

МОБИЛЬНЫЙ ЛАЗЕРНО-АБСОРБЦИОННЫЙ КОМПЛЕКС ДЛЯ МОНИТОРИНГА КОНЦЕНТРАЦИИ  
МЕТАНА В МЕСТАХ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ СТОКОВ

Научная статья

Яковлев С.В.<sup>1,\*</sup>, Луговской А.А.<sup>2</sup>, Садовников С.А.<sup>3</sup>, Воронин Б.А.<sup>4</sup>, Романовский О.А.<sup>5</sup>, Круз Ф.<sup>6</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8733-0947;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-3082-3521;<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, Томск, Российская Федерация<sup>4, 6</sup> Университет Кампинаса, Кампинас, Бразилия

\* Корреспондирующий автор (ysv[at]iao.ru)

**Аннотация**

Метан (CH<sub>4</sub>) – это парниковый газ, оказывающий непосредственное влияние на климатические изменения на планете. Одним из источников выбросов метана в атмосфере в процессе сельскохозяйственной деятельности человека является распад навоза животных и органические компоненты сельскохозяйственных стоков. Поэтому актуальным является разработка устройств, осуществляющих дистанционный контроль и измерение концентраций продуктов сельскохозяйственной промышленности (в основном, метана), являющихся по сути антропогенным фактором влияния на атмосферу. В работе рассматривается возможность создания мобильного лазерно-абсорбционного комплекса для мониторинга концентрации метана в местах сельскохозяйственных стоков.

**Ключевые слова:** метан, лазерная абсорбционная спектроскопия, атмосфера, солнечный трекер, активное и пассивное дистанционное зондирование.

A MOBILE LASER-ABSORPTION COMPLEX FOR MONITORING METHANE CONCENTRATIONS AT  
AGRICULTURAL WASTEWATER SITES

Research article

Yakovlev S.V.<sup>1,\*</sup>, Lugovskoi A.A.<sup>2</sup>, Sadovnikov S.A.<sup>3</sup>, Voronin B.A.<sup>4</sup>, Romanovskii O.A.<sup>5</sup>, Cruz F.<sup>6</sup><sup>1</sup> ORCID : 0000-0002-8733-0947;<sup>3</sup> ORCID : 0000-0002-3082-3521;<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS, Tomsk, Russian Federation<sup>4, 6</sup> University of Campinas, Campinas, Brazil

\* Corresponding author (ysv[at]iao.ru)

**Abstract**

Methane (CH<sub>4</sub>) is a greenhouse gas that has a direct impact on climate change on the planet. One of the sources of methane emissions in the atmosphere during human agricultural activities is the decomposition of animal manure and organic components of agricultural wastewater. Therefore, the development of devices carrying out remote control and measurement of concentrations of products of agricultural industry (mainly methane), which is essentially anthropogenic factor of influence on the atmosphere, is relevant. The work examines the possibility of creating a mobile laser-absorption complex for monitoring methane concentrations in agricultural wastewater areas.

**Keywords:** methane, laser absorption spectroscopy, atmosphere, solar tracker, active and passive remote sensing.

**Введение**

Метан является одним из наиболее важных органических веществ в атмосфере. Наблюдение за уровнем концентрации метана в атмосфере является актуальным вследствие его сильного влияния на климат Земли. Важной задачей является решение научной проблемы детектирования и контроля концентрации метана в атмосфере с применением спектроскопических методов и средств зондирования [1, С.802–806, 809–813], [2, С. 17–23], [3, С. 7, 12, 15], [4, С. 803, 806], для получения фундаментального знания о влиянии антропогенных (добыча угля, свалки, сжигание биомассы, нефтяная и газовая промышленность, рисовые поля, жвачные животные) и естественных (болота) факторов повышения общего содержания парниковых газов на планете и их вклада в изменение климата. Одним из антропогенных источников выбросов метана в атмосферу является сельскохозяйственная деятельность человека, в частности, сюда можно отнести распад навоза животных на сельскохозяйственных фермах и образование органических компонент сельскохозяйственных стоков [5]. Сельское хозяйство оказывает большее воздействие на природную среду, чем любая другая отрасль производства. В сельскохозяйственном секторе метан выделяется при кишечной ферментации (в частности, разложении навоза животных и помета птиц), переработке отходов животных (анаэробные пруды-отстойники), в процессе культивирования риса, и некоторых других сельскохозяйственных производствах. Сельское хозяйство является одним из четырех основных секторов (отраслей) глобальных выбросов метана при условном разделении по антропогенному фактору влияния на атмосферу: сельское хозяйство (навоз), каменный уголь, свалки, нефть и газ. Причем, в сельском хозяйстве открываются самые широкие возможности для сокращения выбросов метана в атмосферу с минимальными экономическими затратами, поэтому дистанционный мониторинг концентрации метана в данной отрасли крайне актуален как в экономическом и экологическом плане, так и в плане безопасности для предотвращения природных катастроф. Хотя пребывание метана в атмосфере и кратковременно, но он является сильным парниковым газом. Мониторинг и контроль концентрации метана и предложенные планы по сокращению его выбросов в атмосферу отдельно по отраслям, вкпе несет в себе важные положительные моменты в секторах экологии, экономики и энергетики. Россия и Бразилия являются ключевыми

игроками международного сельскохозяйственного рынка. Бразилия по масштабам сельскохозяйственного производства находится в тройке мировых лидеров. Животноводство является одной из основных отраслей сельского хозяйства и в России и в Бразилии. Поэтому вопрос дистанционного мониторинга и контроля концентрации метана в данном секторе промышленности очень важен, так как локальных пробоотборных измерений газоанализаторами не всегда достаточно. Вследствие этого актуальным является разработка устройств, осуществляющих дистанционный контроль и измерение концентраций метана в местах сельскохозяйственных стоков антропогенного происхождения. В данной работе, международная команда исследователей изучает возможность создания мобильного лазерно-абсорбционного комплекса, совмещающего методики активного и пассивного дистанционного зондирования, для решения задачи мониторинга концентрации метана в местах сельскохозяйственных стоков.

#### **Методы и принципы исследования**

Мобильный лазерно-абсорбционный комплекс для мониторинга концентрации метана в местах сельскохозяйственных стоков будет включать в себя несколько составных технических частей: лазерная система активного дистанционного зондирования метана, фурье-спектрометр и солнечный трекер, реализующий пассивное зондирование метана.

Среди систем активного зондирования метана все большее распространение получают системы, основанные на диодной лазерной абсорбционной спектроскопии [3, С. 9–15], [6, С. 1], [7, С.1]. В лазерной системе активного дистанционного зондирования метана целесообразно использовать два узкополосных лазерных диода на оп- и off-длинах волн зондирования в спектральном диапазоне  $\sim 1,65$  мкм (либо перестраиваемый один лазерный диод). Основной проблемой таких систем является сбор обратно рассеянного сигнала из-за малой мощности лазерных диодов и в соответствии с этим, реализации приемлемого отношения сигнал-шум (SNR), достаточного для регистрации эхо-сигнала. В нашем случае, излучение отправляется в атмосферу и отражаясь от тополишени, попадает на приемный телескоп с апертурой диаметром не более 150 мм (что позволяет обеспечить необходимые расстояния зондирования). Из соотношения сигналов, регистрируемых фотодетектором после телескопа, производится восстановление интегральных значений концентрации метана на трассе зондирования. Также на сбор сигнала и общую производительность (эффективность) системы влияют оптические свойства топографической мишени. На рисунке 1 приведена модель лазерной системы активного дистанционного зондирования метана, которая будет использоваться в мобильном лазерно-абсорбционном комплексе.

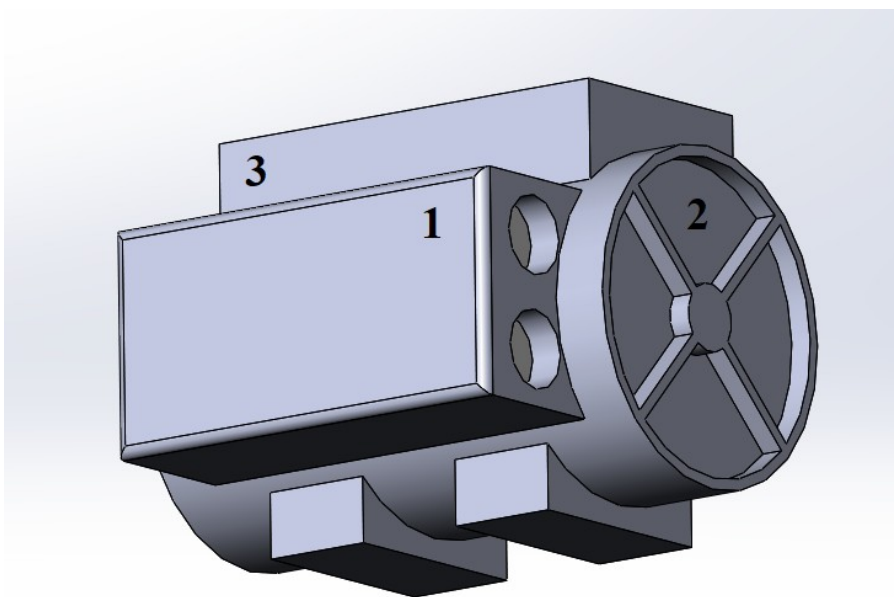


Рисунок 1 - Модель лазерной системы активного дистанционного зондирования метана

*Примечание: 1 – блок лазерных диодов; 2 – приемный телескоп; 3 – фотоприемный блок*

Солнечный трекер и фурье-спектрометр реализуют пассивное зондирование метана. Солнечный трекер (рисунок 2) представляет собой оптическую систему заводки солнечного излучения в регистрирующий прибор.



Рисунок 2 - Внешний вид солнечного трекера

Ориентация трекера на Солнце в процессе движения последнего производится с помощью приводов, закрепленных на двухкоординатном (азимут/зенит) поворотном столе. В состав системы входят 4 фотодиода грубого наведения и 4-секторный фотодиод точного слежения. Время регистрации одного спектра в зависимости от типа регистрирующего прибора может занимать от 20 до 300 мс. Заводка излучения в регистрирующий прибор осуществляется с помощью световода. Обработка солнечных спектров, которые содержат спектральные микроокна для определения общего содержания метана, проводится штатным фурье-спектрометром (рисунок 3) с использованием методики [8, С. 1945].

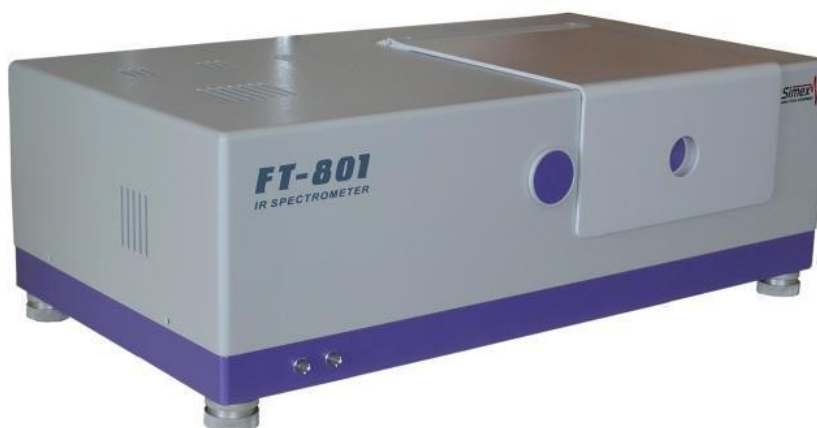


Рисунок 3 - Штатный фурье-спектрометр ФТ-801 фирмы Симекс

### Основные результаты

Существуют четыре основные полосы поглощения метана: близ 1,65 мкм, 2,3 мкм, 3,3 мкм и 7,7 мкм [9, С. 4] Концентрация метана в атмосфере изменяется в широком диапазоне от 2 ppb (фоновое значение [10]) до 200 ppb и выше [11, С. 117] в местах, в том числе, сельскохозяйственных стоков. В этой связи для мониторинга лазерно-абсорбционным методом возникает необходимость выбора рабочего спектрального диапазона, обладающего следующими принципиальными свойствами:

1. Наличие двух или более неперекрывающихся линий поглощения;
2. Отсутствие линий поглощения других атмосферных газов, в том числе углекислого газа и паров воды;
3. Интенсивность линий поглощения не должна достигать 100% по пропусканию даже при мониторинге на протяженных трассах.

Для этого был проведен полинейный расчет спектров пропускания с использованием модельной атмосферы «USA model, mean latitude, summer, H=0» [12], состав которой представлен в таблице 1.

Таблица 1 - Состав модельной атмосферы «USA model, mean latitude, summer, H=0»

Молекула	Содержание, %
----------	---------------

H <sub>2</sub> O	1,860000
CO <sub>2</sub>	0,033000
O <sub>3</sub>	0,000003
N <sub>2</sub> O	0,000032
CO	0,000015
CH <sub>4</sub>	0,000170
O <sub>2</sub>	20,900001
N <sub>2</sub>	77,206000

При этом для понимания поведения параметров линий поглощения метана при увеличении концентрации последнего в атмосфере, парциальное давление изменялось от фоновых 2 ppm, или  $1,9936 \cdot 10^{-6}$  атм до 200 ppm, или  $1,9936 \cdot 10^{-4}$  атм. Параметры, использованные для полинейного расчета представлены в таблице 2.

Таблица 2 - Параметры расчета спектра пропускания атмосферы

Параметр	Значение
Температура	296
Форма контура	Фойгт
Шаг вычислений, см <sup>-1</sup>	$9 \cdot 10^{-4}$
Аппаратная функция	Гаусс
Спектральное разрешение, см <sup>-1</sup>	1
Оптический путь, м	100

Полученный в результате расчета спектр пропускания атмосферы в диапазоне 1,645-1,655 мкм представлен на рисунке 4.

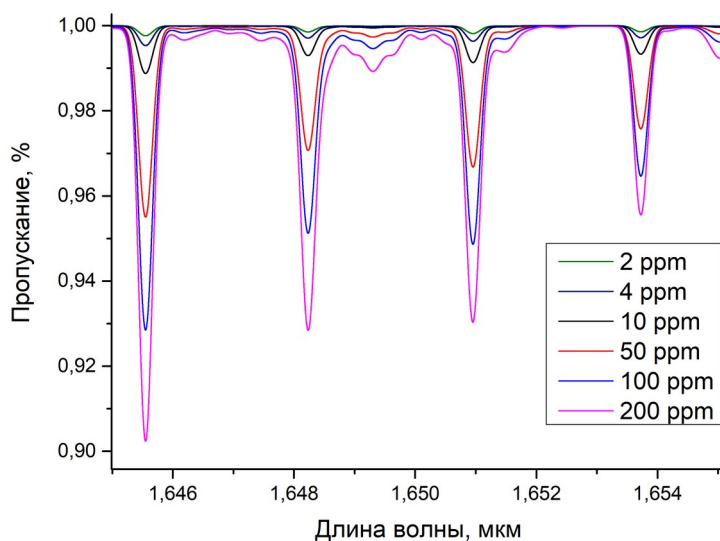


Рисунок 4 - Смоделированный спектр пропускания метана в области 1,645-1,655 мкм при разных давлениях

Колебательно-вращательные линии поглощения принадлежат колебательной полосе  $2\nu_3$  порядка  $3 \cdot 10^{-23}$  см/мол. Такой интенсивности оказывается достаточно, чтобы на дистанции 100 м уверенно детектировать содержание метана в заявленном диапазоне концентраций. Таким образом, уточнен спектральный диапазон, в котором предпочтительно проводить дистанционный мониторинг метана активными лазерными методами зондирования.

#### Обсуждение

На основе представленной концепции и результатов спектроскопического расчета создается оригинальный мобильный лазерно-абсорбционный комплекс для мониторинга концентрации метана, совмещающий методики активного и пассивного дистанционного зондирования. Применение разных методик и средств зондирования метана в едином комплексе позволит повысить точность измерений на исследуемых локальных участках при разных атмосферных сценариях наблюдения в условиях лета средних широт, экваториальных и субтропических широт, и

проводить валидацию со спутниковыми данными. За счет мобильности разрабатываемого комплекса, он может быть установлен на борту наземного транспортного средства, либо в специально оборудованном кунге.

### **Заключение**

Таким образом, разработана концепция мобильного лазерно-абсорбционного комплекса, совмещающего методики активного и пассивного дистанционного зондирования, для мониторинга концентрации метана в местах сельскохозяйственных стоков. Проведен расчет спектров пропускания метана при различных значениях концентраций 2, 4, 10, 50, 100 и 200 ppm. На основе спектроскопического расчета определено, что целесообразно проводить измерения метана методами активного зондирования в местах сельскохозяйственных стоков в спектральном диапазоне 1,645-1,655 мкм, в качестве источника излучения в данном спектральном диапазоне предпочтительно использовать лазерные диоды. В качестве приборов, реализующих пассивное зондирование метана, будут использованы солнечный трекер и фурье-спектрометр.

### **Финансирование**

Работа выполнена в рамках государственного задания ИОА СО РАН.

### **Funding**

This work was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (budget funds for IAO SB RAS).

### **Конфликт интересов**

Не указан.

### **Conflict of Interest**

None declared.

### **Рецензия**

Все статьи проходят рецензирование. Но рецензент или автор статьи предпочли не публиковать рецензию к этой статье в открытом доступе. Рецензия может быть предоставлена компетентным органам по запросу.

### **Review**

All articles are peer-reviewed. But the reviewer or the author of the article chose not to publish a review of this article in the public domain. The review can be provided to the competent authorities upon request.

### **Список литературы / References**

1. Васильев Б.И. ИК лидары дифференциального поглощения для экологического мониторинга окружающей среды. / Б.И. Васильев, У.М. Маннун // Квантовая электроника. — 2006. — 36(9). — с. 801–820.
2. Бобровников С.М. Лидарный спектроскопический газоанализ атмосферы / С.М. Бобровников, Г.Г. Матвиенко, О.А. Романовский и др. — Томск: ИОА СО РАН, 2014. — 508 с.
3. Li J. Standoff Chemical Detection Using Laser Absorption Spectroscopy. / J. Li, Z. Yu, Z. Du et al. // Remote Sensing. — 2020. — 12. 2771.
4. Кистенев Ю.В. Исследование малых газовых составляющих на границе «водная поверхность – атмосфера» с использованием средств дистанционного и локального лазерного ИК-газоанализа. Обзор. / Ю.В. Кистенев, А. Cuisset, О.А. Романовский и др. // Оптика атмосферы и океана. — 2022. — 35(10). — с. 799–810.
5. Животноводство [Электронный ресурс] // Википедия. — 2023. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Животноводство>. (дата обращения: 21.04.23)
6. Feng Y. Application of TDM and FDM Methods in TDLAS Based Multi-gas Detection. / Y. Feng, J. Chang, X. Chen et al. // Optical and Quantum Electronics. — 2021. — 53(4). — p. 1-11.
7. Yang H. Methane Concentration Measurement Method in Rain and Fog Coexisting Weather Based on TDLAS. / H. Yang, X. Bu, Y. Song et al. // Measurement. — 2022. — 204.112091.
8. Sussmann R. Strategy for High-accuracy-and-precision Retrieval of Atmospheric Methane from the Mid-infrared FTIR Network. / R. Sussmann, F. Forster, M. Rettinger et al. // Atmospheric Measurement Techniques. — 2011. — 4(9). — p. 1943–1964.
9. Kwaśny M. Optical Methods of Methane Detection. / M. Kwaśny, A. Bombalska // Sensors. — 2023. — 23.2834.
10. Лаборатория климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН // Лаборатория климатологии атмосферного состава ИОА СО РАН. — 2023. — URL: <https://lop.iao.ru/RU/tor/gas/> (дата обращения: 21.04.23)
11. Вторый В.Ф. Результаты исследований концентраций климатически активных газов в коровнике с беспривязным содержанием. / В.Ф. Вторый, С.В. Вторый, В.И. Базыкин // Агрэкоинженерия. — 2022. — 4(113). — с. 114–121.
12. Спектроскопия атмосферных газов // Спектроскопия атмосферных газов. — 2023. — URL: <https://spectra.iao.ru/> (дата обращения: 21.04.23)

### **Список литературы на английском языке / References in English**

1. Vasil'ev B.I. IK lidary' differencial'nogo pogloshheniya dlya e'kologicheskogo monitoringa okruzhayushhej sredy' [IR Differential-absorption Lidars for Ecological Monitoring of the Environment]. / B.I. Vasil'ev, U.M. Mannun // Kvantovaya e'lektronika [Quantum Electronics]. — 2006. — 36(9). — p. 801–820. [in Russian]
2. Bobrovnikov S.M. Lidarnii spektroskopicheskii gazoanaliz atmosfery [Lidar Spectroscopic Gas Analysis of the Atmosphere] / S.M. Bobrovnikov, G.G. Matvienko, O.A. Romanovskii et al. — Tomsk: IOA SO RAN, 2014. — 508 p. [in Russian]
3. Li J. Standoff Chemical Detection Using Laser Absorption Spectroscopy. / J. Li, Z. Yu, Z. Du et al. // Remote Sensing. — 2020. — 12. 2771.
4. Kistenev Yu.V. Issledovanie maly'x gazovy'x sostavlyayushhix na granice «vodnaya poverxnost' – atmosfera» s ispol'zovaniem sredstv distancionnogo i lokal'nogo lazernogo IK-gazoanaliza. Obzor [A Study of Trace Atmospheric Gases at the Water–Atmosphere Interface Using Remote and Local IR Laser Gas Analysis: A Review]. / Yu.V. Kistenev, A. Cuisset,

- O.A. Romanovskij et al. // Optika atmosfery' i okeana [Atmospheric and Oceanic Optics]. — 2022. — 35(10). — p. 799–810. [in Russian]
5. Zhivotnovodstvo [Animal husbandry] [Electronic source] // Wikipedia. — 2023. — URL: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Животноводство>. (accessed: 21.04.23) [in Russian]
6. Feng Y. Application of TDM and FDM Methods in TDLAS Based Multi-gas Detection. / Y. Feng, J. Chang, X. Chen et al. // Optical and Quantum Electronics. — 2021. — 53(4). — p. 1-11.
7. Yang H. Methane Concentration Measurement Method in Rain and Fog Coexisting Weather Based on TDLAS. / H. Yang, X. Bu, Y. Song et al. // Measurement. — 2022. — 204.112091.
8. Sussmann R. Strategy for High-accuracy-and-precision Retrieval of Atmospheric Methane from the Mid-infrared FTIR Network. / R. Sussmann, F. Forster, M. Rettinger et al. // Atmospheric Measurement Techniques. — 2011. — 4(9). — p. 1943–1964.
9. Kwaśny M. Optical Methods of Methane Detection. / M. Kwaśny, A. Bombalska // Sensors. — 2023. — 23.2834.
10. Laboratoriya klimatologii atmosfernogo sostava IOA SO RAN [Laboratory of Atmospheric Composition Climatology IAO SB RAS ] // Laboratory of Atmospheric Composition Climatology IAO SB RAS. — 2023. — URL: <https://lop.iao.ru/RU/tor/gas/> (accessed: 21.04.23) [in Russian]
11. Vtoryj V.F. Rezul'taty' issledovaniy koncentracij klimaticheskij aktivny'x gazov v korovnike s besprivyazny'm sodержaniem [The Results of Studies of the Concentrations of Climatically Active Gases in a Barn with Loose Housing]. / V.F. Vtoryj, S.V. Vtoryj, V.I. Bazy'kin // Agroekoinzheneriya [Agroecoengineering]. — 2022. — 4(113). — p. 114–121. [in Russian]
12. Spektroskopiya atmosfernih gazov [Atmospheric Gas Spectroscopy] // Atmospheric Gas Spectroscopy. — 2023. — URL: <https://spectra.iao.ru/> (accessed: 21.04.23) [in Russian]