

ОЦЕНКА СОДЕРЖАНИЯ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В АТМОСФЕРЕ С ПОМОЩЬЮ ДИНАМИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

А.А. Будников

aleksrioto93697@mail.ru

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

Аннотация

Атмосфера Земли состоит из различных газов и частиц аэрозоля. Без водяного пара, содержание которого составляет до 4 %, атмосфера на 99,9 % состоит из кислорода, азота и аргона. Однако парниковые газы, содержащиеся в 0,1 %-ном остатке, оказывают сильное влияние на атмосферные процессы, такие как погода, климат, взаимодействие поверхности Земли с солнечным излучением. Парниковые газы поглощают собственное тепловое излучение Земли, увеличивая среднюю температуру воздуха. Избыточная концентрация парниковых газов представляет угрозу стабильности земных климатических условий, приводит к глобальному потеплению, что в данный момент является главной экологической проблемой человечества. В статье представлены результаты мониторинга содержания парниковых газов в открытой атмосфере. Работа осуществлялась с помощью макета на основе динамического фурье-спектрометра, который способен регистрировать инфракрасные спектры поглощения в диапазоне длин волн от 1,0 до 2,2 мкм со спектральным разрешением 10 см^{-1} . Проведена запись значений коэффициента пропускания атмосферы в условиях городской инфраструктуры. По результатам обработанных данных была получена информация об изменении объемных концентраций углекислого газа (CO_2) и метана (CH_4).

Ключевые слова

Инфракрасные спектры поглощения, углекислый газ, метан, инфракрасная спектрометрия, динамический фурье-спектрометр, спектральный коэффициент пропускания, интегральная концентрация, объемная концентрация

Поступила в редакцию 31.05.2023

© МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2023

Введение. Увеличение концентраций парниковых газов в атмосфере имеет антропогенный характер. Работа промышленных предприятий, активность автодорог ежедневно способствуют выбросам в атмосферу загрязняющих веществ, в первую очередь углекислого газа и метана. Тенденция к росту концентраций этих веществ наблюдается как с помощью сетей наземных фурье-спектрометров [1], так и с помощью измерений из космоса [2, 3]. Такие системы созданы для постоянного мониторинга содержания загрязняющих веществ в атмосфере. Однако их концентрации сильно различаются в зависимости от места измерения. Так, вблизи источников парниковых газов их концентрация,

очевидно, будет больше. Соответственно, требуются мобильные и эффективные приборы для измерения спектра атмосферы на локальном участке местности.

Подходя вплотную к решению задачи спектрального анализа веществ, загрязняющих земную атмосферу, стоит подразделить методы исследования на два класса: взятие пробы и беспроботборный метод. В первом случае некий малый объем атмосферного газа заключают в специальный сосуд (кювету). Далее его помещают в стационарный инфракрасный (ИК) спектрометр, где облучают электромагнитными волнами в некотором частотном диапазоне. В итоге получают обработанный сигнал в виде спектра данной пробы.

Этот метод имеет свои недостатки. Во-первых, протокол помещения пробы в кювету должен быть хорошо отточен во избежание попадания в пробу мешающих примесей, сама кювета должна быть идеально чистой и прочее. Во-вторых, метод взятия пробы сильно зависит от места взятия и погодных условий. Исключить подобные недостатки поможет беспроботборный метод. Суть его заключается в регистрации и анализе прошедшего солнечного излучения либо собственного теплового излучения исследуемого объекта (пассивные методы) или излучения от внешнего источника (активные методы) на открытой трассе.

Большинство используемых для мониторинга атмосферы спектрометров проводят регистрацию спектров поглощения в диапазоне длин волн 8...14 мкм, поскольку примерно в этом диапазоне находится наиболее информативное окно прозрачности атмосферы. Однако в ближнем ИК-диапазоне (0,8...2,2 мкм) также содержатся линии поглощения молекул парниковых газов CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 , CO . Эксперименты в этой области могут проводиться как в пассивном режиме с захватом открытой трассы, так и в активном режиме с использованием источника ИК-излучения.

Цель данного исследования заключается в измерении ИК-спектров парниковых газов с помощью динамического фурье-спектрометра, работающего в ближнем ИК-диапазоне. В активном режиме использовали ИК-прожектор, обеспечивающий ИК-подсветку вдоль трассы между двумя зданиями. В пассивном режиме приемник спектрометра захватывал отраженное солнечное излучение (на этом эффекте основан принцип работы космических систем мониторинга атмосферы). По полученным данным рассчитывали объемные концентрации CO_2 и CH_4 .

Конструкция макета. Классические дисперсионные приборы не отличаются высокой чувствительностью. Применение инфракрасной фурье-спектроскопии позволяет избежать подобных ограничений и достичь определенных преимуществ в скорости и чувствительности [4]. Можно выделить следующие достоинства метода:

- 1) мультиплексность: все длины волн одновременно регистрируются детектором;

2) высокая светосила: геометрический фактор фурье-спектрометра в 100–300 раз превышает геометрический фактор дифракционного спектрометра [5], за счет чего во много раз больший световой поток излучения поступает к детектору;

3) лазер как эталон: все длины волн автоматически соотносятся с He–Ne-лазером как внутренним стандартом;

4) быстрое действие при записи интерферограмм позволяет проводить экспресс-анализ спектров.

Поскольку светосила фурье-спектрометра по сравнению с дисперсионным спектрометром значительно больше, а быстрая регистрация и накопление позволяют улучшить отношение сигнал/шум, то и чувствительность фурье-спектрометров на два, а то и на три порядка выше, чем в традиционной ИК-спектроскопии [6].

Таким образом, в данной работе предлагается использовать систему на базе динамического фурье-спектрометра (ДФС). Его схема была реализована в виде функционирующего макета (рис. 1). Натурные испытания макета определили его эффективность при регистрации спектра земной атмосферы.

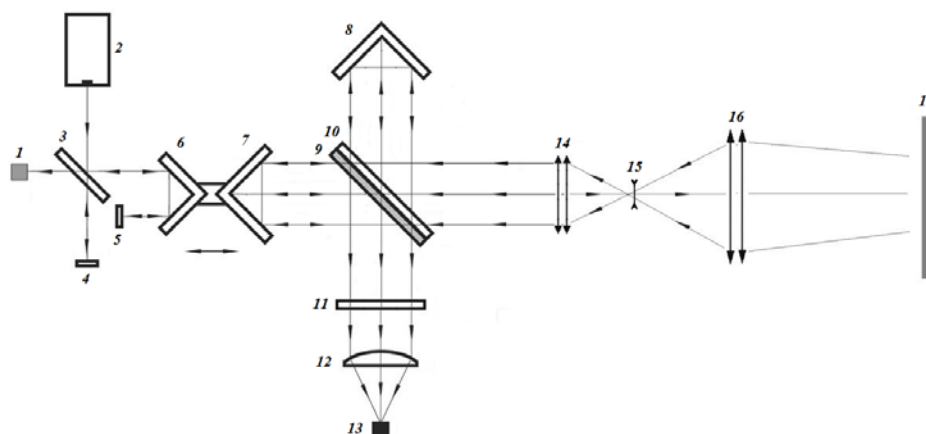


Рис. 1. Оптическая схема макета ДФС:

1 — приемник референтного канала; 2 — лазер с длиной волны 632 нм; 3 — светоделитель референтного канала; 4, 5 — плоские зеркала; 6 — диэдр; 7, 8 — уголковые отражатели; 9 — компенсатор; 10 — светоделитель; 11 — длинноволновый фильтр; 12 — фокусирующая линза; 13 — приемник излучения основного канала; 14, 15, 16 — телескопический объектив; 17 — исследуемая область атмосферы

Для уменьшения искажений спектра используется пара уголковых отражателей 7–8. Отраженный пучок света остается параллельным самому себе даже при изменении угла наклона уголкового отражателя. Благодаря этому обеспечивается стабильность работы ДФС при наклонах устройства. Система отража-

телей 6–7 закреплена на подвижном параллелограмме, приводимом в движение с помощью линейного двигателя. Это необходимо для обеспечения стабильности работы ДФС при внешних механических воздействиях. Солнечный свет проходит через изучаемую область атмосферы и попадает во входную систему 14–16, кратность которой равна четырем. Далее параллельный пучок света попадает в интерферометр Майкельсона с уголковыми отражателями, где светоделителем 9–10 распределяется на два когерентных потока. Отраженный поток падает на статичный уголковый отражатель 8 и, отражаясь от него, параллельно движется в обратном направлении, проходит систему 9–10 и с помощью фокусирующей линзы 12 направляется на приемник излучения 13. Длинноволновый фильтр 11 отсекает излучение с длиной волны менее 1 мкм. Второй поток проходит светоделитель 9–10, отражается от подвижного уголкового отражателя 7 и, вновь отражаясь от светоделителя, линзой 12 также фокусируется на приемник 13. В приборе также расположен референтный канал 1–6 с He–Ne-лазером с длиной волны $\lambda = 632$ нм в качестве опорного источника излучения. Технические характеристики макета ДФС представлены ниже:

Спектральный диапазон, мкм	1,0–2,2
Спектральное разрешение, см ⁻¹	10
Угловое поле зрения, град	4
Материал фоточувствительного элемента приемника	InGaAs
Диаметр элемента приемника, мм	2
Входная апертура, мм	100
Кратность входной системы	4

Частота регистрации интерферограмм должна в 2 раза превосходить максимальную частоту опорного сигнала в выбранном диапазоне. Точность определения спектра явным образом связана со спектральным разрешением. Таким образом, минимально необходимое число точек N интерферограммы однозначно определяется спектральным разрешением и рабочим диапазоном спектра [7]:

$$N = \frac{2(v_{\max} - v_{\min})}{\delta v}.$$

В представленном макете ДФС на фотоприемнике регистрируются двухсторонние интерферограммы с числом отсчетов, равным 32 000, что позволяет обеспечить максимальное спектральное разрешение до 2 см⁻¹ при восстановлении ИК-спектров.

Кроме того, существует проблема рассеяния пучка излучения падающего в интерферометр. Иными словами, на подвижное зеркало могут попадать не только лучи, параллельные оси спектрометра, но и лучи, приходящие под углом.

При больших значениях угла отклонения возникает необходимость коррекции значений волновых чисел в восстанавливаемом спектре. Другими словами, боковые лучи вносят искажения в итоговый спектр в виде смещения спектральных линий по шкале волновых чисел. В соответствии с преобразованием Фурье коррекция значений волновых чисел происходит путем домножения на косинус угла отклонения.

Спектральное разрешение $\delta\nu$ обратно пропорционально максимальной оптической разности хода лучей [7, 8]. Отсюда можно получить максимально допустимое значение угла отклонения бокового луча от оси спектрометра, которое рассчитывается по формуле

$$\alpha_{\max} = \sqrt{\frac{2\delta\nu}{\nu_{\max}}}. \quad (*)$$

Как упоминалось выше, спектральное разрешение прибора составляет 10 см^{-1} , а максимальное волновое число равно $10\,000 \text{ см}^{-1}$, что соответствует началу спектрального диапазона (1,0 мкм). Подставив эти значения в уравнение (*), получим $\alpha_{\max} \approx 4^\circ$. Стоит отметить, что при максимальном спектральном разрешении (2 см^{-1}) данное значение составляет порядка 1° .

Результаты эксперимента. На представленном макете были проведены эксперименты, нацеленные на регистрацию линий поглощения CO_2 , CH_4 и O_2 и анализ изменения содержания данных веществ в атмосфере. Измерения проводили на открытой трассе в пассивном и активном режимах. В первом случае источником излучения является Солнце, во втором — ИК-прожектор, располагающийся на трассе.

В пассивном режиме измерения были получены спектры в диапазоне 1,0...1,7 мкм, что соответствует диапазону волновых чисел $5800\text{...}10\,000 \text{ см}^{-1}$. Для CO_2 длина волны составляет 1,40; 1,60; 2,00; 2,70 мкм; для CH_4 — 1,66; 2,20 мкм; для O_2 — 1,06; 1,27; 1,58 мкм [9]. Видно, что в рабочем спектральном диапазоне ДФС присутствуют линии поглощения CO_2 , CH_4 и O_2 с центральными длинами волн 1,60; 1,66 и 1,27 мкм соответственно.

На рис. 2 представлен спектр пропускания атмосферы в ближнем ИК-диапазоне, зарегистрированный на макете ДФС в пассивном режиме. По оси ординат отложен спектральный коэффициент пропускания $T(\nu)$, а по оси абсцисс — волновое число ν (см^{-1}). Также указаны линии поглощения атмосферных газов CO_2 , CH_4 и O_2 . Время регистрации одного спектра составляло 4 с. Спектр получен усреднением по 15 интерферограммам, что соответствует частоте регистрации 1 спектр в минуту.

Наиболее ярко выраженной линией поглощения в спектре является линия O_2 . Концентрация кислорода в нижних слоях атмосферы составляет 20...23 %,

следовательно, глубина линии O_2 в спектре неизменна. Таким образом, нормируя интегральные концентрации CO_2 и CH_4 на O_2 , можно получить их относительное содержание в атмосфере. Поскольку экспериментально полученное значение ширины линий составляет 10 см^{-1} , можно наблюдать лишь кривую, огибающую линии колебательно-вращательных переходов. Сами они могут быть обнаружены только при большем спектральном разрешении.

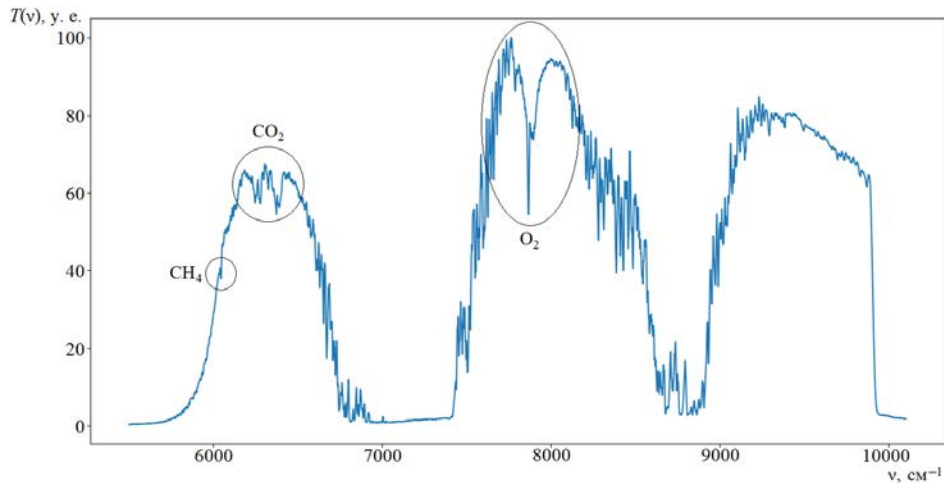


Рис. 2. Спектр пропускания атмосферы в ближнем ИК-диапазоне

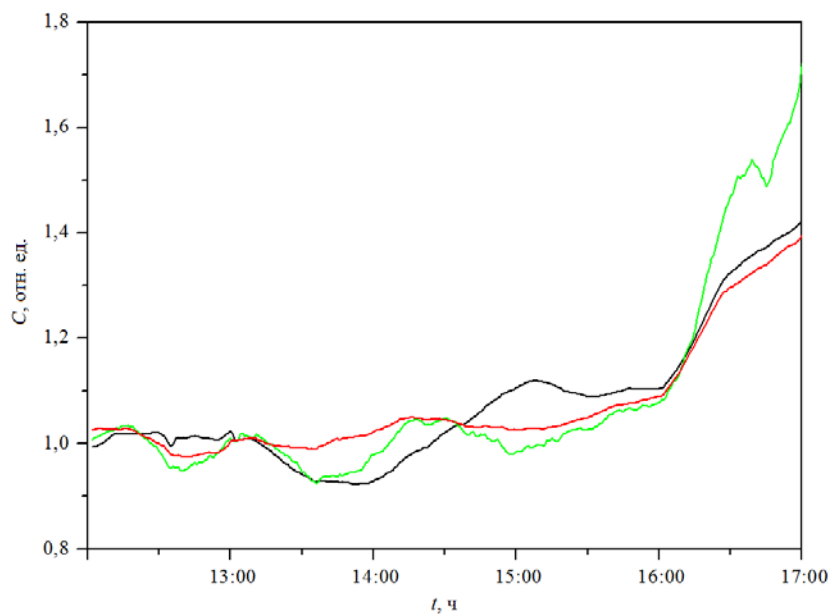


Рис. 3. Зависимости интегральных концентраций газов CH_4 (—), O_2 (—), CO_2 (—) от времени

Запись спектров пропускания атмосферы в пассивном режиме проводили в течение 5 ч. По полученным данным рассчитывали интегральные концентрации O_2 , CO_2 и CH_4 , которые определялись глубиной линий поглощения в спектре. Временная зависимость интегральных концентраций O_2 , CO_2 и CH_4 представлена на рис. 3. Линии имеют общую тенденцию к росту и падению концентраций. В вечернее время наблюдается резкий рост интегральных концентраций, что вызвано увеличением длины оптической трассы в атмосфере за счет захода солнца за горизонт.

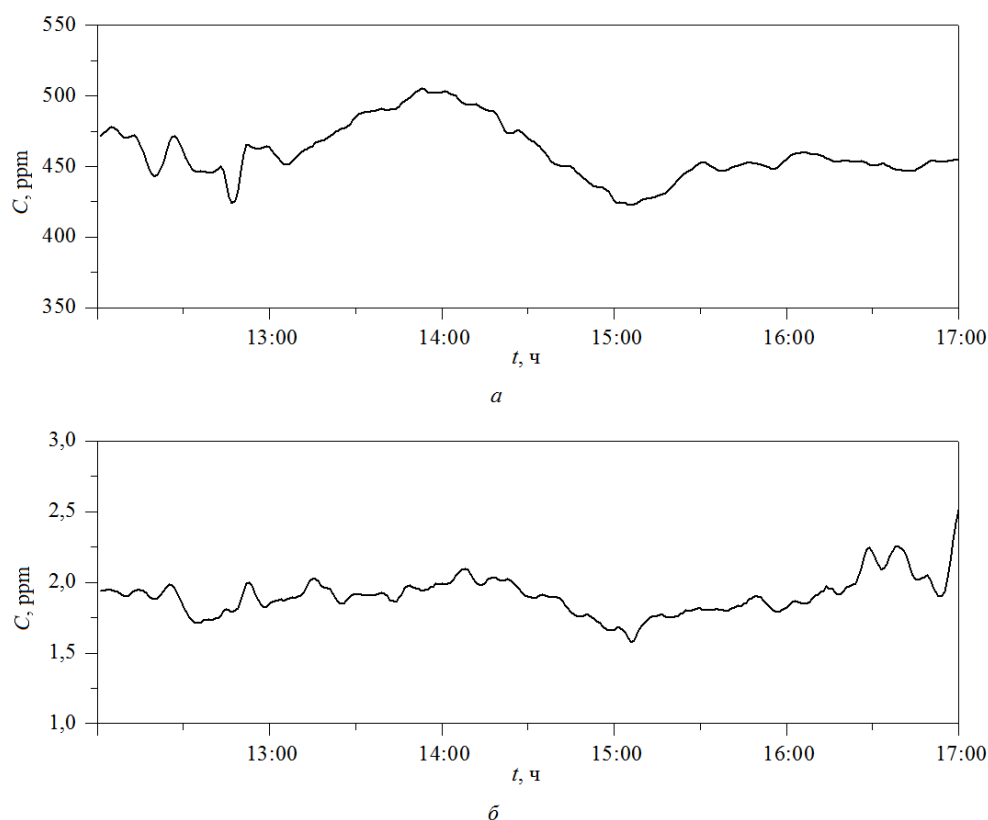


Рис. 4. Зависимости объемных концентраций газов CO_2 (а) и CH_4 (б) от времени

Объемные концентрации газов CO_2 и CH_4 были получены из значений интегральных концентраций с учетом нормировки на глубину линии O_2 . Полученные результаты представлены на рис. 4. Здесь по оси ординат отложена объемная концентрация газа C (ppm), а по оси абсцисс — время t (ч). В качестве начальных условий выбраны значения 470 ppm для CO_2 и 2 ppm для CH_4 как средние концентрации данных веществ в земной атмосфере. Отметим, что для CO_2 в атмосфере характерно среднее значение концентрации 400 ppm, однако

в городе вблизи загруженных дорог это значение составляет 500...600 ppm. На рис. 4 можно проследить динамику изменения объемных концентраций. Хорошо видно, что около 13 ч находится локальный минимум, после которого до 14 ч происходит рост концентраций CO_2 и CH_4 . Далее наблюдается плавное уменьшение концентраций до минимума в 15 ч и последующий плавный рост.

Также были проведены эксперименты по регистрации спектров пропускания атмосферы в активном режиме. В качестве источника излучения был использован инфракрасный прожектор «ОУ-3Г Луна» с рабочим спектральным диапазоном от 1,0 до 2,4 мкм. В активном режиме интенсивность линий поглощения мала, поэтому конструкция макета ДФС была модифицирована. Модификация заключалась в замене фотоприемного устройства на новое с рабочим спектральным диапазоном от 1,0 до 2,4 мкм. Для работы в активном режиме ИК-прожектор располагали в прямой видимости от спектрометра на открытой трассе длиной примерно 250 м между двумя зданиями. Спектры регистрировали в течение 70 мин в вечернее время суток. Спектр пропускания атмосферы, зарегистрированный на макете ДФС в активном режиме, представлен на рис. 5.

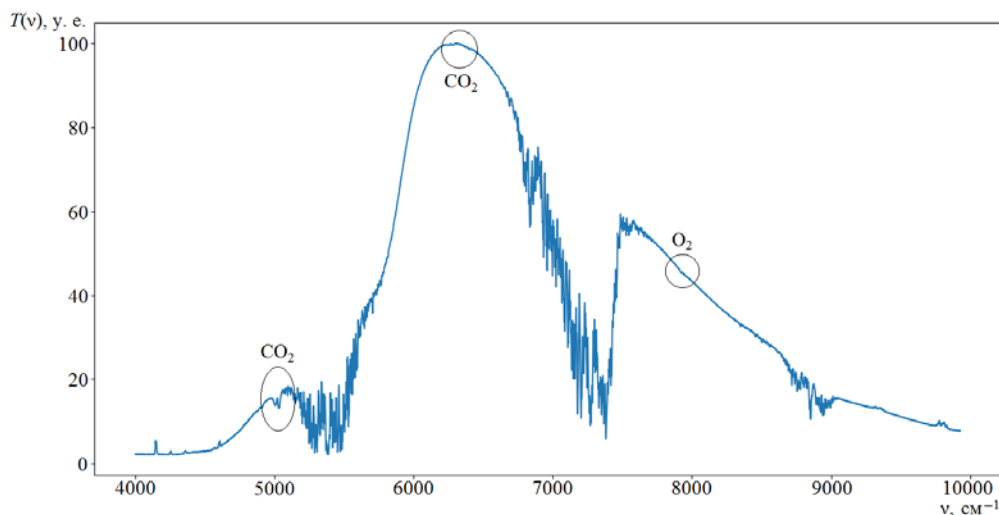


Рис. 5. Спектр пропускания атмосферы в ближнем ИК-диапазоне

Здесь присутствуют две слабые линии поглощения: CO_2 на 1,6 мкм ($6\,250 \text{ см}^{-1}$) и O_2 на 1,27 мкм ($7\,874 \text{ см}^{-1}$). Также за счет расширенного спектрального диапазона наблюдается линия CO_2 на 2,0 мкм ($5\,000 \text{ см}^{-1}$), обладающая относительно большой интенсивностью. Линия же CH_4 на 1,66 мкм ($6\,025 \text{ см}^{-1}$) вовсе не видна в спектре по причине совсем малой интенсивности. Представленный на рис. 5 спектр получен за счет усреднения по 20 интерферограммам, что отвечает общему времени регистрации 1 мин. Однако расчет интегральных концентраций при слабых линиях поглощения затруднителен, поэто-

му было принято решение об увеличении параметра усреднения, т. е. числа усредняемых интерферограмм.

При увеличении параметра усреднения возрастает соотношение сигнал/шум (SNR), что позволяет выделить линии поглощения. Оптимальным для расчета интегральных концентраций был выбран параметр усреднения, равный 60 при $SNR = 220$. Аналогично вычислениям в пассивном методе, были рассчитаны объемные концентрации CO_2 для линий поглощения с длиной волны 2,0 и 1,6 мкм. Результат представлен на рис. 6. Видно, что форма кривых преимущественно совпадает по положению экстремумов. Однако видно, что локальные максимумы концентрации CO_2 (1,6 мкм) принимают меньшие значения. Предположительно, это связано с тем, что интенсивность линии поглощения CO_2 (1,6 мкм) примерно в 10 раз меньше, чем у линии CO_2 (2,0 мкм).

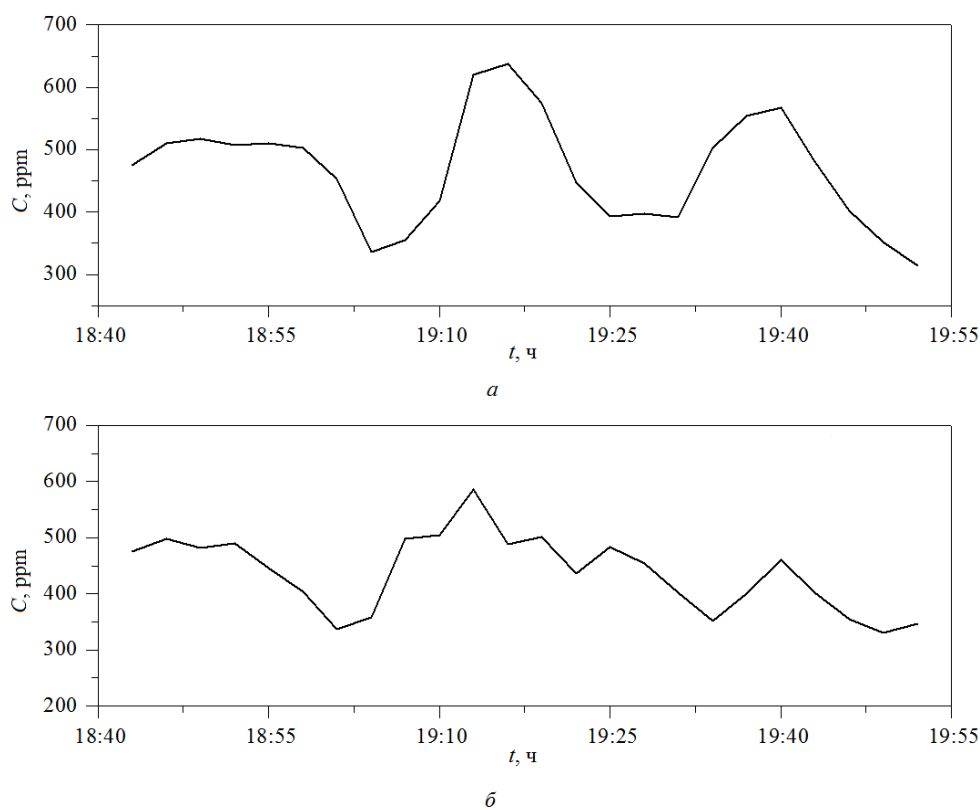


Рис. 6. Зависимости объемных концентраций газа CO_2 от времени:
а — 2,0; б — 1,6 мкм

Заключение. В настоящей работе описана методика регистрации спектров газов CO_2 и CH_4 . Представлен макет, разработанный на базе динамического фурье-спектрометра, который позволяет регистрировать инфракрасные спек-

тры поглощения в диапазоне длин волн от 1,0 до 2,2 мкм со спектральным разрешением 10 см^{-1} .

В пассивном режиме работы макета ДФС была проведена долговременная запись значений спектрального коэффициента пропускания атмосферы в условиях городской инфраструктуры. Спектр содержит линии поглощения CO_2 , CH_4 и O_2 с центральными длинами волн 1,6; 1,66 и 1,27 мкм соответственно. По полученным данным осуществляли мониторинг интегральных и объемных концентраций CO_2 и CH_4 . Показано, что поведение временных зависимостей объемных концентраций диоксида углерода и метана имеет схожий характер и напрямую связано с положением солнца на небосклоне.

Запись спектра в активном режиме оказалась возможна только после расширения спектрального диапазона до 2,4 мкм для получения линий поглощения с достаточной интенсивностью. Были зарегистрированы линии поглощения CO_2 и O_2 с длинами волн 1,6 и 1,27 мкм соответственно, как и в пассивном режиме. Эти линии обладали малой интенсивностью. Также была зарегистрирована линия CO_2 на длине волны 2,0 мкм. Было показано, что расчет интегральных концентраций возможен лишь при некотором минимальном значении отношении сигнал/шум, которое в данной работе составило 60. Далее продемонстрирована временная зависимость объемной концентрации CO_2 при контроле двух соответствующих линий поглощения. Сделан вывод о соответствии форм кривых и предположение о том, что расчет по линии 1,6 мкм дает меньшие значения объемной концентрации, чем по линии 2,0 мкм, из-за отношения интенсивностей этих линий порядка 10.

Литература

- [1] Chevallier F., Deutscher N.M., Conway T.H. et al. Global CO_2 fluxes inferred from surface air-sample measurements and from TCCON retrievals of the CO_2 total column. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38 (24), no. 1–5. <http://doi.org/10.1029/2011gl049899>
- [2] Merzdorf Evans J. *NASA Science Enables First-of-its-Kind Detection of Reduced Human CO_2 Emissions*. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/for-the-1st-time-nasa-spots-short-term-drops-in-co2-emissions-from-human-activity> (accessed June 27, 2022).
- [3] Brad Weir, Crisp D., O'Dell C.W. et al. Regional impacts of COVID-19 on carbon dioxide detected worldwide from space. *Science Advances*, 2021, vol. 7, iss. 45.
- [4] Беккер Ю. *Мир химии. Спектроскопия*. Москва, Техносфера, 2009. 528 с.
- [5] Морозов А.Н., Светличный С.И. *Основы фурье-спектрометрии*. Москва, Наука, 2006, 275 с.
- [6] Birch J.R., Clarke F.J.J. Fifty Categories of Ordinate Error in Fourier Transform Spectroscopy. *Spectroscopy Europe*, 1995, vol. 7, no. 4, pp. 16–22.
- [7] Griffiths P.R., De Haseth J.A. *Fourier transform infrared spectrometry*. John Wiley & Sons, 2007, 560 p.
- [8] Kauppinen J., Partanen J. *Fourier transforms in spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2001, 261 p.

- [9] Patadia F., Levy R.C., Mattoo S. Correcting for trace gas absorption when retrieving aerosol optical depth from satellite observations of reflected shortwave radiation. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, no. 11, pp. 3205–3219. <http://doi.org/10.5194/amt-2018-7>

Будников Александр Александрович — студент кафедры «Физика», МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Российская Федерация.

Научный руководитель — Голяк Илья Семенович, кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник АО «ЦПФ МГТУ им. Н.Э. Баумана», Москва, Российская Федерация.

Ссылку на эту статью просим оформлять следующим образом:

Будников А.А. Оценка содержания парниковых газов в атмосфере с помощью динамического фурье-спектрометра. *Политехнический молодежный журнал*, 2023, № 06 (83). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-905>

**ASSESSMENT OF THE GREENHOUSE GASES CONTENT
IN THE ATMOSPHERE USING A DYNAMIC FOURIER SPECTROMETER**

A.A. Budnikov

aleksrioto93697@mail.ru

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

Abstract

The Earth atmosphere consists of various gases and aerosol particles. Without water vapor, which content is up to 4 %, the atmosphere consists by 99.9 % of oxygen, nitrogen and argon. However, the greenhouse gases contained in the 0.1 % residue are significantly influencing the atmospheric processes such as weather, climate and interaction between the Earth surface and the solar radiation. Greenhouse gases absorb the Earth own thermal radiation and increase the average air temperature. Excessive concentration of the greenhouse gases poses a threat to stability of the Earth climatic conditions and leads to global warming, which is currently the main ecological problem for the humanity. The article presents results of monitoring the greenhouse gases content in the open atmosphere. The work was carried out using a prototype based on the dynamic Fourier spectrometer, which is capable of registering the infrared absorption spectra in the wavelength range from 1.0 to 2.2 μm with a spectral resolution of 10 cm^{-1} . The values of the atmospheric transmittance were registered in the urban infrastructure conditions. Based on the results of the processed data, information was obtained on alterations in the volumetric concentrations of carbon dioxide (CO_2) and methane (CH_4).

Keywords

Infrared absorption spectra, carbon dioxide, methane, infrared spectrometry, dynamic Fourier spectrometer, spectral transmittance, integral concentration, volumetric concentration

Received 31.05.2023

© Bauman Moscow State Technical
University, 2023

References

- [1] Chevallier F., Deutscher N.M., Conway T.H. et al. Global CO_2 fluxes inferred from surface air-sample measurements and from TCCON retrievals of the CO_2 total column. *Geophysical Research Letters*, 2011, vol. 38 (24), no. 1–5. <http://doi.org/10.1029/2011gl049899>
- [2] Merzdorf Evans J. *NASA Science Enables First-of-its-Kind Detection of Reduced Human CO_2 Emissions*. URL: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2022/for-the-1st-time-nasa-spots-short-term-drops-in-co2-emissions-from-human-activity> (accessed June 27, 2022).
- [3] Brad Weir, Crisp D., O'Dell C.W. et al. Regional impacts of COVID-19 on carbon dioxide detected worldwide from space. *Science Advances*, 2021, vol. 7, iss. 45.
- [4] B ecker J. *Spectroscopy: Instrumental analysis with atomic and molecular spectrometry*. W urzburg, Vogel Communications Group GmbH & Co. KG, 1997, 528 p. (Russ. ed.: Becker J. *Spektroskopiya*. Moscow, Tekhnosfera Publ., 2009, 528 p.).

- [5] Morozov A.N., Svetlichnyy S.I. *Osnovy fur'e-spektroradiometrii* [Fundamentals of Fourier Spectroradiometry]. Moscow, Nauka Publ., 2006, 275 p. (In Russ.).
- [6] Birch J.R., Clarke F.J.J. Fifty Categories of Ordinate Error in Fourier Transform Spectroscopy. *Spectroscopy Europe*, 1995, vol. 7, no. 4, pp. 16–22.
- [7] Griffiths P.R., De Haseth J.A. *Fourier transform infrared spectrometry*. John Wiley & Sons, 2007, 560 p.
- [8] Kauppinen J., Partanen J. *Fourier transforms in spectroscopy*. John Wiley & Sons, 2001, 261 p.
- [9] Patadia F., Levy R.C., Mattoo S. Correcting for trace gas absorption when retrieving aerosol optical depth from satellite observations of reflected shortwave radiation. *Atmos. Meas. Tech.*, 2018, no. 11, pp. 3205–3219. <http://doi.org/10.5194/amt-2018-7>

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

Academic advisor — Golyak I.S., Ph. D. (Phys.-Math.), Senior Researcher, JSC Center of Applied Physics, Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation.

Please cite this article in English as:

Budnikov A.A. Assessment of the greenhouse gases content in the atmosphere using a dynamic Fourier spectrometer. *Politekhicheskiy molodezhnyy zhurnal*, 2023, no. 06 (83). (In Russ.). <http://dx.doi.org/10.18698/2541-8009-2023-6-905>