical parametric oscillators (OPO) with nonlinear KTA and KTP crystals is designed. The crystals allow laser radiation tuning in the IR wavelength region. A series of experiments on remote monitoring of methane along a horizontal surface sounding path in the 3300–3430-nm spectral range was carried out. Based on the experimental results, the CH<sub>4</sub> concentrations along the 800 m surface path are retrieved in the spectral range under study with a spatial resolution of 100 m.

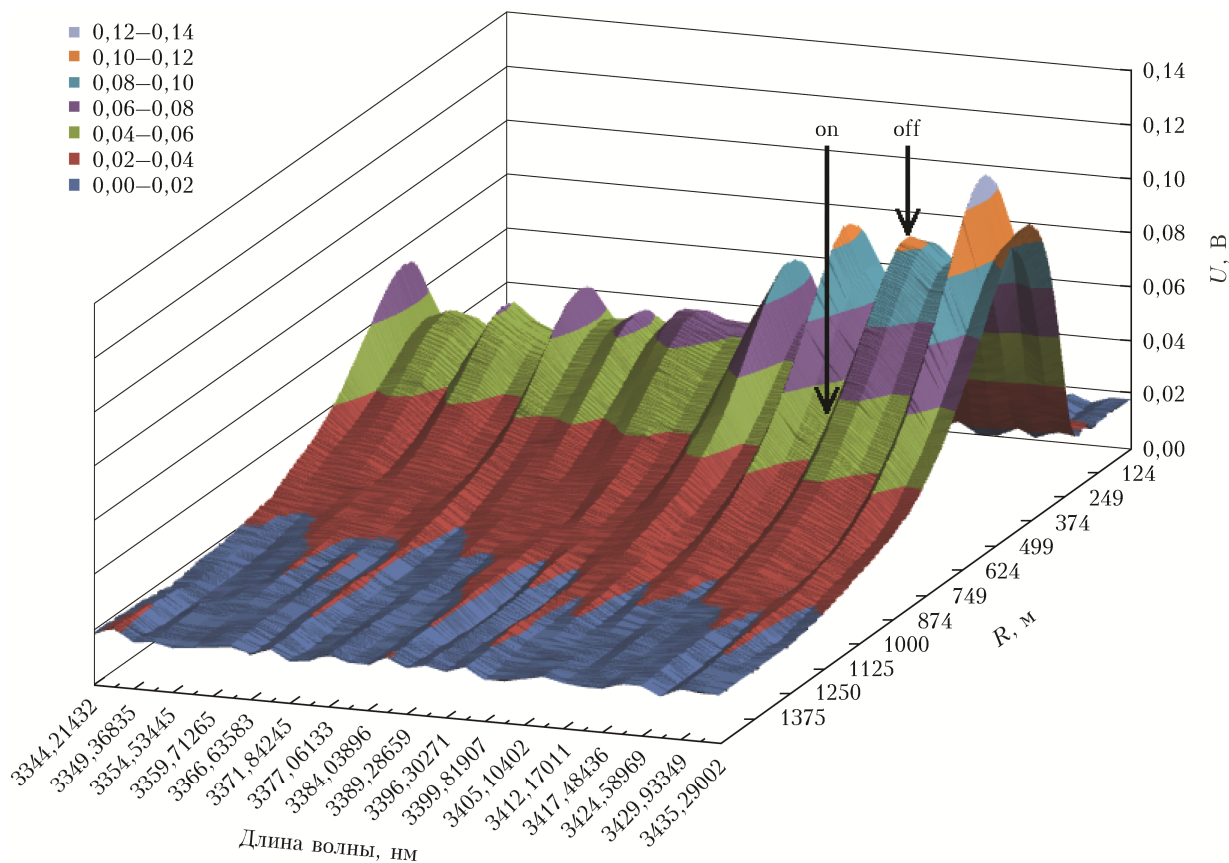


Рис. 6. Лидарный сигнал, полученный при перестройке длины волны в информативном спектральном диапазоне зондирования метана