
СТРОЕНИЕ ХИМИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ,
КВАНТОВАЯ ХИМИЯ, СПЕКТРОСКОПИЯ

УДК 681.785.574

МОНИТОРИНГ ПАРНИКОВЫХ ГАЗОВ В ОТКРЫТОЙ АТМОСФЕРЕ
МЕТОДОМ ФУРЬЕ-СПЕКТРОСКОПИИ

© 2023 г. Ил. С. Голяк^{1,2*}, Д. Р. Анфимов^{1,2}, И. Б. Винтайкин^{1,2}, Иг. С. Голяк^{1,2}, М. С. Дроздов³,
А. Н. Морозов^{1,2}, С. И. Светличный³, С. Е. Табалин^{1,2}, Л. Н. Тимашова¹, И. Л. Фуфурин^{1,2}

¹Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

²Центр прикладной физики Московского государственного технического университета им. Н.Э. Баумана,
Москва, Россия

³Федеральный исследовательский центр химической физики им. Н.Н. Семёнова Российской академии наук,
Москва, Россия

*E-mail: iliyagol@mail.ru

Поступила в редакцию 06.09.2022;

после доработки 11.10.2022;

принята в печать 20.10.2022

Появление в атмосфере избыточной концентрации парниковых газов, которые, накапливаясь в ней, поглощают тепловое излучение Земли и частично возвращают его на земную поверхность, приводит к стремительному росту глобальной средней температуры воздуха и, как следствие, изменению климата. К парниковым относятся газы с высокой прозрачностью в видимом диапазоне и активным поглощением в тепловом инфракрасном диапазоне. В настоящей работе предложена новая методика регистрации спектров парниковых газов CO_2 и CH_4 . Представлен макет, разработанный на базе динамического фурье-спектрометра, который регистрировал спектры ИК-поглощения в диапазоне длин волн 1.0–1.7 мкм со спектральным разрешением 10 см^{-1} . Проведена долговременная запись коэффициента пропускания атмосферы в условиях городской застройки. По полученным данным осуществлялся контроль интегральной и объемной концентраций CO_2 и CH_4 . Показано, что поведение временных зависимостей объемных концентраций углекислого газа и метана хорошо отражает степень загруженности дорог. Уменьшение объемной концентрации в вечернее время объясняется увеличением оптической трассы и дополнительным захватом массы воздуха, находящегося за пределами области интенсивного движения.

Ключевые слова: динамический фурье-спектрометр, спектры ИК-поглощения, диоксид углерода, метан, парниковые газы.

DOI: 10.31857/S0207401X23040088, **EDN:** MWUOKF

1. ВВЕДЕНИЕ

Глобальное потепление является актуальной проблемой, и с каждым годом внимание к ней неуклонно растет [1]. В первую очередь это обусловлено антропогенными выбросами парниковых газов в атмосферу [2–6]: диоксида углерода и метана. Постоянное увеличение концентраций CO_2 и CH_4 в атмосфере отмечено глобальной сетью наземных локальных измерений [7], которые позволяют отслеживать масштабные изменения концентраций парниковых газов, а также строить прогнозы. Однако для количественной оценки отдельных источников и поглотителей парниковых газов требуются непосредственные измерения в региональных [8], городских [9], сельскохозяйственных [10] и промышленных [11] средах, расположенных рядом с ними.

Так, в работе [12] показано, что двухкилометровая сеть локальных датчиков в районе залива Сан-Франциско способна оценить концентрацию вблизи источников CO_2 с 5%-ной точностью. Авторы работы [13] применили сеть из пяти мобильных датчиков CO_2 в городском районе Ванкувера в сочетании с аэродинамической моделью для расчета потоков диоксида углерода. Такие измерения чувствительны к локальной среде и способны отражать средние концентрации эмиссии CO_2 . Измерения спектра оптического поглощения на открытой трассе (ОТ) между источником света и измерительным прибором обеспечивают пространственно-усредненные концентрации газов.

Пространственное усреднение является эффективным при объединении результатов измерений и моделей для определения локализованных источников и поглотителей парниковых га-

зов. Однако существует проблема определения точности усредненных по пространству концентраций следовых газов. Хорошо зарекомендовавшим себя методом исследования поверхности приземного слоя (без учета спутниковых данных) является дифференциальная спектроскопия оптического поглощения (differential optical absorption spectroscopy, DOAS), где наряду с ультрафиолетовым (УФ) и видимым спектральными диапазонами [14] используется фурье-спектроскопия с открытым трактом (open path Fourier transform spectroscopy, OP-FTS) в средней инфракрасной (ИК) области [13, 15–20]. При использовании метода DOAS по трассе протяженностью несколько километров линии поглощения для точных измерений CO_2 , CH_4 и других парниковых газов недоступны в УФ- и видимом диапазонах спектра. В тоже время эти линии присутствуют в среднем ИК-диапазоне спектра, однако их число определяется спектром широкополосного источника (например, таким как глобар, имеющим низкую яркость). Это обстоятельство ограничивает протяженность трассы во время измерения несколькими сотнями метров.

Интерес к ближней ИК-области (near-infrared, NIR) спектра возник в связи с тем, что этот диапазон содержит колебательно-вращательные линии поглощения молекул парниковых газов CO_2 , CH_4 , N_2O , O_3 и CO [21]. Для экспериментов в данном диапазоне могут применяться широкополосные источники излучения (галогеновая лампа, ИК-прожекторы со сферическим рефлектором и др.), обеспечивающие хорошую коллимацию луча на километровых трассах. В последнее время в системах DOAS ближнего ИК-диапазона стали применяться широкополосные лазерные источники [22, 23]. В работах [24, 25] впервые применили частотную гребенчатую спектроскопию для измерения CO_2 и CH_4 в ближнем ИК-диапазоне на трассе протяженностью 2 км. В совокупности эти методы позволили достичь сходимости измерений на уровне 1 ppm для CO_2 по сравнению с локальными измерениями.

Другие разработки используют перестраиваемые диодные лазерные системы (tunable diode laser, TDL) [26–28] и лазерные анализаторы с открытым трактом (Boreal Laser Inc., Canada). Однако системы TDL, как правило, применимы только к одному целевому газу.

Быстрое развитие общей сети наблюдений за углеродными столбами [29] показало, что ближний ИК-диапазон с наземным фурье-спектрометром и Солнцем в качестве источника излучения подходит для высокоточных и воспроизводимых (с точностью $<0.2\%$) измерений содержания CO_2 , CH_4 , N_2O и других остаточных газов. В работах [30, 31] применялись одновременно сканирующий абсорбционный спектрометр [32] для кар-

тографии атмосферы и спутник [33] для наблюдения за парниковыми газами. В работе [17] была проведена оценка эффективности фурье-спектрометров в средней ИК-области и получена точность, составляющая несколько процентов без калибровки по стандартам.

Цель данного исследования – измерение спектров парниковых газов с помощью фурье-спектрометра, работающего в ближнем ИК-диапазоне (1.0–1.7 мкм) в активном и пассивном режимах. Активный режим предполагал применение ИК-подсветки для исследования углеродной эмиссии карбонового полигона, а пассивный – работу по отраженному солнечному излучению, что является особенно актуальным для систем космического базирования. По полученным спектрам осуществляли расчет интегральной и объемной концентраций CO_2 и CH_4 .

2. ОПТИЧЕСКАЯ СХЕМА ДИНАМИЧЕСКОГО ФУРЬЕ-СПЕКТРОМЕТРА

Традиционно регистрация спектров ИК-поглощения осуществляется с применением дифракционных спектрометров [34], статических фурье-спектрометров [35–37] или динамических фурье-спектрометров (ДФС) [38–40]. Однако ДФС имеют наилучшее спектральное разрешение, большую светосилу и позволяют работать в широком спектральном диапазоне [38], поэтому в данной работе для регистрации спектров поглощения парниковых газов была разработана система, построенная на основе ДФС [38]. Конструкция макета ДФС представлена на рис. 1, а его оптическая схема приведена на рис. 2.

Преимущество данного спектрометра заключается в использовании уголковых отражателей 4 и 5 с апертурой 36 мм и угловым отклонением 1 угл.с (см. рис. 2) в качестве зеркал основного канала. Их применение в макете ДФС обеспечивает надежность и стабильность работы [41], поскольку падающий на них пучок света остается параллельным отраженному пучку даже при значительных наклонах ретроотражателя. Для обеспечения устойчивости макета ДФС к внешним механическим воздействиям один уголковый отражатель установлен на подвижном параллелограмме. Смещение зеркала интерферометра в одну сторону составляет около 4 мм.

Процесс формирования сигнала основного канала [42] выглядит следующим образом. Регистрируемое излучение формируется на входе интерферометра с помощью телескопа 1, 2 и делится на светоделителе 3 на два когерентных потока: отраженный и прошедший. Отраженный поток падает на неподвижный уголковый отражатель 4, отражается от него и идет в строго обратном направлении, проходит через светоделитель 3 и на-

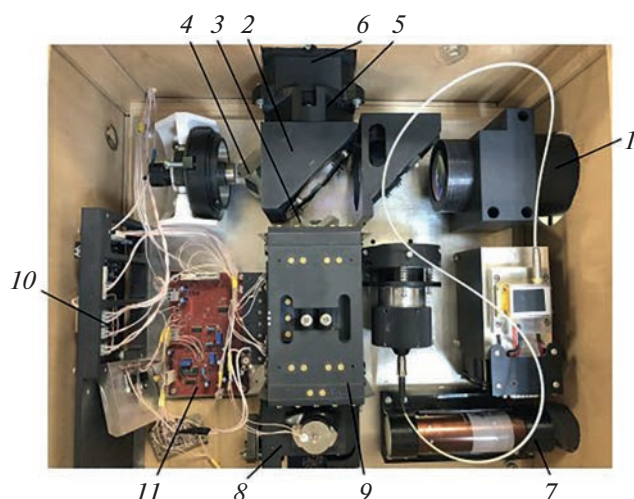


Рис. 1. Конструкция макета ДФС: 1 – входной объектив; 2 – светоделитель; 3, 4 – уголкового отражатели; 5 – фокусирующий объектив; 6 – приемник излучения основного канала; 7 – He–Ne лазер, 632 нм; 8 – референтный канал; 9 – параллелограмм; 10 – плата питания; 11 – плата управления линейным приводом.

правляется посредством фокусирующего объектива 7 на приемник излучения 8. Прошедший через светоделитель 3 поток отражается от подвижного уголкового отражателя 5 и, вторично отражаясь от светоделителя 3, также направляется посредством фокусирующего объектива 7 на приемник 8.

Светоделитель 3 состоит из двух пластин: светоделительной и компенсационной. Пластин выполнены из материала К8 (Крон, ГОСТ 3514-94). На поверхности светоделительной пластины нанесено диэлектрическое покрытие, которое обеспечивает работу спектрометра в диапазоне 1.0–1.7 мкм. Перед фокусирующим объективом 7 установлены длинноволновые фильтры 6, предназначенные для отсеивания излучения с длиной волны менее 1 мкм.

С обратной стороны основного канала расположен интерферометр референтного канала, применяемый для измерения абсолютного значения разности оптического хода между зеркалами интерферометра и управления регистрацией ФПУ. В качестве опорного источника монохроматического излучения использован He–Ne-лазер ($\lambda = 632$ нм). За счет применения в референтном канале дополнительной системы, состоящей из диэдра 11 и плоского зеркала 12, удается увеличить измеряемую разность хода в два раза и провести ее измерения с шагом $\lambda/4$, что в дальнейшем приводит к увеличению точности частоты дискретизации [32].

Для регистрации ИК-излучения использовали InGaAs-приемник с активной областью 2 мм, который предназначен для работы в ближнем ИК-

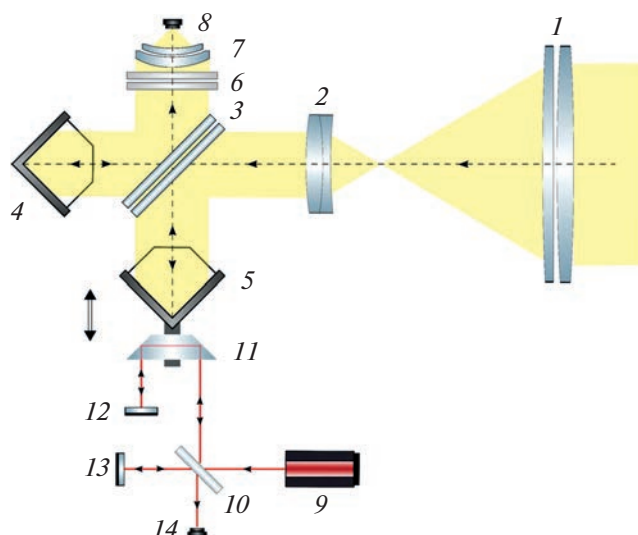


Рис. 2. Оптическая схема макета ДФС: 1, 2 – входной объектив; 3 – светоделитель; 4, 5 – уголкового отражатели; 6 – длинноволновые фильтры; 7 – фокусирующий объектив; 8 – приемник излучения основного канала; 9 – He–Ne лазер, 632 нм; 10 – светоделитель референтного канала; 11 – диэдр; 12, 13 – плоские зеркала; 14 – приемник референтного канала.

диапазоне. Технические характеристики приемника приведены в табл. 1. Верхняя граница спектральной чувствительности приемника определяет границу рабочего диапазона спектрометра и отвечает длине волны, равной 1.7 мкм.

В разработанном макете фурье-спектрометра на фотоприемном устройстве регистрируются двухсторонние интерферограммы с количеством отсчетов, равным 32000. Такая длина интерферограмм обеспечивает спектральное разрешение ~ 2 см $^{-1}$ [31] при восстановлении спектров ИК-поглощения [30]. Технические характеристики макета ДФС приведены в табл. 2.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

С помощью созданного макета проведены эксперименты по регистрации линий поглощения парниковых газов в атмосфере Земли и монито-

Таблица 1. Технические характеристики приемника

Характеристика	Значение
Материал фоточувствительного элемента	InGaAs
Спектральный диапазон, мкм	0.5–1.7
Диаметр элемента, мм	2
Число элементов	1
Эквивалентная мощность шума, Вт/Гц $^{1/2}$	$1.7 \cdot 10^{-15}$
Обнаруживающая способность, см $\cdot$ Гц $^{1/2}$ /Вт	$1.0 \cdot 10^{14}$

Таблица 2. Технические характеристики макета ДФС

Характеристика	Значение
Спектральный диапазон, мкм	1.0–1.7
Спектральное разрешение, см ⁻¹	10
Угловое поле зрения, град	4
Входная апертура, мм	100
Кратность входной системы	4

Таблица 3. Линии поглощения атмосферных газов в видимом и ближнем ИК-диапазоне

Атмосферные газы	Центральная длина волны, мкм
CO ₂	1.40, 1.60, 2.00, 2.70, 4.30
O ₂	0.63, 0.69, 0.76, 1.06, 1.27, 1.58
N ₂ O	2.87, 4.06, 4.50
CH ₄	1.66, 2.20, 3.30
CO	2.34, 4.67

ринг динамики их концентраций. Измерения проводили как в пассивном, так и в активном режимах. В пассивном режиме источником излучения является Солнце, и анализируется степень поглощения излучения газами в атмосфере в выбранном спектральном диапазоне (см. рис. 3а). Для измерений в активном режиме используется источник ИК-излучения, который располагается на трассе (см. рис. 3б).

В ходе экспериментов в пассивном режиме были получены спектры пропускания атмосферы в интервале волновых чисел 5880–10000 см⁻¹, что соответствует диапазону длин волн 1.0–1.7 мкм. Согласно модельным и справочным данным [43, 44], в указанном спектральном диапазоне работы

макета ДФС присутствуют полосы поглощения CO₂, CH₄ и O₂. Данные о полосах поглощения атмосферных газов в видимом и ближнем ИК-диапазонах приведены в табл. 3. Из этой таблицы видно, что в диапазоне длин волн 1.0–1.7 мкм присутствуют: линии поглощения CO₂ в области длины волны $\lambda = 1.6$ мкм, линии поглощения CH₄ в области $\lambda = 1.66$ мкм и O₂ в области $\lambda = 1.27$ мкм. Поскольку концентрация молекулярного кислорода в нижней атмосфере неизменна, то учитывая данные об интенсивности линии поглощения O₂ можно создать алгоритм, рассчитывающий абсолютную концентрацию газов CO₂ и CH₄.

Эксперименты проводили в городских условиях недалеко от загруженных дорог. Макет ДФС был ориентирован в направлении открытой террасы под небольшим углом к горизонту (около 20 град). Внешний вид макета ДФС показан на рис. 4. Время регистрации одного спектра с учетом обработки составляло 4 с.

На рис. 5а приведен график спектрального коэффициента пропускания атмосферы, где по оси ординат отложен спектральный коэффициент пропускания T , а по оси абсцисс — волновое число ν (см⁻¹). Отдельно представлены спектры поглощения газов CO₂, CH₄ и O₂. Спектр получен посредством усреднения результатов по 15 интерферограммам, что отвечает общему времени регистрации, равному 1 мин. Рассчитанное значение отношения сигнал/шум для данного спектра составляет величину 4110. Для одной интерферограммы отношение сигнал/шум в спектре равняется 1220.

Для подтверждения корректности процедур измерения и восстановления спектров ИК-поглощения, зарегистрированных с помощью экспериментального макета, проведено сравнение полученных нормированных данных с модельными.

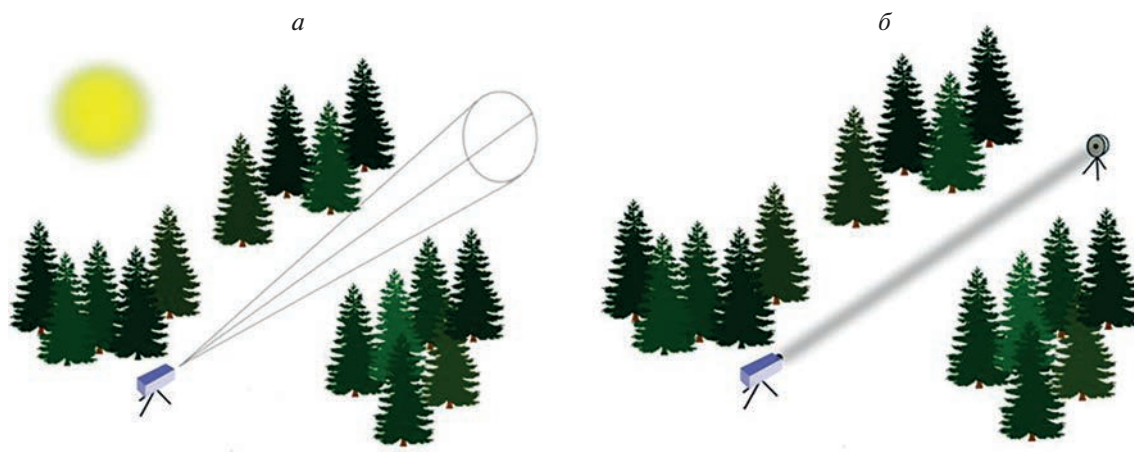


Рис. 3. Методика регистрации ИК-спектров парниковых газов: а — в пассивном режиме, б — в активном режиме.

ми ИК-спектрами из базы данных HITRAN [45], где спектральное разрешение составляет 0.25 см^{-1} (см. рис. 6).

Модельный и зарегистрированный спектры поглощения O_2 приведены на рис. 6а. Из рисунка следует, что за счет недостаточного спектрального разрешения макета ДФС на экспериментальных спектрах линии, соответствующие колебательно-вращательным переходам не видны. Однако оба спектра имеют схожую форму, и положения минимумов полос практически совпадают. Таким образом, основная линия поглощения O_2 , отвечающая волновому числу $\nu = 7880 \text{ см}^{-1}$, ярко выражена как в экспериментальном, так и в модельном спектрах. Полученное значение спектральной ширины линий составляет $\delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}$, что связано с большим входным угловым полем телескопической системы макета ДФС, равным 4 град. В дальнейшем для получения спектрального разрешения, близкого к расчетному ($\delta\nu = 2 \text{ см}^{-1}$), предполагается уменьшить угол обзора до 0.5–1.0 град за счет установки диафрагмы в телескопической системе.

На рис. 6б представлены модельный и экспериментальный спектры поглощения CO_2 . Общая форма и положение максимумов поглощения здесь также совпадают. Так, например, в экспериментальном спектре присутствуют линии поглощения при частотах 6250 и 6350 см^{-1} , положение которых совпадает с положением линий поглощения в модельном спектре. Линии, соответствующие колебательно-вращательным переходам молекулы CO_2 также в экспериментальном спектре не разрешены, поскольку спектральная ширина основных линий составляет $\delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}$.

Долговременный мониторинг содержания CO_2 и CH_4 в атмосфере осуществляли первоначально в пассивном режиме. Для этого 15 сентября 2022 г. проводилась долговременная запись спектров в течение 7 ч в выбранном направлении. По измеренным спектрам осуществляли расчет интегральной и объемной концентраций. Интегральная концентрация CO_2 и CH_4 определялась глубиной линий поглощения в спектре. Временные зависимости интегральных концентраций CO_2 , CH_4 и O_2 представлены на рис. 7. Отметим, что рост интегральных концентраций в вечернее время связан с увеличением протяженности оптической трассы в атмосфере за счет уменьшения угла возвышения солнца.

Значения объемных концентраций газов CO_2 и CH_4 рассчитаны по интегральным концентрациям с учетом нормировки на интенсивность линии O_2 . На рис. 8 представлены временные зависимости объемных концентраций углекислого газа и метана. Видно, что начиная с 13 ч наблюдается рост концентраций CO_2 и CH_4 , которые достига-



Рис. 4. Внешний вид макета ДФС.

ют максимума в 14 ч. Далее имеет место плавное уменьшение концентраций до локального минимума в 15 ч и их дальнейший рост к 16 ч. Такое поведение хорошо отражает степень загруженности дорог в этот день. Уменьшение объемной концентрации в вечернее время объясняется увеличением протяженности оптической трассы и дополнительным захватом массы воздуха, находящегося за пределами области интенсивного движения.

Кроме того, на разработанном макете ДФС проведены эксперименты по регистрации спектров ИК-поглощения парниковых газов в активном режиме. В качестве излучателя в данном случае использовали ИК-прожектор (см. рис. 3б), работающий в спектральном диапазоне $1.0\text{--}2.4 \text{ мкм}$. Спектрометр размещали в прямой видимости от ИК-прожектора на расстоянии около 400 м. Регистрацию спектра поглощения атмосферы проводили в ночное время суток.

График спектрального коэффициента пропускания атмосферы $T(\nu)$ показан на рис. 9. В экспериментальном спектре присутствуют две слабые линии поглощения CO_2 , соответствующие частотам 6250 и 6350 см^{-1} . Также наблюдается линия поглощения O_2 при частоте $\nu = 7880 \text{ см}^{-1}$ (см. рис. 5). При такой слабой интенсивности линий стано-

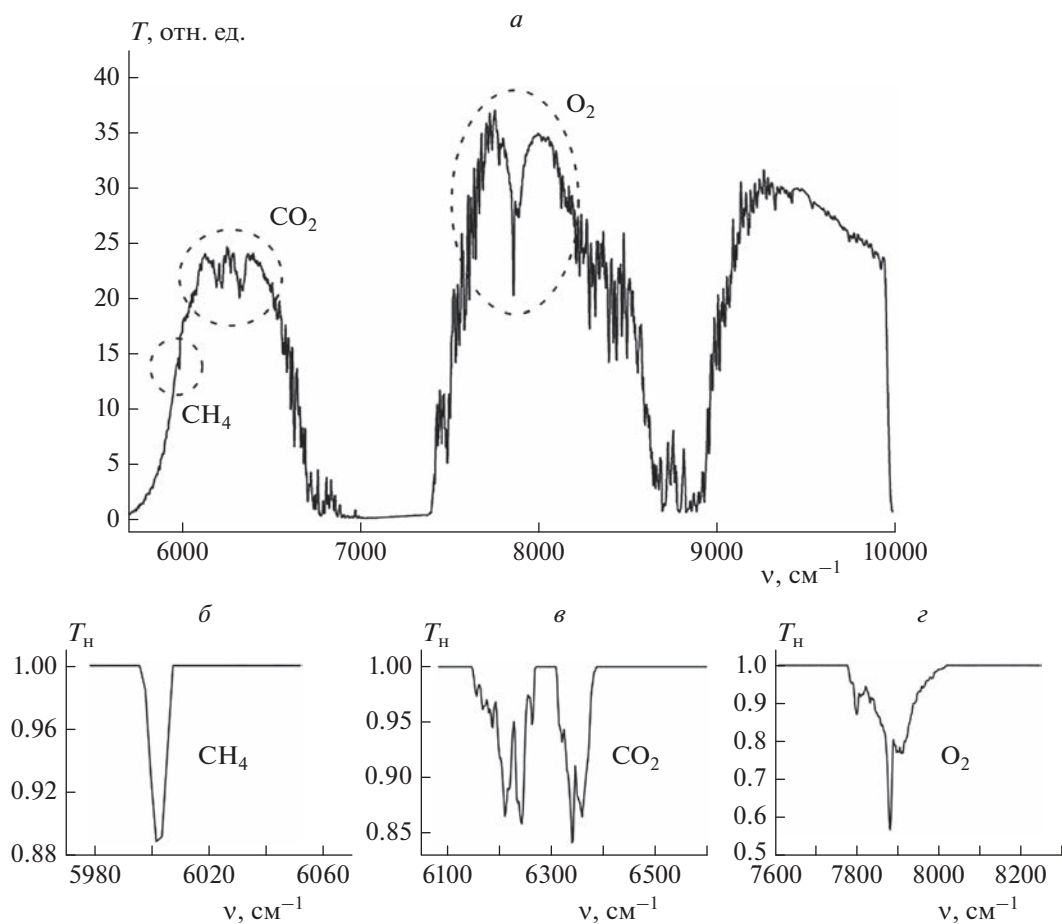


Рис. 5. Спектр поглощения атмосферы, зарегистрированный в пассивном режиме: *a* — общий спектральный коэффициент пропускания $T(\nu)$. Штриховыми линиями выделены полосы поглощения молекул CH_4 , CO_2 и O_2 . *б* — нормированный спектральный коэффициент пропускания $T_n(\nu)$ для молекулы CH_4 ; *в* — для CO_2 ; *з* — для O_2 .

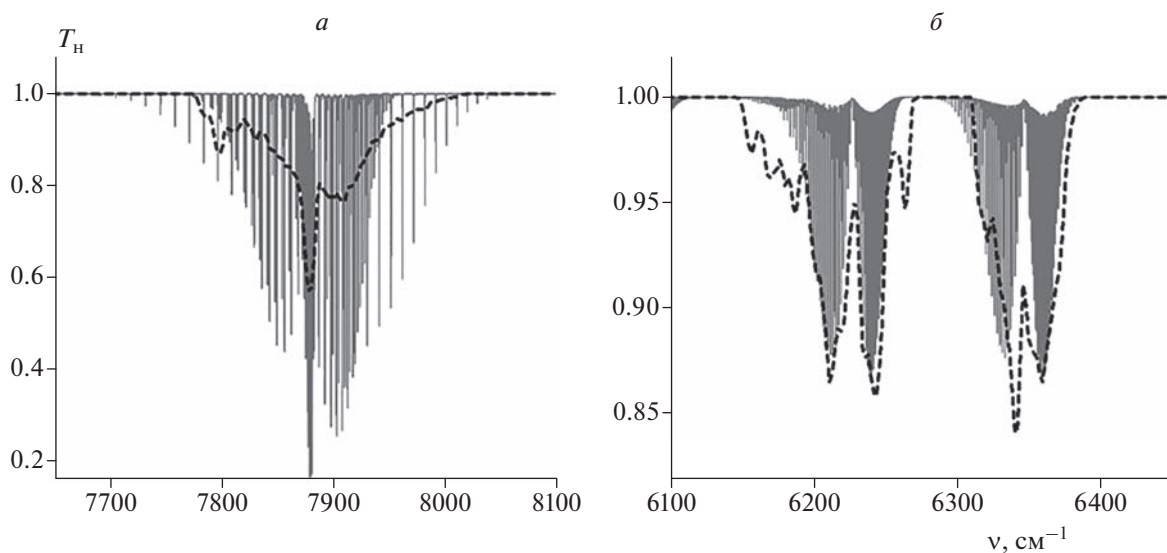


Рис. 6. Сравнение экспериментальных и модельных ИК-спектров поглощения: *a* — для молекулы O_2 ; *б* — для молекулы CO_2 . Штриховые линии отвечают спектру, зарегистрированному на макете со спектральным разрешением 10 cm^{-1} ; сплошные линии — модельным спектрам из базы данных HITRAN [45] со спектральным разрешением 0.25 cm^{-1} .

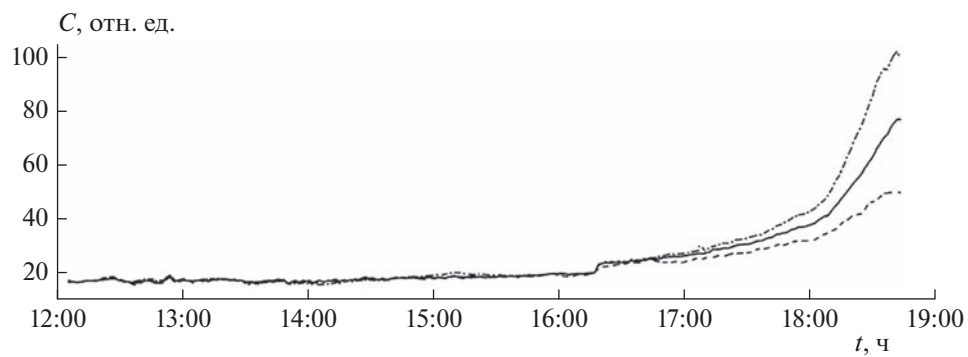


Рис. 7. Временные зависимости интегральных концентраций атмосферных газов: сплошная кривая – CO_2 ; штриховая – CH_4 ; штрих-пунктирная – O_2 .

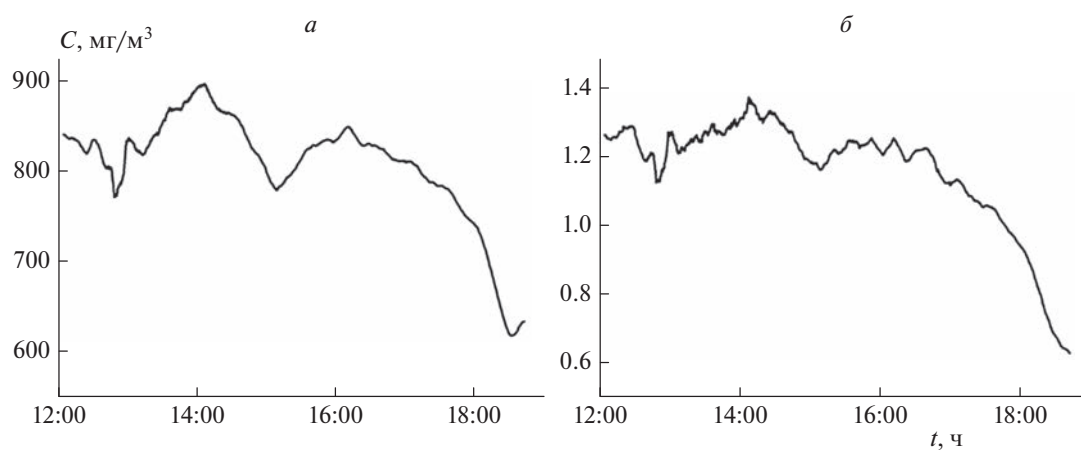


Рис. 8. Временные зависимости объемных концентраций атмосферных газов: *a* – CO_2 ; *б* – CH_4 .

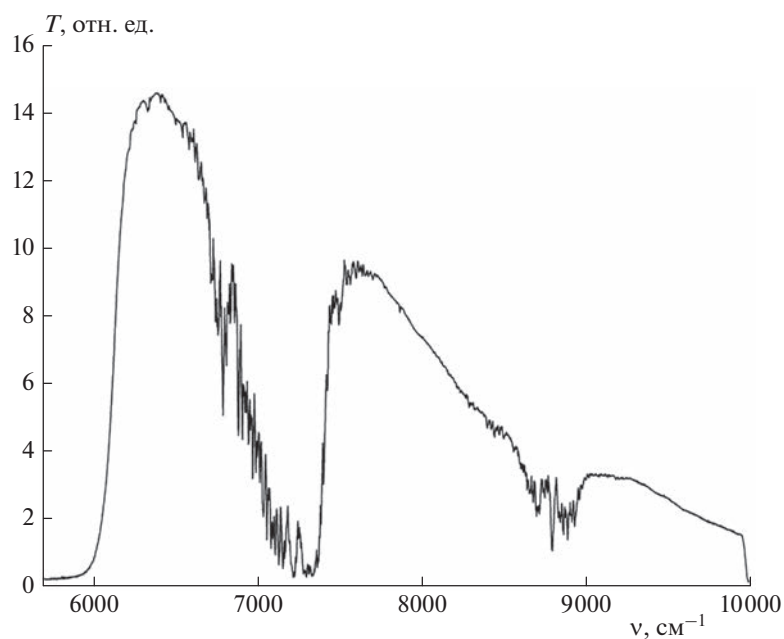


Рис. 9. Спектральный коэффициент пропускания атмосферы $T(\nu)$, зарегистрированный на макете ДФС в активном режиме.

вится затруднительным проведение дальнейшего долговременного мониторинга в активном режиме работы макета ДФС в данном спектральном диапазоне и на небольших расстояниях. Эта проблема может быть решена за счет увеличения протяженности оптической трассы или расширения спектрального диапазона приемника (спектрографа) до 2.4 мкм. В расширенном спектральном диапазоне дополнительно появятся линии поглощения CO_2 при $\lambda = 2$ мкм и CH_4 при $\lambda = 2.2$ мкм, интенсивность которых оказывается в несколько раз больше. При этом также появляется возможность регистрации линии поглощения CO при $\lambda = 2.34$ мкм.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе предложена новая методика регистрации спектров парниковых газов CO_2 и CH_4 . Представлен макет, разработанный на основе ДФС, который позволяет регистрировать спектры ИК-поглощения в диапазоне длин волн 1.0–1.7 мкм со спектральным разрешением $\delta\nu = 10 \text{ см}^{-1}$.

В пассивном режиме работы макета ДФС зарегистрирован спектр пропускания атмосферы, в котором присутствуют: линия поглощения CO_2 в области длины волны $\lambda = 1.6$ мкм, линия поглощения CH_4 в области $\lambda = 1.66$ мкм и O_2 в области $\lambda = 1.27$ мкм. Проведено сравнение полученных нормированных данных с модельными ИК-спектрами из базы данных HITRAN, для которых спектральное разрешение составляет $\delta\nu = 0.25 \text{ см}^{-1}$. Показано, что вследствие недостаточного спектрального разрешения макета ДФС на экспериментальных спектрах линии, соответствующие колебательно-вращательным переходам не разрешены, однако оба спектра имеют схожую форму, и положения минимумов практически совпадают.

Проведена долговременная запись коэффициента пропускания атмосферы в условиях городской застройки. По полученным данным осуществляли контроль интегральной и объемной концентраций CO_2 и CH_4 . Показано, что поведение временных зависимостей объемных концентраций углекислого газа и метана хорошо отражает степень загруженности дорог 15.09.2022. Уменьшение объемной концентрации в вечернее время объясняется увеличением протяженности оптической трассы и дополнительным захватом массы воздуха, находящегося за пределами области интенсивного движения.

Измерения в активном режиме с применением ИК-излучателя показали, что интенсивность линий поглощения в спектральном диапазоне 1.0–1.7 мкм и на сравнительно небольших расстояниях (протяженность трассы менее 400 м) оказывается низкой. Для увеличения чувствительности

метода в активном режиме следует увеличить протяженность трассы и/или расширить спектральный диапазон фурье-спектрометра до 2.4 мкм. Это позволит регистрировать дополнительно линии поглощения CO_2 , CH_4 и CO в диапазоне 1.7–2.4 мкм.

Работа выполнена в рамках программы стратегического академического лидерства “Приоритет-2030” и госзадания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (тема № 122040500060-4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Manisalidis I., Stavropoulou E., Stavropoulos A. et al. // Front. Public. Health. 2020. V. 8. P. 14; <https://doi.org/10.3389/fpubh.2020.00014>
2. Ларин И.К. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 3. С. 85; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20030085>
3. Ларин И.К. // Хим. физика. 2020. Т. 39. № 4. С. 44; <https://doi.org/10.31857/S0207401X20040111>
4. Solomon S., Qin D., Manning M. et al. Climate change 2007: The physical science basis. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
5. Advances in carbon capture / Eds. Rahimpour M.R., Farsi M., Makarem M.A. Cambridge: Elsevier, 2020; <https://doi.org/10.1016/c2018-0-05339-6>
6. Галашев А.Е., Рахманова О.Р. // Хим. физика. 2013. Т. 32. № 6. С. 88; <https://doi.org/10.7868/S0207401X13060022>
7. URL: <https://gml.noaa.gov/ccgg/mbl/data.php>
8. Ramphull M., Surroop D. // J. Environ. Chem. Eng. 2017. V. 5. № 6. P. 5994; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.11.027>
9. Bi J., Zhang R., Wang H. et al. // Energy Policy. 2011. V. 39. № 9. P. 4785; <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2011.06.045>
10. Da Silva M.G., Lisboa A.C.L., Hoffmann R. et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2021. V. 9. № 3. P. 105202; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105202>
11. Ramos P.B., Ponce M.F., Jerez F. et al. // J. Environ. Chem. Eng. 2022. V. 10. № 3. P. 107521; <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107521>
12. Turner A.J., Shusterman A.A., McDonald B.C. et al. // Atmos. Chem. Phys. 2016. V. 16. № 21. P. 13465; <https://doi.org/10.5194/acp-16-13465-2016>
13. Lee J.K., Christen A., Ketler R. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2017. V. 10. № 2. P. 645; <https://doi.org/10.5194/amt-10-645-2017>
14. Platt U., Stutz J. Differential optical absorption spectroscopy. Berlin, Heidelberg: Springer, 2008; <https://doi.org/10.1007/978-3-540-75776-4>
15. Handbook of vibrational spectroscopy / Ed. Griffiths P.R. Chichester: John Wiley & Sons, 2006. P. 1750.
16. Griffith D.W.T., Jamie I.M. // Encyclopedia of analytical chemistry. V. 3. Chichester: John Wiley & Sons, 2000. P. 1979.
17. Smith T.E.L., Wooster M.J., Tattaris M. et al. // Atmos. Meas. Tech. 2011. V. 4. № 1. P. 97; <https://doi.org/10.5194/amt-4-97-2011>

18. *Laubach J., Bai M., Pinares-Patiño C.S. et al.* // *Agric. For. Meteorol.* 2013. V. 176. P. 50;
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2013.03.006>
19. *Flesch T.K., Baron V.S., Wilson J.D. et al.* // *Agric. For. Meteorol.* 2016. V. 221. P. 111;
<https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2016.02.010>
20. *Винтайкин И.Б., Голяк И.С., Королев П.А. и др.* // *Хим. физика.* 2021. Т. 40. № 5. С. 9;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21050137>
21. *Kirchengast G., Schweitzer S.* // *Geophys. Res. Lett.* 2011. V. 38. № 13. L13701;
<https://doi.org/10.1029/2011GL047617>
22. *Somekawa T., Manago N., Kuze H. et al.* // *Opt. Lett.* 2011. V. 36. № 24. P. 4782;
<https://doi.org/10.1364/OL.36.004782>
23. *Saito H., Manago N., Kuriyama K. et al.* // *Opt. Lett.* 2015. V. 40. № 11. P. 2568;
<https://doi.org/10.1364/OL.40.002568>
24. *Rieker G.B., Giorgetta F.R., Swann W.C. et al.* // *Optica.* 2014. V. 1. № 5. P. 290;
<https://doi.org/10.1364/OPTICA.1.000290>
25. *Waxman E.M., Cossel K.C., Truong G.W. et al.* // *Atmos. Meas. Tech.* 2017. V. 10. № 9. P. 3295;
<https://doi.org/10.5194/amt-10-3295-2017>
26. *Dobler J., Braun M., Blume N. et al.* // *Remote Sens.* 2013. V. 5. № 12. P. 6284;
<https://doi.org/10.3390/rs5126284>
27. *Queißer M., Granieri D., Burton M.* // *Sci. Rep.* 2016. V. 6. № 1. Article 33834;
<https://doi.org/10.1038/srep33834>
28. *Голяк И.С., Морозов А.Н., Светличный С.И. и др.* // *Хим. физика.* 2019. Т. 38. № 7. С. 3;
<https://doi.org/10.1134/S0207401X19070057>
29. *Wunch D., Toon G.C., Blavier J.F.L. et al.* // *Philos. Trans. R. Soc. London, Ser. A.* 2011. V. 369. № 1943. P. 2087;
<https://doi.org/10.1098/rsta.2010.0240>
30. *Schneising O., Buchwitz M., Reuter M. et al.* // *Atmos. Chem. Phys.* 2011. V. 11. № 6. P. 2863;
<https://doi.org/10.5194/acp-11-2863-2011>
31. *Yoshida Y., Ota Y., Eguchi N. et al.* // *Atmos. Meas. Tech.* 2011. V. 4. № 4. P. 717;
<https://doi.org/10.5194/amt-4-717-2011>
32. *Голубков Г.В., Григорьев Г.Ю., Набиев Ш.Ш. и др.* // *Хим. физика.* 2018. Т. 37. № 10. С. 3;
<https://doi.org/10.1134/S0207401X18090054>
33. *Родионов А.И., Родионов И.Д., Родионова И.П. и др.* // *Хим. физика.* 2021. Т. 40. № 10. С. 61;
<https://doi.org/10.31857/S0207401X21100113>
34. *Kaufmann P., Chrzanowski H.M., Vanselow A. et al.* // *Opt. Express.* 2022. V. 30. № 4. P. 5926;
<https://doi.org/10.1364/OE.442411>
35. *Winters D.G., Schlup P., Bartels R.A.* // *Opt. Express.* 2007. V. 15. № 3. P. 1361;
<https://doi.org/10.1364/OE.15.001361>
36. *Васильев Н.С., Винтайкин И.Б., Голяк И.С. и др.* // *Компьютерная оптика (Самара).* 2017. Т. 41. № 5. С. 626;
<https://doi.org/10.18287/2412-6179-2017-41-5-626-635>
37. *Köhler M.H., Naßl S.S., Kienle P. et al.* // *Appl. Opt.* 2019. V. 58. № 13. P. 3393;
<https://doi.org/10.1364/ao.58.003393>
38. *Морозов А.Н., Светличный С.И.* Основы фурье-радиоспектрометрии. 2-е изд. Москва: Наука, 2014.
39. *Lin C.H., Grant R.H., Heber A.J. et al.* // *Atmos. Meas. Tech.* 2019. V. 12. № 6. P. 3403;
<https://doi.org/10.5194/amt-12-3403-2019>
40. *Балашов А.А., Вагин В.А., Голяк И.С. и др.* // *Журн. прикл. спектроскопии.* 2017. Т. 84. № 4. С. 643.
41. *Griffiths P.R., de Haseth J.A.* Fourier transform infrared spectrometry. 2nd ed. Hoboken, USA: John Wiley & Sons, 2007;
<https://doi.org/10.1002/047010631X>
42. *Балашов А.А., Голяк И.С., Голяк И.С. и др.* // *Журн. прикл. спектроскопии (Минск).* 2018. Т. 85. № 5. С. 822.
43. *Набиев Ш.Ш., Григорьев Г.Ю., Лагутин А.С. и др.* // *Хим. физика.* 2019. Т. 38. № 7. С. 49;
<https://doi.org/10.1134/s0207401x19070124>
44. *Patadia F., Levy R.C., Mattoo S.* // *Atmos. Meas. Tech.* 2018. V. 11. № 6. P. 3205;
<https://doi.org/10.5194/amt-11-3205-2018>
45. *Rothman L.S., Gordon I.E., Babikov Y. et al.* // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2013. V. 130. P. 4;
<https://doi.org/10.1016/j.jqsrt.2013.07.002>