

АНАЛИЗ ВОЗМОЖНОСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ ДИСТАНЦИОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ДЛЯ ИЗМЕРЕНИЯ КОНЦЕНТРАЦИИ ДИОКСИДА УГЛЕРОДА

А.П. Костерова

kosteroavaap@student.bmstu.ru

МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация

Актуальной задачей для современного мира является контролирование концентраций парниковых газов в атмосфере с использованием дистанционных оптических методов их обнаружения. В данной работе приведены результаты анализа открытых баз спектральных данных в диапазоне волновых чисел $500 \dots 10\,000 \text{ см}^{-1}$ для обнаружения диоксида углерода. Выполнен расчет оптической плотности и смоделированы матрицы кросс-корреляции спектров углекислого газа с компонентами атмосферного воздуха, что позволило определить оптимальные спектральные диапазоны для обнаружения и измерения концентрации углекислого газа в атмосфере. В соответствии с полученными результатами подобраны оптические устройства для детектирования CO_2 , подходящие под установленные диапазоны.

Ключевые слова: углекислый газ, парниковые газы, оптические методы, спектр, оптическая плотность, лидар, инфракрасный перестраиваемый лазер, диодный лазер с распределенной обратной связью, корреляция

Введение. Парниковые газы играют ключевую роль в формировании климата на Земле. Основными парниковыми газами Земли являются водяной пар (H_2O), углекислый газ (CO_2) и метан (CH_4), озон (O_3). Вклад в парниковый эффект также вносят оксиды азота.

Парниковый эффект заключается в нагреве нижних слоев атмосферы благодаря низкой прозрачности парниковых газов в инфракрасном (ИК) диапазоне. Степень влияния парникового эффекта зависит от оптической плотности парниковых газов [1].

Парниковые газы выделяются при сжигании топлива, в различных промышленных процессах, при разложении органических отходов [2]. Развитие сельскохозяйственной промышленности привело к росту концентрации метана в атмосфере [3]. Сжигание ископаемого топлива привело к увеличению содержания диоксида углерода в атмосфере [4].

Оптические методы обнаружения парниковых газов базируются на том, что определенные вещества, такие как углекислый газ (CO_2), метан (CH_4), оксиды азота (NO , N_2O , NO_2), водяной пар (H_2O), имеют характерные линии в спектрах поглощения в ИК-диапазоне. Существуют различные оптические

приборы и датчики, которые, используя данные линии, могут обнаружить и измерить концентрацию этих и других газов в атмосфере.

Методы обнаружения и измерения CO₂. Одним из методов обнаружения и измерения концентрации углекислого газа является недисперсионная инфракрасная спектроскопия (Nondispersive infrared (NDIR) spectroscopy), основанная на абсорбции инфракрасного излучения газом. Сенсоры NDIR работают в инфракрасном диапазоне от 2 мкм до 14 мкм. В датчике CO₂ NDIR-полоса ИК-излучения, создаваемого ИК-источником, очень близка к полосе поглощения CO₂ длиной 4,26 мкм. Соответствие длине волны источника света служит маркером для идентификации молекулы. В [5] была разработана система обнаружения углекислого газа с алгоритмом компенсации воздействия окружающей среды, основанная на технологии недисперсионного инфракрасного излучения.

В работе [6] представлена система для обнаружения диоксида углерода на длине волны 1572 нм с помощью диодного лазера с распределенной обратной связью.

Волоконный лазерный гетеродинный радиометр ближнего ИК-диапазона для одновременного зондирования CO₂ и CH₄ описан в [7]. Зарегистрированы линии CO₂ в диапазоне 6248...6256 см⁻¹.

Система обнаружения CO₂ в ближнем инфракрасном диапазоне, основанная на перестраиваемом диодном лазере с длиной волны 1580 нм, представлена в [8].

Существует метод перестраиваемой диодной лазерной спектроскопии поглощения (Tunable diode laser absorption spectroscopy — TDLAS), с помощью которого можно исследовать определенные вещества с очень низкими концентрациями (порядка миллиардных долей (ppb)). Данный метод основан на лазерной абсорбционной спектроскопии с помощью лазера, перестраиваемого в узком спектральном диапазоне (обычно около одной конкретной линии поглощения).

Обнаружить диоксид углерода можно с помощью космической лидарной системы IPDA в спектральных диапазонах 4800...5100 см⁻¹ [9]. В работе [10] представлен космический лидар для обнаружения CO₂ на длине волны 1,57 мкм.

В данной работе приведен анализ спектров сечения поглощения, который может быть использован для выбора спектральных диапазонов, в которых можно эффективно исследовать наличие углекислого газа и подбирать методы для его обнаружения.

Анализ открытых баз спектральных данных для выбора рабочих спектральных диапазонов. С использованием базы данных HITRAN [11] были смоделированы спектры сечения поглощения в диапазоне волновых чисел от $WN_{\min} = 500 \text{ см}^{-1}$ до $WN_{\max} = 10000 \text{ см}^{-1}$ с параметрами $T = 296 \text{ K}$, $p = 1 \text{ атм}$ и с шагом $WN_{\text{step}} = 0,1 \text{ см}^{-1}$ для CO₂, CO, CH₄, NO, N₂O, NO₂, O₃, H₂O, O₂.

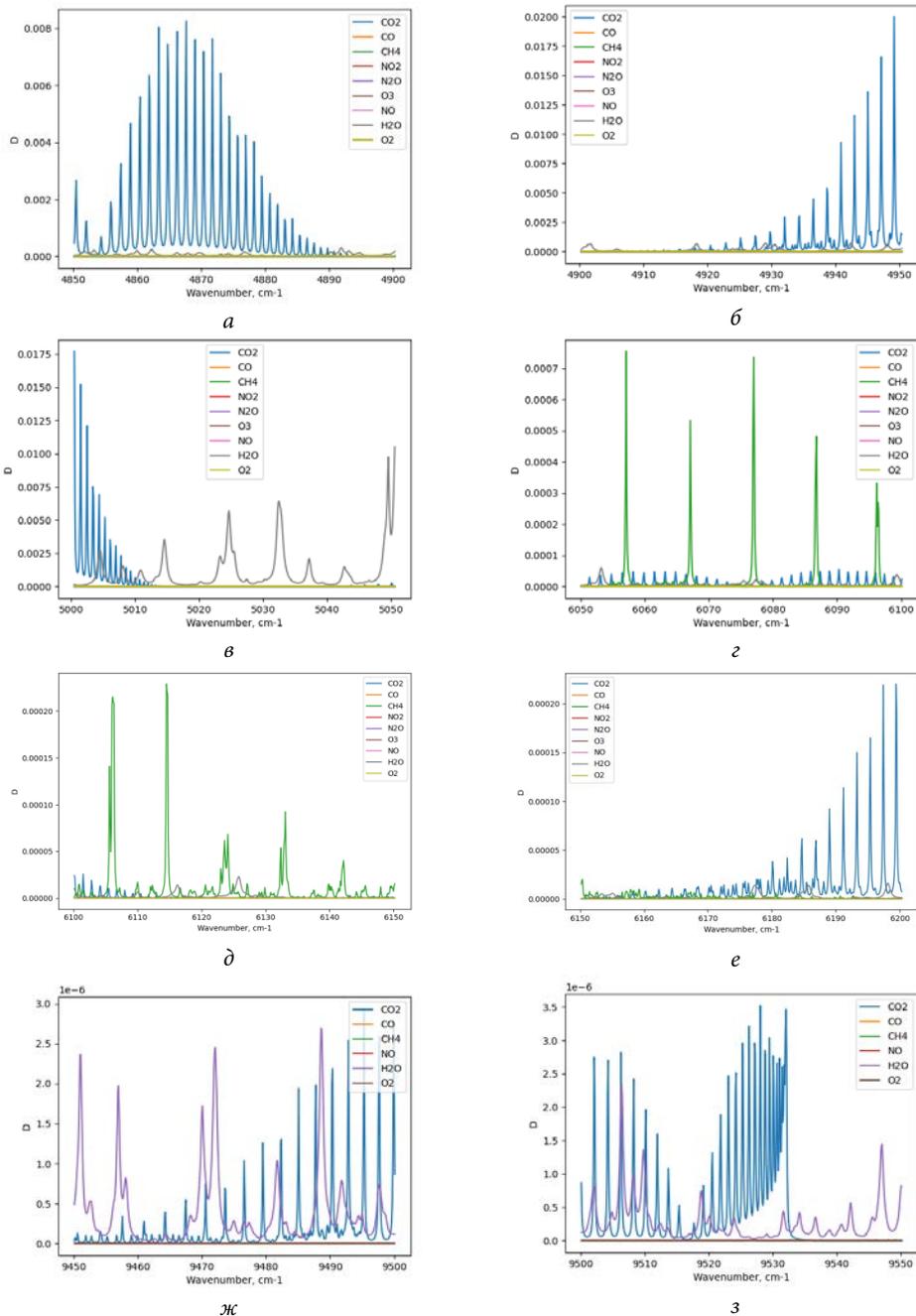


Рис. 1. Графики зависимости оптической плотности D от волновых чисел: *а* — 4850...4900 см⁻¹; *б* — 4900...4950 см⁻¹; *в* — 5000...5050 см⁻¹; *г* — 6050...6100 см⁻¹; *д* — 6100...6150 см⁻¹; *е* — 6150...6200 см⁻¹; *ж* — 9450...9500 см⁻¹; *з* — 9500...9550 см⁻¹

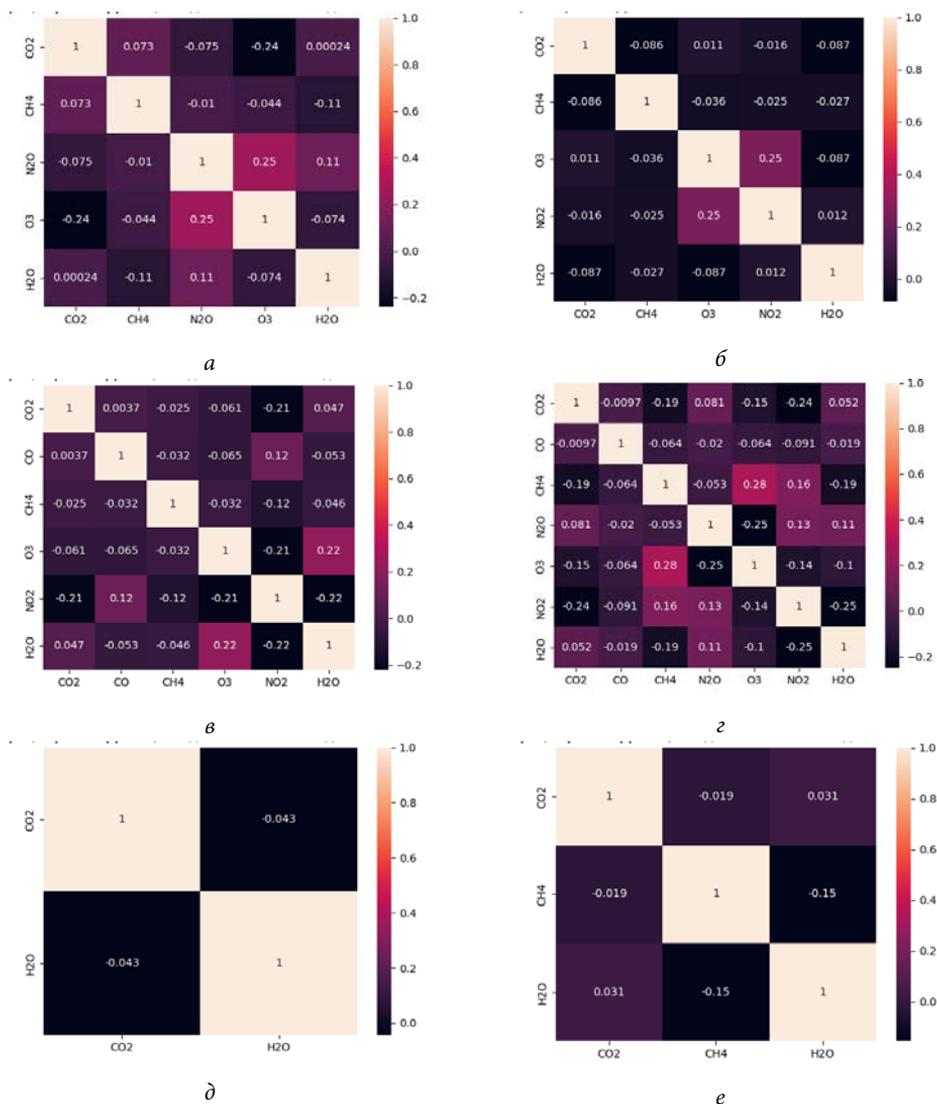


Рис. 2. Матрицы кросс-корреляции спектров сечения поглощения с компонентами атмосферного воздуха в диапазоне:

а — 4900...4950 см^{-1} , линии поглощения CO, NO, NO₂, O₂ отсутствуют; *б* — 6050...6100 см^{-1} , линии поглощения CO, NO, N₂O, O₂ отсутствуют; *в* — 6100...6150 см^{-1} , линии поглощения N₂O, NO, O₂ отсутствуют; *г* — 6150...6200 см^{-1} , линии поглощения NO, O₂ отсутствуют; *д* — 9450...9500 см^{-1} , линии поглощения CO, CH₄, N₂O, O₃, NO₂, NO, O₂ отсутствуют; *е* — 9500...9550 см^{-1} , линии поглощения CO, N₂O, O₃, NO₂, O₂, NO отсутствуют

Энергетический расчет. Расчет оптической плотности D для атмосферных газов осуществляется на основе базы данных HITRAN [11] по формуле

$$D = \frac{lN_A\sigma\rho}{\mu}$$

где σ — сечение поглощения, $\text{см}^2/\text{молекула}$; l — оптическая длина пути, м; N_A — число Авогадро, моль^{-1} ; ρ — плотность газа, $\text{г}/\text{м}^3$; μ — молярная масса газа, $\text{г}/\text{моль}$.

Примеры результатов расчета приведены на рис. 1.

Расчет кросс-корреляций спектров углекислого газа с компонентами атмосферного воздуха. Матрицы кросс-корреляций смоделированных спектров сечения поглощения получены на основе базы данных HITRAN [11].

Для выявления диапазонов с целью обнаружения углекислого газа были построены матрицы кросс-корреляции с компонентами атмосферного воздуха в диапазоне $500 \dots 10\,000 \text{ см}^{-1}$ с шириной спектрального окна 50 см^{-1} и отобраны матрицы с наименьшим коэффициентом корреляции. Примеры полученных матриц кросс-корреляции приведены на рис. 2.

Выводы. Таким образом, на основе открытых баз данных были подобраны спектральные диапазоны, в которых диоксид углерода превосходит другие атмосферные газы, в том числе парниковые, по оптической плотности. Полученные спектральные диапазоны и список приборов, работающих в соответствующих диапазонах, сведены в таблицу.

Спектральные диапазоны для обнаружения CO_2 и приборы, работающие в данных диапазонах

Спектральные диапазоны для обнаружения CO_2 , см^{-1}	Лазеры, излучающие в заданном диапазоне	Источник описания лазера
4800–4850	DFB Laser RLS/EP2051	[12]
4850–4900	DFB Laser RLS/EP2051-DMH	[13]
4900–4950	DFB Laser RLS/EP2004	[14]
4950–5000	2004nm DFB PM Laser diode	[15]
5000–5050	DFB Laser RLS/EP2004	[14]
5050–5100	DFB Laser RLS/EP2051	[12]
6050–6100	1648.2nm TDLAS DFB Laser Chip	[16]
6150–6200	1625nm TDLAS DFB Laser Chip	[17]
6200–6250	1605nm DFB SM Laser diode (TO39)	[18]
6300–6350	1576nm DFB PM laser diode	[19]
6350–6400	1574nm DFB PM laser diode	[20]
6450–6500	1550nm FP PM Module Laser Diodes	[21]

Окончание таблицы

Спектральные диапазоны для обнаружения CO ₂ , см ⁻¹	Лазеры, излучающие в заданном диапазоне	Источник описания лазера
9450–9500	1053nm DFB PM Laser diode	[22]
9500–9550	1046nm SM Narrow Linewidth Laser Diodes	[23]

Полученная информация может быть использована для качественного подбора оптического оборудования и спектральных диапазонов при исследовании парниковых газов.

Литература

- [1] Lindsey R. *Climate and earth's energy budget*. NASA Earth Observatory, 2009, vol. 680.
- [2] Чернокульский А. Климат как отражение облаков. *Наука и жизнь*, 2017, № 10, с. 70–77.
- [3] Johnson K.A., Johnson D.E. Methane emissions from cattle. *Journal of animal science*, 1995, vol. 73, no. 8, pp. 2483–2492. <https://doi.org/10.2527/1995.7382483x>
- [4] Prentice I.C., Farquhar G.D., Fasham M.J.R. et al. The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide. *Climate change 2001: the scientific basis, Intergovernmental panel on climate change*, 2001, pp. 185–187.
- [5] Zhou L. et al. Carbon dioxide sensor module based on NDIR technology. *Micromachines*, 2021, vol. 12, no. 7, art. 845. <https://doi.org/10.3390/mi12070845>
- [6] Koskinen V. et al. Cantilever enhanced photoacoustic detection of carbon dioxide using a tunable diode laser source. *Applied Physics B*, 2007, vol. 86, no. 3, pp. 451–454. <https://doi.org/10.1007/s00340-006-2560-z>
- [7] Wang J. et al. A fibered near-infrared laser heterodyne radiometer for simultaneous remote sensing of atmospheric CO₂ and CH₄. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, vol. 129, pp. 106083. <http://dx.doi.org/10.1016/j.optlaseng.2020.106083>
- [8] Li G., Dong E., Ji W. A near-infrared trace CO₂ detection system based on an 1,580 nm tunable diode laser using a cascaded integrator comb (CIC) filter-assisted wavelength modulation technique and a digital lock-in amplifier. *Frontiers in Physics*, 2019, vol. 7, pp. 199. <http://dx.doi.org/10.3389/fphy.2019.00199>
- [9] NASA Science Editorial Team. *First Flights for CO₂-Detecting Lidar*. URL: <https://science.nasa.gov/science-research/science-enabling-technology/technology-highlights/first-flights-co2-detecting-lidar/> (accessed December 4, 2023).
- [10] Zhu Y. et al. Airborne validation experiment of 1.57- μ m double-pulse IPDA LIDAR for atmospheric carbon dioxide measurement. *Remote Sensing*, 2020, vol. 12, no. 12, art. 1999. <https://doi.org/10.3390/rs12121999>

- [11] *Спектроскопия атмосферных газов*. URL: <https://spectra.iao.ru/home> (дата обращения 20.11.2023).
- [12] *1572nm DFB SM Laser diode (Type B)*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=934> (дата обращения 2023-12-12)
- [13] *[1570nm DFB PM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=567> (accessed December 12, 2023).
- [14] *1570nm DFB SM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=566> (accessed December 12, 2023).
- [15] *2004nm DFB PM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=442> (accessed December 12, 2023).
- [16] *1648.2nm DFB Laser Chip*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=548> (accessed December 12, 2023).
- [17] *1625nm DFB Laser Chip*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=547> (accessed December 12, 2023).
- [18] *1605nm DFB SM Laser diode (TO39)*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=830> (accessed December 12, 2023).
- [19] *1576nm DFB PM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=576> (accessed December 12, 2023).
- [20] *1574nm DFB PM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=582> (accessed December 12, 2023).
- [21] *1550nm FP PM Module Laser Diodes*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=471> (accessed December 12, 2023).
- [22] *1053nm DFB PM Laser diode*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=453> (accessed December 12, 2023).
- [23] *1046 nm SM Narrow Linewidth Laser Diodes*. Available at: <http://ld-pd.com/?a=cpinfo&id=1361> (accessed December 12, 2023).

Поступила в редакцию 25.04.2024

Костерова Алиса Павловна — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва Российская Федерация.

Научный руководитель — Фуфурин Игорь Леонидович, кандидат физико-математических наук, доцент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация. SPIN-код: 5564-4733

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Костерова А.П. Анализ возможностей применения дистанционных оптических методов для измерения концентрации диоксида углерода. *Политехнический молодежный журнал*, 2024, № 03 (92). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/instph/976.html>

ANALYZING POSSIBILITIES IN USING THE REMOTE OPTICAL METHODS TO MEASURE THE CARBON DIOXIDE CONCENTRATION

A.P. Kosterova

kosterovaap@student.bmstu.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Control over the greenhouse gas concentration in the atmosphere using their remote detection optical means appears to be an urgent task in the contemporary world. The paper presents results of analyzing the open spectral databases in the wavenumber range of 500...10.000 cm^{-1} to identify the carbon dioxide. It provides computation results of the optical density and simulation matrices of the carbon dioxide spectra cross-correlation with the atmospheric air components making it possible to determine the optimal spectral ranges in detecting and measuring the carbon dioxide concentration in the atmosphere. In accordance with the obtained results, optical devices for identifying the CO_2 suitable for the established ranges are selected.

Keywords: carbon dioxide, greenhouse gases, optical methods, spectrum, optical density, lidar, infrared tunable laser, diode laser with distributed feedback, correlation

Received 25.04.2024

Kosterova A.P. — Student, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Scientific advisor — Fufurin I.L., Ph. D. (Phys.-Math.), Associate Professor, Department of Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation. SPIN-code: 5564-4733.

Please cite this article in English as:

Kosterova A.P. Analyzing possibilities in using the remote optical methods to measure the carbon dioxide concentration. *Politekhnicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2024, no. 03 (92). (In Russ.). URL: <https://ptsj.bmstu.ru/catalog/phys/instph/976.html>