

Шерстов Игорь Владимирович

**ЛАЗЕРНЫЕ ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКИЕ ГАЗОАНАЛИЗАТОРЫ
НА ОСНОВЕ РЕЗОНАНСНОГО ДИФФЕРЕНЦИАЛЬНОГО
ОПТИКО-АКУСТИЧЕСКОГО ДЕТЕКТОРА**

1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук

Новосибирск – 2025

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институт лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук (ИЛФ СО РАН), г. Новосибирск

Официальные оппоненты: **Айрапетян Валерик Сергеевич**, доктор технических наук, доцент, заведующий кафедрой Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Сибирский государственный университет геосистем и технологий», г. Новосибирск

Степанов Евгений Валерьевич, доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Федерального государственного бюджетного учреждения науки Федеральный исследовательский центр «Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН», г. Москва

Чесноков Евгений Николаевич, доктор химических наук, заведующий лабораторией Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт химической кинетики и горения им. В.В. Воеводского СО РАН, г. Новосибирск

Ведущая организация: Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана), г. Москва

Защита состоится «12» марта 2026 г. в 15-00 часов на заседании диссертационного совета 24.1.028.01 (Д 003.005.02), созданного на базе Института автоматики и электрометрии Сибирского отделения Российской академии наук, по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Коптюга, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института автоматики и электрометрии СО РАН <https://www.iae.nsk.su/ru/dissertation-council>.

Автореферат разослан «__» _____ 202_ г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук



Л.В. Ильичев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования

Детектирование наличия в пробах воздуха примесей различных газов чрезвычайно важно для обнаружения течей в контейнерах, содержащих различные газы под высоким давлением, а также для обнаружения скрытого вещества, например, взрывчатки, наркотиков, горючих веществ в багаже пассажиров и проч. Также крайне актуально обнаружение метана в сверхмалых концентрациях при геологоразведочных работах, в шахтах, в подземных сооружениях. Для безопасности работников крайне важно оперативное обнаружение накопления углекислого газа, угарного газа и других опасных газов, характерных для данного вида работ. Своевременное обнаружение утечек газа в газифицированных жилых домах может предотвратить трагедию и спасти десятки и сотни жизней. Сфера применения устройств для обнаружения газовых примесей существенно зависит от чувствительности этих приборов, от их стоимости, габаритов, надёжности и от оперативности получения результата измерения. Таким образом, наиболее востребованы газоанализаторы, характеризующиеся высокой чувствительностью, малым временем измерения, малыми габаритами, приемлемой стоимостью и высокой надёжностью. Это делает особенно актуальными исследования, направленные на создание современных методов высокочувствительного детектирования газовых примесей, основанных на спектроскопии, поскольку эти методы обеспечивают наивысшую потенциальную чувствительность, позволяют регистрировать сверхмалые концентрации примесей в различных газовых смесях.

Наиболее чувствительными лабораторными методами газоанализа являются газовая хроматография и масс-спектрометрия, а также комбинация этих методов [1], которые обладают непревзойденной чувствительностью и избирательностью, однако практически не могут работать в режиме реального времени и в полевых условиях. С развитием новых лазерных технологий появился ряд методов локального и дистанционного газоанализа атмосферы (например, использование многопроходных ячеек, диодная лазерная спектроскопия (*TDLS*), метод *CRDS* (*Cavity Ring-Down Spectroscopy*) и др.), которые позволяют проводить исследования окружающей среды в реальном времени и в полевых условиях, в т. ч. с использованием беспилотных летательных аппаратов (БПЛА).

Метод лазерной оптико-акустической спектроскопии (ЛОАС) [2–6] является одним из наиболее чувствительных методов лазерного газоанализа атмосферы, позволяющий локально измерять микроконцентрации различных примесных и загрязняющих газов в режиме реального времени. В последние ~30–35 лет исследователи из разных стран мира активно работали над созданием лазерных оптико-акустических (ОА) газоанализаторов, используя различные типы лазеров УФ, видимого, ближнего, среднего ИК и ТГц диапазонов, разрабатывали новые

варианты оптико-акустических детекторов (ОАД) [4–7]. С появлением перестраиваемых полупроводниковых лазеров ближнего и среднего ИК диапазонов (диодных, квантово-каскадных и др. [8]) появилась возможность создания портативных высокочувствительных ОА-газоанализаторов, которые по ряду основных параметров (чувствительность, быстродействие, динамический диапазон и проч.) превосходят существующие традиционные переносные газоанализаторы и течеискатели.

При построении лазерных ОА-газоанализаторов используют различные типы резонансных или нерезонансных ОАД или их аналоги: объемные акустические резонаторы, продольные или дифференциальные резонансные ОАД, акустические резонаторы Гельмгольца, кварцевые камертоны (*QEPAS* технология), кантилеверные сенсоры (*CEPAS* технология), и др. [4–7]. Одной из проблем используемых ОАД является их чувствительность к поглощению в окнах детектора, которая приводит к снижению пороговой чувствительности лазерных ОА-газоанализаторов. Для решения этой проблемы разработаны конструкции открытых ОАД без окон [9], однако такие детекторы не нашли широкого применения вследствие их повышенной чувствительности к внешнему акустическому шуму. Поэтому поиск технических решений по снижению чувствительности ОАД к поглощению в окнах и повышению пороговой чувствительности лазерных ОА-газоанализаторов является актуальным, полезным и своевременным.

В лазерных ОА-газоанализаторах обычно используется традиционная оптическая схема с нормировкой сигналов поглощения исследуемого газа-маркера в измерительном ОАД по мощности излучения лазера [4–7]. Однако при нестабильности длины волны лазерного излучения ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$) (как, например, у CO_2 лазера, работающего в свободном режиме генерации) сечение поглощения газа-маркера испытывает вариации $[\sigma_g(\lambda_i) \pm \Delta\sigma_g]$, что приводит к нарушению концентрационной калибровки отклика лазерного ОА-газоанализатора и снижению точности измерения концентрации газа-маркера. Поэтому чрезвычайно востребована разработка новых оптических схем построения лазерных ОА-газоанализаторов, у которых концентрационная калибровка отклика на поглощения исследуемого газа-маркера слабо зависит от влияния спонтанной перестройки длины волны лазерного излучения.

Цели исследования

1) Разработка компактных высокочувствительных лазерных оптико-акустических газоанализаторов на основе перестраиваемых лазеров среднего ИК диапазона и резонансного дифференциального оптико-акустического детектора, обеспечивающих работу в режиме реального времени и в полевых условиях.

2) Повышение точности и воспроизводимости измерения поглощения газа лазерными ОА-газоанализаторами в условиях нестабильности длины волны лазерного излучения, изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей.

3) Расширение сфер применения лазерных ОА-газоанализаторов.

Задачи исследования

1) Сравнение разных подходов и методов лазерной оптико-акустической спектроскопии, создание набора альтернативных устройств на основе различных методов, экспериментальное исследование достоинств и недостатков каждого из устройств. Обоснование выбора оптимального варианта резонансного ОАД для дальнейшего использования его в составе разрабатываемых лазерных ОА-газоанализаторов.

2) Разработка метода оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД в условиях изменения температуры и состава анализируемых газовых смесей.

3) Экспериментальное и теоретическое подтверждение точностных характеристик разработанного лазерного ОА-газоанализатора SF₆ на основе волноводного CO₂ лазера, резонансного дифференциального ОАД, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки в условиях нестабильности длины волны излучения лазера.

4) Обоснованный выбор параметров режима работы отдельных элементов ОА-газоанализатора, в т. ч. типа лазера, оптимизация мощности излучения лазера и других параметров его режима работы.

5) Разработка концепции создания измерительных устройств и экспериментальное подтверждение ее обоснованности путем реализации и исследования высокочувствительного переносного лазерного ОА-газоанализатора SF₆ на основе CO₂ лазера, резонансного дифференциального ОАД, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки.

6) Обеспечение возможности применения метода ЛОАС в медицине для проведения в условиях клиники экспресс-диагностики выдоха пациентов за счёт обеспечения многокомпонентности определения газового состава выдыхаемого воздуха, высокой точности, воспроизводимости, достоверности измерений концентрации газовых примесей, экспериментальное доказательство полезности предлагаемых научно-технических решений.

7) Обеспечение применения метода ЛОАС и устройств для геолого-геофизических исследований в полевых условиях за счёт повышения чувствительности, надёжности, малогабаритности, а также разработка, исследование и реализация аэромобильного лазерного ОА-сенсора метана на основе предложенных научно-технических решений.

Методы исследования: теоретический анализ с применением когерентной и физической оптики, математическое моделирование, патентный поиск, реализация физических устройств, исследование и модификация измерительных установок, алгоритмов их работы и оптической схемы, теоретическое и экспериментальное обоснование выбора оптических и физических элементов, лазера, выбора его параметров работы, экспериментальная проверка, статистический анализ и оценка погрешностей измерения.

В ходе работ соискателем исследованы конструкции и параметры различных резонансных ОАД:

- резонансный дифференциальный ОАД [7];
- резонансный кольцевой ОАД [10];
- резонансный продольный ОАД [11];
- дифференциальный резонатор Гельмгольца [12].

Для исследования акустических параметров резонансных ОАД и формирования в них резонансных акустических мод использованы различные типы детекторов, оборудованных рядом микрофонов и малогабаритных пьезоэлектрических звуковых излучателей, установленных в акустических резонаторах и в буферных полостях детекторов. Это позволило раскрыть некоторые важные особенности формирования резонансных акустических мод исследуемых резонансных ОАД, выявить достоинства и недостатки различных типов и моделей исследуемых детекторов, установить ряд закономерностей, которые помогли выбрать и создать оптимальную конструкцию резонансного ОАД с минимальной чувствительностью к поглощению в окнах детектора.

При исследовании параметров ОА-газоанализаторов соискателем использованы различные типы лазеров среднего ИК диапазона:

- волноводный CO_2 лазер с ВЧ возбуждением, работающий в режиме свободной генерации при спонтанной перестройке длины волны излучения вблизи $\lambda \approx 10,6$ мкм;
- автоматизированный перестраиваемый волноводный CO_2 лазер с ВЧ возбуждением, работающий на фиксированных линиях генерации в спектральном диапазоне $\lambda \approx 9,2 \dots 10,8$ мкм;
- широкополосный комбинированный ПГС, плавно перестраиваемый в спектральном диапазоне $\lambda \approx 2,5 \dots 10,8$ мкм;
- квантово-каскадный лазер (ККЛ), работающий на длине волны $\lambda \approx 7,7$ мкм.

Положения, выносимые на защиту

1) В резонансном дифференциальном оптико-акустическом детекторе (ОАД) на низшей резонансной частоте формируется акустическая мода (типа А) с кольцевой траекторией распространения колебаний давления через оба акустических резонатора, у которой узлы выступают в буферные полости на

расстояние 1...2 мм и не контактируют с окнами детектора, что снижает влияние поглощения в окнах.

2) В резонансном дифференциальном ОАД при малой длине буферных полостей, равной (1...1,5) диаметра акустических резонаторов, обеспечивается максимальное удаление низшей резонансной частоты кольцевой акустической моды (типа А) от резонансной частоты ближайшей продольной акустической моды (типа В), у которой пучности колебаний давления расположены на окнах детектора.

3) Использование разработанного метода оперативного ($\sim 0,1$ с) и точного ($\pm 0,1$ Гц) измерения низшей резонансной частоты дифференциального ОАД обеспечивает сохранение концентрационной калибровки отклика ОАД на поглощение газа-маркера в условиях изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей.

4) Применение отпаянной газонаполненной ОА-ячейки для нормировки сигналов измерительного ОАД вместо измерителя мощности обеспечивает снижение на порядок погрешности измерения концентрации поглощающего газа-маркера в условиях нестабильности длины волны излучения лазера.

5) Оптико-акустический газоанализатор на основе CO_2 лазера, резонансного дифференциального ОАД и отпаянной газонаполненной ОА-ячейки обеспечивает экстремально высокую чувствительность детектирования примеси SF_6 в воздухе на уровне ~ 100 ppt. При этом за счёт специально разработанных методов измерений в одном приборе достигается рекордный динамический диапазон измерения концентрации SF_6 до 10 декад (от 100 ppt до 100 % SF_6).

Степень достоверности

Достоверность полученных результатов диссертационной работы подтверждается хорошим совпадением теоретических расчетов с результатами экспериментальных измерений, повторяемостью результатов, снижением зависимости точности измерений исследуемых ОА-газоанализаторов от вариации режима работы лазеров в пределах допустимого отклонения от оптимального режима (теоретически и экспериментально обоснованного). Разработанный по итогам проведенных исследований при определяющем участии соискателя высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель SF_6 («KARAT» / « SF_6 LaserGasTest») более 10 лет производится мелкими сериями, официально зарегистрирован в реестре Средств измерений Росстандарта. Другие разработанные образцы лазерных ОА-газоанализаторов также прошли проверку в различных областях науки и техники, в т. ч. в медицине.

Новизна полученных результатов

1) В резонансном дифференциальном ОАД, содержащем два параллельных продольных акустических резонатора и две буферные полости по краям, на низшей

резонансной частоте формируется стоячая звуковая волна (типа А) с кольцевой конфигурацией распространения колебаний давления через оба акустических резонатора, которая выступает из акустических резонаторов в буферные полости детектора на расстояние $\sim 1...2$ мм (где расположены узлы колебаний) и не достигает фланцев (окон) резонансного дифференциального ОАД, что значительно снижает чувствительность данного детектора к поглощению в окнах.

2) В резонансном продольном ОАД, содержащем один продольный акустический резонатор и две буферные полости по краям, в резонансе формируются только продольные стоячие акустические волны (типа С), которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости, отражаются от фланцев ОАД, где расположены пучности колебаний давления, что существенно повышает чувствительность данного детектора к поглощению в окнах.

3) Разработан специальный метод оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД, обеспечивающий стабильность отклика измерительного детектора в условиях изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей и повышение точности измерения поглощения газа.

4) Предложены новые оптические схемы построения лазерного ОА-газоанализатора с использованием отпаянных газонаполненных ОА-ячеек. В условиях спонтанной перестройки длины волны излучения лазера экспериментально и теоретически подтверждены точностные характеристики разработанных оптических схем ОА-газоанализатора с нормировкой сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке вместо традиционной нормировки по мощности излучения лазера.

5) Экспериментально показана возможность расширения динамического диапазона измерения концентрации гексафторида серы с помощью разработанного лазерного ОА-газоанализатора SF_6 до ~ 10 декад (от ~ 100 ppt до 100% SF_6), реализованная в одном приборе.

Практическая значимость полученных результатов

1) Разработан вариант резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей, сравнимой с диаметром акустических резонаторов, который имеет минимальную чувствительность к поглощению в окнах, расширяет сферу и повышает эффективность применения детекторов этого вида; изготовленные образцы по этому варианту детектора активно используются различными группами исследователей в мире.

2) Разработан метод оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД, который позволяет практически в реальном времени ($\sim 0,1$ с) с высокой точностью ($\pm 0,1$ Гц) настроиться на рабочую точку измерительного резонансного

ОАД (низшая резонансная частота) в условиях изменения температуры и состава газовых смесей.

3) Для снижения погрешности измерения концентрации газа-маркера, связанной с нестабильностью длины волны излучения лазера, разработаны новые оптические схемы построения ОА-газоанализатора, в которых для нормировки сигналов поглощения в измерительном ОАД используется отпаянная газонаполненная ОА-ячейка, заполненная газовой смесью с примесью исследуемого газа-маркера, вместо измерителя мощности лазера.

4) Для снижения энергопотребления ОА-газоанализатора SF_6 на основе волноводного CO_2 лазера предложено установить частоту повторения импульсов излучения равной одной из субгармоник низшей резонансной частоты измерительного ОАД при оптимальном уровне средней мощности излучения CO_2 лазера не менее 150 мВт.

5) Разработан переносной высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель SF_6 с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt, которая превышает чувствительность лучших коммерческих теcheискателей SF_6 в мире как минимум в 1000 раз. Разработанный лазерный ОА-течеискатель элегаза «*KARAT*» / «*SF₆ LaserGasTest*» зарегистрирован в реестре Средств измерения Росстандарта.

6) Разработан лазерный ОА-газоанализатор медицинского назначения на основе широкополосного перестраиваемого ПГС ($\lambda = 2,5 \dots 10,8$ мкм) для проведения многокомпонентного экспресс-анализа выдоха пациентов, страдающих различными заболеваниями, который активно используется по назначению в медицинских клиниках г. Томска.

7) Для сбора и осушения проб выдоха пациентов разработана новая универсальная система пробоподготовки, основанная на вымораживании проб выдыхаемого воздуха в пробоотборном пакете, помещенном на определенное время в низкотемпературный морозильник.

8) Разработан аэромобильный высокочувствительный ОА-газоанализатор метана на основе квантово-каскадного лазера ($\lambda \approx 7,7$ мкм), резонансного дифференциального ОАД, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки, предназначенный для выполнения ряда геолого-геофизических работ в полевых условиях на борту БПЛА.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы были доложены на 24 российских и международных конференциях: Междунар. симп. «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (2004, 2005, 2008, 2011, 2013, 2019, 2023); Рабочая группа по сокращению эмиссии метана на предприятиях нефтегазовой промышленности (2005, Томск, Россия); 15th Symp. on High-Resolution Molecular Spectroscopy (2006, Nizhny Novgorod, Russia); IX Российско-

китайский симп. по лазерной физике и лазерным технологиям (2008, Томск, Россия); VII Междунар. конф. молодых ученых и специалистов «Оптика-2011» (2011, Санкт-Петербург, Россия); XVI GMA/ITG-Fachtagung Sensoren und Messsysteme 2012 (Nürnberg, Germany); AMA Conferences 2013 (13th Intern. Conf. on Infrared Sensors & Systems, 2013, Nuremberg, Germany); Int. Symp. on Photonics and Optoelectronics (SOPO-2013, Beijing, China); VIII Int. Forum on Strategic Technology 2013 (IFOST-2013, Ulaanbaatar, Mongolia); Int. Symp. “Modern Problems of Laser Physics” (2013, 2021) (Novosibirsk, Russia); Int. Conf. “Noninvasive express diagnostics of pulmonary diseases based on control of patient's gas emission using methods of IR and Terahertz laser spectroscopy 2013” (г. Пушкин, Санкт-Петербург, Россия); Int. Conf. “Fundamentals of Laser Assisted Micro- and Nanotechnologies 2013” (St. Petersburg, Russia); Int. Conf. on Laser Applications in Life Sciences 2014 (German-Chinese Workshop on Biomedical Photonics); V Russian-Chinese Workshop and School for Young Scientists on Laser Physics and Photonics (RCWLP&P-2015, Novosibirsk, Russia); Науч.-практ. конф. с междунар. участием “Экологическая, промышленная и энергетическая безопасность 2017” (Севастополь, Россия); Int. Conf. Laser Optics (ICLO 2020, 2022, Saint Petersburg, Russia); 23rd Int. Conf. of Young Professionals in Electron Devices and Materials (EDM) (2022, Novosibirsk, Russia).

Опубликование результатов диссертационного исследования

Соискателем опубликовано 84 научных работы, в том числе по теме диссертации – 68 работ, из них: в периодических журналах, входящих в базы Scopus и Web of Science – 25 работ; статей в трудах конференций, входящих в базы Scopus и Web of Science – 8; в журналах, включённых в перечень ВАК – 16 работ (в т.ч. входящих в базы Scopus и Web of Science – 15); патентов – 10; прочих публикаций – 24.

Личный вклад автора

Личный вклад автора состоит в следующем:

- разработка и анализ различных оптических схем построения лазерных ОА-газоанализаторов с использованием отпаянных газонаполненных ОА-ячеек;
- разработка алгоритмов вычисления измеряемой концентрации исследуемого газа;
- разработка модернизированного варианта резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (модель *ОАД-90*);
- расширение динамического диапазона измерения концентрации SF₆;
- разработка новой системы сбора и осушения проб выдоха пациентов для проведения анализа многокомпонентной газовой смеси;

- разработка и исследование параметров аэромобильного лазерного ОА-сенсора метана для выполнения ряда геолого-геофизических работ в полевых условиях на борту БПЛА.

Все выносимые на защиту положения и экспериментальные результаты получены соискателем лично либо при его непосредственном участии или под его руководством. Соискатель внес определяющий вклад в формирование всех задач настоящей диссертации, подготовку и проведение экспериментов, обработку и интерпретацию экспериментальных результатов, написание статей, докладов, отчетов, и проч.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, списка сокращений, списка литературы, трех Приложений, в т. ч. Акты внедрения. Диссертация занимает 257 страниц, содержит иллюстрации, таблицы, формулы, список из 224 литературных источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** дана краткая характеристика диссертационной работы, сформулированы актуальность, цели и задачи исследования, защищаемые положения, описаны методы исследования, определены степень достоверности, научная новизна, практическая значимость полученных результатов, представлены апробация результатов исследования, личный вклад автора.

В **главе 1** проведен обзор литературы и анализ современного состояния лазерной оптико-акустической спектроскопии за последние 30–35 лет. В ходе обзора показано, что в настоящее время наивысшая чувствительность лазерных ОА-газоанализаторов получена при использовании несколько вариантов резонансных ОАД (или их аналогов):

- 1) продольного резонансного ОАД (схема Харрена) [11];
- 2) резонансного дифференциального ОАД (схема Миклоша) [7];
- 3) при использовании кварцевых камертонов (технология *QEPAS*) [5];
- 4) при использовании кантилеверов (технология *CEPAS*) [6];
- 5) при размещении ОАД внутри высокочастотных оптических резонаторов [13].

Традиционные резонансные ОАД ввиду своей простоты и надежности имеют определенный потенциал для построения высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов, пригодных для работы в полевых условиях, в т. ч. для установки на БПЛА. В последнее время широкое использование в различных

лабораториях мира резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (модель *ОАД-90*; разработан и реализован соискателем, 2006–2007 гг.) для построения высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов на основе квантово-каскадных лазеров (и др.) подтверждает этот вывод (см. работы [7, 14, 15–22]).

В главе 2 проведено исследование акустических мод резонансных ОАД различных типов: резонансного дифференциального ОАД (схема Миклоша [7]), резонансного кольцевого ОАД (схема Капитанова [10]), продольного резонансного ОАД (схема Харрена [11]), дифференциального резонатора Гельмгольца (*DHR* [12]). Для возбуждения акустических колебаний внутри исследованных резонансных ОАД использован встроенный вспомогательный малогабаритный звуковой излучатель с различным расположением.

В результате исследований показано [A19], что резонансный дифференциальный ОАД (схема Миклоша [7]) и кольцевой резонансный дифференциальный ОАД (схема Капитанова [10]) имеют сходные параметры. В этих дифференциальных ОАД с двумя параллельными акустическими резонаторами, разделенными тонкой перегородкой, формируются кольцевые акустические моды типа А (в т. ч. на нижней резонансной частоте), которые охватывают оба акустических резонатора дифференциального детектора, выступают из акустических резонаторов в буферные (соединительные) полости детектора на малое расстояние (~1...2 мм) и не достигают фланцев (окон) дифференциального ОАД (см. рисунок 1.а, б; акустические моды *A1*, *A3*). Это важное свойство кольцевых акустических мод типа А дифференциальных ОАД существенно снижает чувствительность данных детекторов к поглощению излучения лазера окнами детектора. Звуковые колебания в разных акустических резонаторах дифференциальных ОАД на резонансной частоте кольцевых акустических мод находятся в противофазе, узлы колебаний давления расположены в буферных полостях вблизи перегородки между акустическими резонаторами детектора (см. рисунок 1.а, б).

Также установлено [A19], что в резонансном дифференциальном ОАД (схема Миклоша [7]) формируются синфазные продольные акустические моды типа В (см. рисунок 1.в, г; акустические моды *B2*, *B4*), которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости, причем пучности колебаний давления этих синфазных акустических мод расположены на фланцах (окнах) ОАД (как в трубе переменного сечения с закрытыми торцами).

В ходе экспериментов показано [A19], что в продольном резонансном ОАД (схема Харрена [11]), содержащем один продольный акустический резонатор и две буферные полости по краям резонатора, формируются только продольные акустические моды (типа С, аналог мод типа В в дифференциальном ОАД),

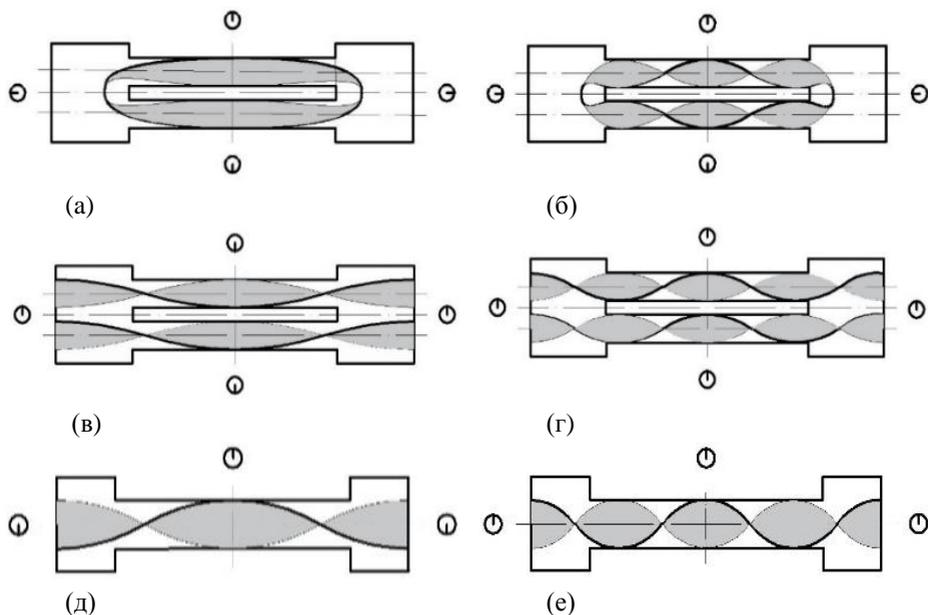


Рисунок 1 – Графическое изображение акустических мод резонансных ОАД (из нашей работы [A19]): (а-г) – моды в резонансном дифференциальном детекторе (схема Миклоша): (а) – кольцевая мода $A1$ (низшая резонансная частота); (б) – кольцевая мода $A3$; (в) – продольная мода $B2$; (г) – продольная мода $B4$; (д-е) – моды в продольном резонансном детекторе (схема Харрена): (д) – мода $C2$ (низшая резонансная частота); (е) – мода $C4$

которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости (см. рисунок 1.д, е). В резонансе этих продольных акустических мод (типа С) на фланцах (окнах) буферных полостей ОАД расположены пучности колебаний давления стоячей звуковой волны, что увеличивает чувствительность этого детектора к поглощению в окнах по сравнению с кольцевыми акустическими модами типа А дифференциального резонансного ОАД.

Экспериментально показано [A19], что оптимальная длина буферных полостей (L_b) резонансного дифференциального ОАД сравнима с диаметром акустических резонаторов (D_a) этого детектора (см. рисунок 2.а). В этом случае обеспечивается максимальный частотный интервал между резонансами акустических мод $A1$ и $B2$. Разработана и запатентована конструкция модернизированного резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (модель *ОАД-90*, 2006–2007 гг.), которая содержит два параллельных акустических резонатора ($\varnothing 9 \times 90$ мм) и две буферные полости ($\varnothing 20 \times 8 \dots 10$ мм) по краям. Фрагменты АЧХ дифференциального детектора *ОАД-*

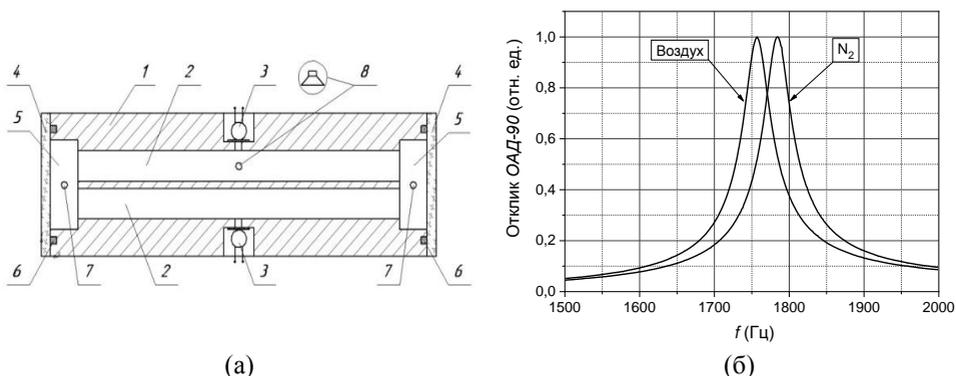


Рисунок 2 – (а) – Схема резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (из нашей работы [A12]): 1 – корпус ОАД; 2 – акустические резонаторы; 3 – микрофоны; 4 – просветленные окна; 5 – буферные полости; 6 – резиновые уплотнения; 7 – отверстия для ввода-вывода газа; 8 – звуковой излучатель; (б) – Фрагмент АЧХ резонансного дифференциального детектора *ОАД-90* вблизи нижней резонансной частоты

90 вблизи нижней резонансной частоты (f_1) представлены на рисунке 2.6 [A12]: $f_1(\text{air}) \approx 1750$ Гц; $f_1(\text{N}_2) \approx 1780$ Гц; добротность резонансов $Q \approx 54$.

Для повышения точности и воспроизводимости измерения поглощения газа в условиях изменения температуры и состава газовых смесей разработан специальный алгоритм оперативного измерения нижней резонансной частоты дифференциального детектора *ОАД-90* [A12]. Для этой цели на звуковой излучатель ОАД подается серия коротких импульсов напряжения с частотой повторения вблизи ожидаемого значения; регистрируются собственные акустические колебания резонансного ОАД; в заданном частотном диапазоне вычисляются компоненты Фурье-преобразования; далее с использованием уточняющего алгоритма вычисляется значение нижней резонансной частоты f_1 детектора. Процедура измерения нижней резонансной частоты детектора *ОАД-90* занимает менее 0,1 с; погрешность не превышает $\pm 0,1$ Гц.

Определен диапазон допустимых скоростей прокачки воздуха через дифференциальный детектор *ОАД-90*. Экспериментально показано, что шумы прокачки воздуха через детектор не фиксируются при скорости прокачки воздуха не более 0,6 л/мин (бесшумный ламинарный поток). Для внерезонаторного расположения детектора *ОАД-90* величина минимально детектируемого поглощения составила $\alpha_{\min}(\text{ext}, 1 \text{ c}) = 7,5 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1}$ (при времени интегрирования 1 с) [A18].

В главе 3 представлены результаты разработки и исследования высокочувствительного лазерного ОА-течеискателя SF₆. Гексафторид серы (он же – элегаз) является эффективным газовым изолятором и широко применяется в

электроэнергетике. В настоящее время различные высоковольтные элементы располагаются внутри диэлектрических покрывок, заполненных чистым SF₆ при давлении ~5...6 атм.

Коммерческие течеискатели элегаза имеют чувствительность ~1 ppm SF₆, что часто бывает недостаточно. Поэтому разработка новых газоанализаторов элегаза с более высокой чувствительностью ~1 ppb является актуальной и востребованной. Сильная широкая полоса поглощения SF₆ с центром $\nu \approx 948 \text{ см}^{-1}$ [23–25] попадает в 10P полосу генерации CO₂ лазера вблизи $\lambda \approx 10,6 \text{ мкм}$ [26] (см. рисунок 3), что позволяет построить высокочувствительный ОА-газоанализатор SF₆ на основе CO₂ лазера.

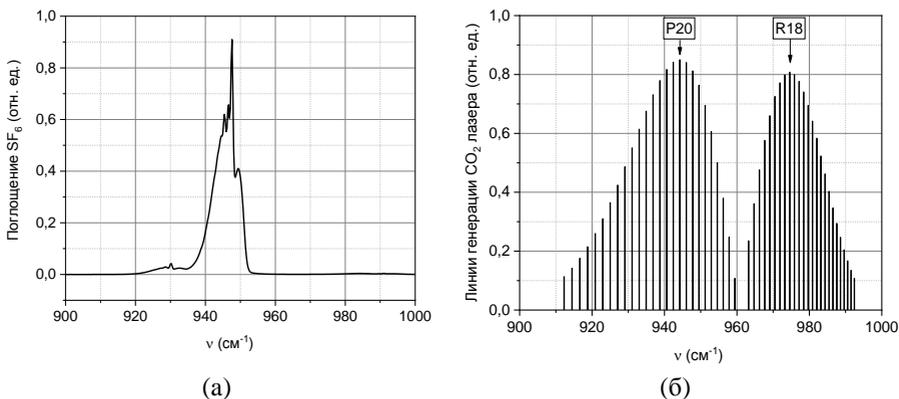
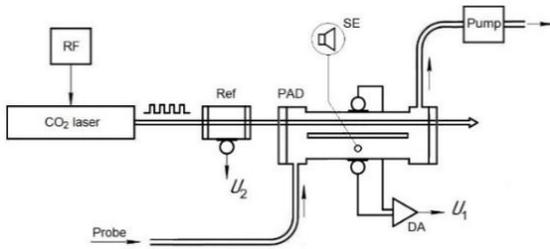
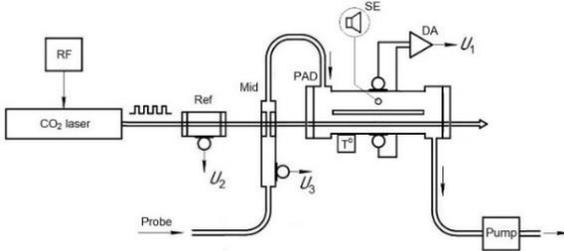


Рисунок 3 – (а) – Спектр поглощения SF₆ в диапазоне 900...1000 см⁻¹ [23];
(б) – спектр излучения CO₂ лазера в диапазоне 900...1000 см⁻¹ [26]

Разработаны и испытаны несколько вариантов лазерного ОА-газоанализатора SF₆ на основе волноводного CO₂ лазера и резонансного дифференциального ОАД с традиционной нормировкой сигналов поглощения в измерительном ОАД по мощности излучения лазера [A04, A05], в которых использованы CO₂ лазеры разработки А.И. Карапузикова (ИЛФ СО РАН) [A03]. Концентрация элегаза определялась из отношения сигналов поглощения в резонансном дифференциальном ОАД и измерителя мощности. Однако при работе CO₂ лазера в свободном режиме генерации происходит спонтанная перестройка длины волны излучения лазера ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$) по различным дискретным линиям вблизи $\lambda \approx 10,6 \text{ мкм}$. Калибровочный коэффициент такой схемы измерений зависит от величины сечения поглощения SF₆, которая из-за нестабильности длины волны излучения CO₂ лазера испытывала значительные вариации до 50 % (см. рисунок 5.а).



(a)



(б)

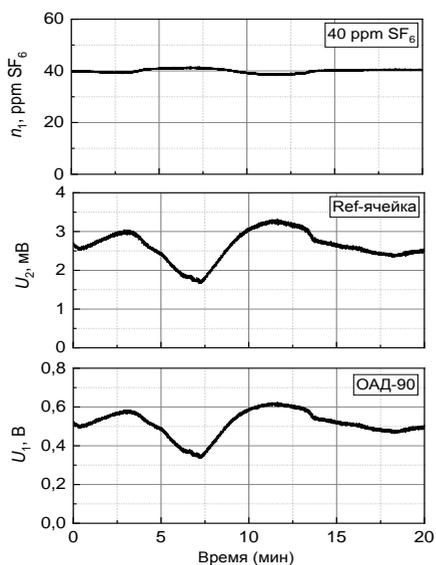
Рисунок 4 – Комбинированные оптические схемы лазерного ОА-газоанализатора SF₆ с отпаянной газонаполненной ОА-ячейкой (из нашей работы [A22]): (а) – оптическая схема RC-3; (б) – расширенная оптическая схема RC-3.1; RF – ВЧ генератор возбуждения волноводного CO₂ лазера; Ref – отпаянная газонаполненная ОА-ячейка; PAD – резонансный дифференциальный детектор ОАД-90; Mid – дополнительный ОА-детектор с малой оптической базой (0,5...1 мм); SE – звуковой излучатель; T° – термодатчик; DA – дифференциальный усилитель; Pump – воздушный насос

Для снижения погрешности измерения концентрации SF₆ соискателем предложено [A14] использовать нормировку сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке (Ref), заполненной газовой смесью с примесью SF₆ (см. рисунок 4.а). В этом случае возможна полная или частичная компенсация зависимости показаний ОА-газоанализатора SF₆ от влияния нестабильности длины волны излучения CO₂ лазера ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$). Проведен анализ нескольких схем построения ОА-газоанализаторов с отпаянными газонаполненными ОА-ячейками [A14].

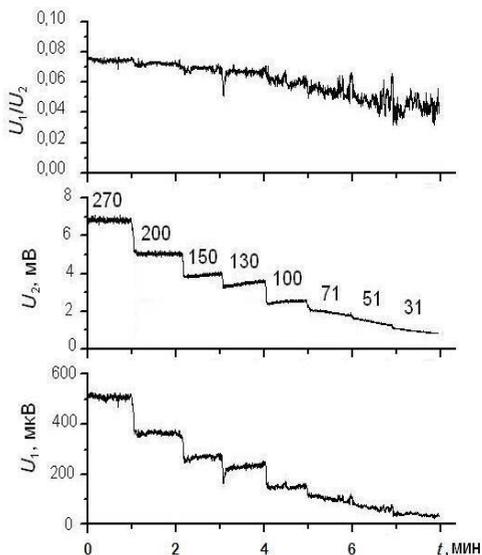
На основе предложенной соискателем оптимальной оптической схемы (RC-3) с отпаянной газонаполненной ОА-ячейкой (Ref) (см. рисунок 4.а) разработан и испытан высокочувствительный лазерный ОА-газоанализатор SF₆ с пороговой чувствительностью ~100 ppt SF₆ [A14, A22]. Оптическая схема ОА-газоанализатора содержит малогабаритный волноводный CO₂ лазер ($\lambda \approx 10,6$ мкм) (разработка А.И. Карапузикова) с ВЧ возбуждением, комбинацию ОА-детекторов Ref-PAD. Измерение концентрации SF₆ в схеме (RC-3) производится по формуле:

$$n_1 = C_{RC3}(f_1) \cdot \frac{U_1}{U_2} \cdot [1 + \tau_2(\lambda_i) \pm \Delta\tau_2], \quad (1)$$

где (U_1/U_2) – отношение сигналов измерительного ОАД (U_1) и отпаянной газонаполненной ОА-ячейки (U_2); $C_{RC3}(f_1)$ – калибровочный коэффициент на



(а)



(б)

Рисунок 5 – Экспериментальные записи сигналов резонансного дифференциального ОАД-90 (U_1), отпаянной газонаполненной ОА-ячейки (U_2), отношения сигналов (U_1/U_2), измеренной концентрации SF_6 (n) при использовании оптической схемы RC-3: **(а)** – долговременные записи сигналов в условиях спонтанной перестройки длины волны излучения CO_2 лазера (смесь $N_2 + 40$ ppm SF_6) (из нашей работы [A14]); **(б)** – записи сигналов при различных значениях средней мощности излучения волноводного CO_2 лазера (мВт, указаны цифрами на среднем графике) при прокачке через детектор ОАД-90 воздуха (0,6 л/мин) с примесью ~ 46 ppb SF_6 (из нашей работы [A15])

резонансной частоте ОАД (f_i); $\tau_2(\lambda_i)$ – оптическая толщина отпаянной газонаполненной ОА-ячейки на длине волны λ_i ; $\Delta\tau_2$ – вариации величины τ_2 из-за нестабильности длины волны ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$). При включении низшая резонансная частота f_1 дифференциального ОАД измеряется автоматически в режиме реального времени согласно разработанного алгоритма [A12] ($f_1 \approx 1750 \dots 1780$ Гц, погрешность $\pm 0,1$ Гц). Выбором параметров отпаянной газонаполненной ОА-ячейки необходимо обеспечить условие $\Delta\tau_2 \ll [1 + \tau_2(\lambda_i)]$. На практике величина τ_2 не превышает $\sim 0,04$.

Нормировка сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в газонаполненной ОА-ячейке (Ref) позволила значительно уменьшить влияние нестабильности длины волны ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$) излучения волноводного CO_2 лазера вблизи $\lambda \approx 10,6$ мкм на показания ОА-газоанализатора SF_6 [A14, A22] (см. рисунок 5.а, где вариации сигналов U_1 и U_2 (до $\sim 50\%$) связаны с нестабильностью длины волны излучения CO_2 лазера ($\lambda_i \pm \Delta\lambda$)). Верхний предел измерения концентрации SF_6 оптической схемой (RC-3) с комбинацией детекторов

Ref-PAD составляет ~ 50 ppm SF_6 , погрешность измерения концентрации SF_6 – не более 3...5 %. Экспериментально установлено, что минимальная необходимая мощность излучения CO_2 лазера составляет ~ 150 мВт (см. рисунок 5.б) [A15].

Для расширения динамического диапазона измерения концентрации SF_6 до ~ 1000 ppm (требование ПДК) соискателем предложено [A22] ввести в схему (*RC-3*) дополнительный ОА-детектор (*Mid*) с малой оптической базой ($\sim 0,5 \dots 1$ мм). В результате расширенная оптическая схема (*RC-3.1*) ОА-газоанализатора с комбинацией детекторов *Ref-Mid-PAD* (см. рисунок 4.б) показала динамический диапазон измерения концентрации элегаза от ~ 100 ppt до ~ 1000 ppm SF_6 (т.е. ~ 7 декад) (см. рисунок 6).

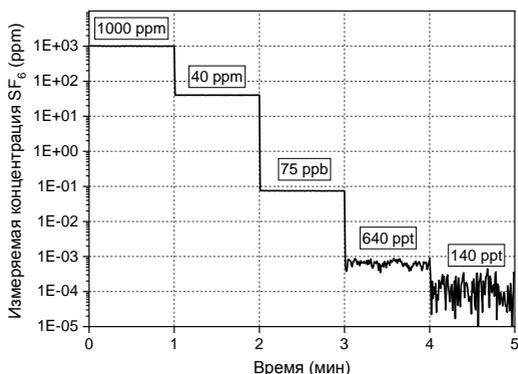


Рисунок 6 – Фрагменты измерения концентрации SF_6 расширенной оптической схемой *RC-3.1* в различных газовых смесях (из нашей работы [A22]): 0-1 – смесь $\text{N}_2 + 1000$ ppm SF_6 ; 1-2 – смесь $\text{N}_2 + 40$ ppm SF_6 ; 2-3 – прокачка через блок ОА-детекторов воздуха (0,6 л/мин) с примесью ~ 75 ppb SF_6 (использована контрольная течь SF_6); 3-4 – фоновый сигнал ОА-газоанализатора при прокачке воздуха (0,6 л/мин) через блок ОА-детекторов; 4-5 – показания ОА-газоанализатора в режиме вычитания фона при прокачке воздуха (0,6 л/мин) через блок ОА-детекторов



Рисунок 7 – Внешний вид лазерных ОА-течеискателей элегаза: (а) – модель «*KARAT*» (ИЛФ СО РАН, 2007 г.); (б) – модель «*SF6 LaserGasTest*» (ООО «Специальные технологии», 2010 г.)

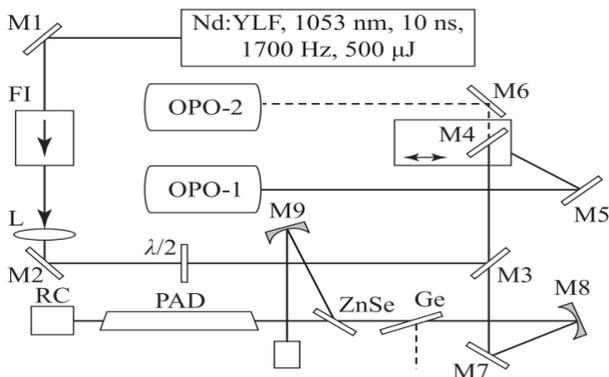
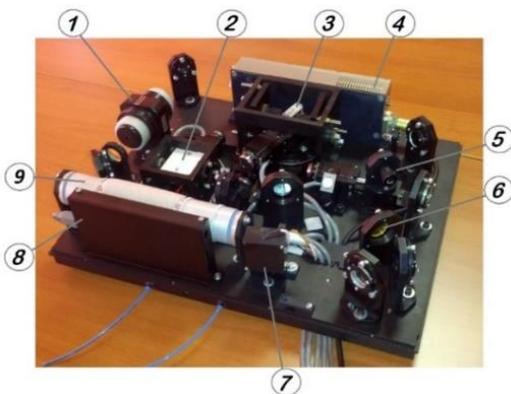


Рисунок 8 – Схема Оптического блока лазерного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз»: *OPO-1* – блок ПГС-1 ($\lambda = 2,5 \dots 4,5$ мкм; MgO:PPLN “fan-out” структура); *OPO-2* – блок ПГС-2 ($\lambda = 4,18 \dots 10,8$ мкм; кристаллы HgGa_2S_4); *M1 \dots M9* – зеркала; *FI* – изолятор Фарадея; *L* – линза; $\lambda/2$ – полуволновая пластинка; *Ge*, *ZnSe* – плоские делительные пластины; *PAD* – резонансный дифференциальный детектор *OAD-90*; *RC* – газонаполненная ОА *Ref*-ячейка



(а)



(б)

Рисунок 9 – (а) – Внешний вид лазерного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» в сборе (2013 г.); (б) – Внешний вид Оптического блока: 1 – изолятор Фарадея; 2 – блок ПГС-1; 3 – блок ПГС-2; 4 – Nd:YLF лазер накачки; 5 – моторизованный селектор каналов; 6 – дихроичное зеркало; 7 – пиродетектор; 8 – плата АЦП; 9 – блок оптико-акустических детекторов

Для измерения высокой концентрации SF_6 (вплоть до 100 %) соискателем предложено [A22] использовать эффект изменения скорости звука в газовой смеси путем измерения низшей резонансной частоты f_1 измерительного ОАД и температуры газа. В результате полный динамический диапазон измерения концентрации SF_6 разработанного ОА-газоанализатора, реализованного в одном приборе, составил рекордные 10 декад (от ~ 100 ppt до 100 % SF_6).

В ходе выполнения исследований в ИЛФ СО РАН в 2007 г. разработана и испытана новая серия переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей SF₆, получившая название «*KARAT*», чувствительность которых как минимум в 1000 раз превосходит чувствительность любого коммерческого течеискателя SF₆. С 2009 г. компания ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск) производит мелкими сериями лазерные ОА-течеискатели элегаза «*KARAT*» / «*SF₆ LaserGasTest*» (см. рисунок 7) [27], в которых используется предложенная соискателем условная оптическая схема *Ref-Mid-PAD* [A22] (см. рисунок 4.б). В 2014 г. ОА-течеискатель элегаза «*SF₆ LaserGasTest*», созданный при определяющем участии соискателя, получил Свидетельство об утверждении типа средств измерения РФ, широко используется на предприятиях электротехнической промышленности в России и за рубежом для детектирования утечек элегаза из газонаполненного высоковольтного оборудования.

В главе 4 описаны результаты разработки и исследования лазерного ОА-газоанализатора «*ЛазерБриз*» [A10], построенного на основе широкополосного перестраиваемого ПГС [A13] и резонансного дифференциального ОАД (см. рисунки 8, 9). Работы по этому проекту были выполнены согласно Гос. контракта № 16.522.11.2001 от 05.08.2011; головной исполнитель – ОАО «ОКТАВА» (г. Новосибирск); соисполнители – компания ООО «Специальные технологии» (г. Новосибирск), ИОА СО РАН (г. Томск); научный руководитель проекта (главный конструктор) – И.В. Шерстов (соискатель). ОА-газоанализатор «*ЛазерБриз*» предназначен для использования в медицине для экспресс-диагностики проб выдоха пациентов, страдающих различными хроническими заболеваниями.

В качестве источника излучения в составе ОА-газоанализатора «*ЛазерБриз*» использован комбинированный ПГС [A13] (см. рисунок 8; разработка Д.Б. Колкера, ИЛФ СО РАН – НГТУ – НГУ – ООО «Специальные технологии») с непрерывной перестройкой длины волны излучения 2,5...10,8 мкм. В состав комбинированного ПГС входят два отдельных ПГС на основе MgO:PPLN «*fan-out*» структуры (блок ПГС-1) и нелинейных кристаллов HgGa₂S₄ (блок ПГС-2), перестраиваемых в различных спектральных диапазонах, при оптической накачке от одного Nd:YLF лазера (1,053 мкм). В оптической схеме ПГС применен моторизованный селектор каналов (поз. *M4*), который доставляет излучение оптической накачки в резонаторы ПГС-1 или ПГС-2.

С помощью ПГС-1 на основе MgO:PPLN «*fan-out*» структуры получена непрерывная перестройка холостой волны в диапазоне 2,5...4,5 мкм. Диапазон непрерывной перестройки ПГС-2 на основе нелинейных кристаллов HgGa₂S₄ составил 4,18...10,8 мкм. Для уменьшения углового перемещения нелинейных

кристаллов в составе ПГС-2 использован не один, а два кристалла HgGa_2S_4 , вырезанные под различными углами θ (идея Д.Б. Колкера [A13]).

Для проверки калибровки длины волны излучения комбинированного ПГС в диапазоне 2,5...10,8 мкм предложено использовать отпаянную газонаполненную ОА-ячейку (*Ref*) по положению характерных пиков поглощения определенных газов-маркеров, заполняющих *Ref*-ячейку [A13] (см. рисунок 10.а, поз. 1–5): 1 – CH_4 ; 2 – N_2O ; 3 – ацетон; 4 – CF_4 ; 5 – SF_6 .

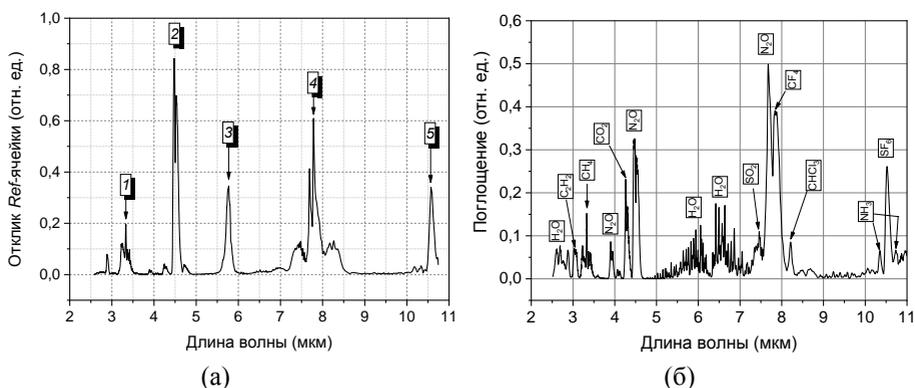


Рисунок 10 – (а) – Экспериментальная запись спектра поглощения газовой смеси в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке (*Ref*) [A13]; (б) – Спектр поглощения многокомпонентной газовой смеси, заполняющей измерительный дифференциальный детектор *ОАД-90* [A10]

С помощью разработанного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» в спектральном диапазоне $\lambda = 2,5...10,8$ мкм записаны и исследованы спектры поглощения 24 различных газовых примесей. Проведена калибровка отклика ОА-газоанализатора на каждый из исследованных газов на определенных длинах волн излучения комбинированного ПГС, совпадающих с характерными пиками поглощения этих газов. Экспериментально записан спектр поглощения сложной многокомпонентной газовой смеси [A10] (см. рисунок 10.б).

Относительная погрешность измерения концентрации различных газов составила от 3,5 % до 26 %. Определен класс точности средства измерения медицинского назначения – 30. Достоверность определения всех газовых примесей составила не менее 0,95. Пороговая чувствительность газоанализатора «ЛазерБриз», измеренная по поглощению CF_4 на длине волны 7,81 мкм, составила ~ 1 ppb CF_4 (в режиме измерений с вычитанием фона).

Разработана, испытана и запатентована новая система сбора и осушения образцов выдоха пациента [A23], которая основана на вымораживании влаги в морозильнике непосредственно в пробоотборном пакете, не требует помещения в газоанализатор, что делает ее универсальной. Образец выдоха собирается в

одноразовый стерильный пластиковый пакет с клапаном (например, стандартный одноразовый мочеприемник, 750 мл) и помещается в морозильную камеру ($-25\dots-45$ °С; 10...15 мин). Затем с помощью одноразового шприца (50 мл) через стенку пакета отбирают осушенную охлажденную пробу выдоха и переносят ее в газовый тракт ОА-газоанализатора.

Эксперименты с отбором пробы реального выдыхаемого воздуха, вымораживанием влаги в морозильной камере и измерением остаточной влажности с помощью ОА-газоанализатора показали полное совпадение с расчетными параметрами [A23]. Показано, что использование специального морозильника с температурой до -45 °С и ниже позволит снизить содержание водяного пара в охлажденной пробе выдоха не менее чем в 200 раз по сравнению с исходным уровнем. Предложено стерилизовать внутренние поверхности газового тракта ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» путем продувки через него воздуха с примесью озона (10...15 мин) [A23].

Начиная с 2013 г. лазерный ОА-газоанализатор «ЛазерБриз» активно используется для исследования проб выдоха, взятых у добровольцев (здоровых людей) и пациентов медицинских клиник г. Томска, страдающих различными хроническими заболеваниями [28–31].

В главе 5 представлены результаты разработки аэромобильного лазерного ОА-газоанализатора метана на длине волны 7,7 мкм [A21, A25]. Исследования проведены в сотрудничестве с компанией ООО «СканАэро» (г. Новосибирск), Новосибирским государственным университетом (совместная «Лаборатория квантово-оптических технологий» ИЛФ СО РАН и НГУ).

Оптическая схема ОА-сенсора метана содержит квантово-каскадный лазер (ККЛ), резонансный дифференциальный детектор *ОАД-90* и газонаполненную ОА-ячейку (*Ref*) (см. рисунок 11) [A21, A25]. Нормировка сигналов поглощения в дифференциальном детекторе *ОАД-90* производится по сигналам поглощения в *Ref*-ячейке. Это техническое решение позволяет значительно снизить погрешность измерения поглощения метана (с ~ 25 % до ~ 3 %) (см. рисунок 12.6) [A21], вызванную нестабильностью длины волны излучения ККЛ при изменении температуры. Экспериментально определена оптимальная рабочая температура ККЛ (28,2 °С) по максимальному уровню поглощению метана в *Ref*-ячейке (см. рисунок 12.а) [A25]. При этом длина волны излучения ККЛ равна 7,652 мкм, средняя мощность ~ 24 мВт.

В измерительном детекторе *ОАД-90* использованы современные малошумящие электретные микрофоны с отношением (S/N) = 80 дБ. В результате пороговая чувствительность ОА-газоанализатора метана на основе ККЛ достигла величины $n_{\min} = (26,64 \pm 8,39)$ ppb CH_4 (при полосе пропускания $\Delta f = 20$ Гц), что соответствует величине параметра ($NNEA$) = $8,22 \times 10^{-10}$ $\text{см}^{-1} \cdot \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$ [A25]. При

увеличении времени интегрирования до 10 с величина стандартной дисперсии (1σ) может быть снижена до уровня ~ 1 ppb CH_4 и ниже.

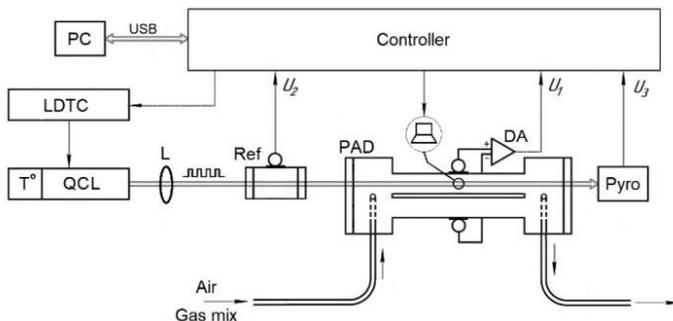


Рисунок 11 – Схема OA-сенсора метана [A21, A25]; PC – компьютер; LDTC – контроллер управления лазерным диодом и температурой (модель ITC4002QCL, Thorlabs); T° – термостат лазера; QCL – квантово-каскадный лазер (модель QD7500CM1, Thorlabs); L – линза; Ref – отпаиваемая газонаполненная OA-ячейка; PAD – резонансный дифференциальный детектор OAD-90; Pyro – пиродетектор (модель МГ-30); DA – дифференциальный усилитель

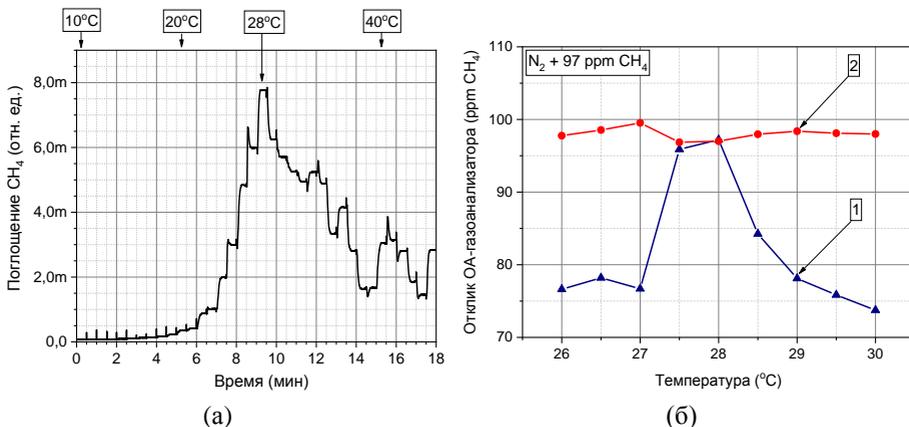


Рисунок 12 – (а) – Измерение поглощения метана в отпаиваемой газонаполненной OA-ячейке (схема Ref/Pyro) при ступенчатом изменении температуры ККЛ в диапазоне 10...46 °C, шаг 1 °C [A25]; (б) – Экспериментальное измерение концентрации метана при изменении температуры ККЛ в диапазоне ± 2 °C от оптимальной температуры (28 °C) [A21]:

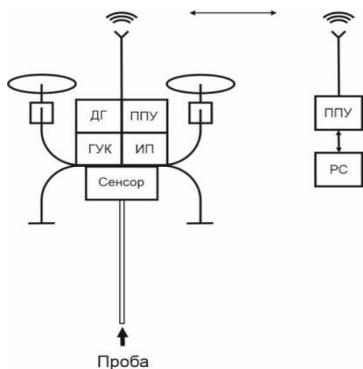
1 – нормировка (PAD/Pyro); 2 – нормировка (PAD/Ref); дифференциальный детектор OAD-90 заполнен газовой смесью $\text{N}_2 + 97$ ppm CH_4

Проведено сравнение параметров разработанного OA-газоанализатора метана с лучшими результатами работ других групп исследователей в области ЛОАС. Показано [A25], что разработанный лазерный OA-сенсор метана на основе ККЛ ($\lambda \approx 7,65$ мкм), резонансного дифференциального детектора OAD-90 и

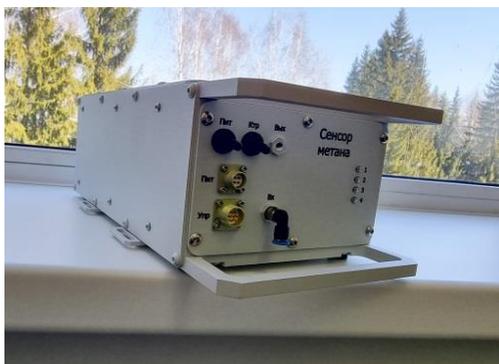
отпаянной газонаполненной ОА-ячейки в настоящее время является одним из наиболее высокочувствительных ОА-газоанализаторов CH_4 , который может быть использован на борту БПЛА. Кроме того, показано, что лазерные ОА-газоанализаторы среднего ИК диапазона на основе резонансного дифференциального детектора *ОАД-90* практически ничем не уступают, а в ряде случаев заметно превосходят пороговую чувствительность *QEPA5*-датчиков метана (с использованием кварцевых камертонов) [20, 32, А25].

По сути оптическая схема на рисунке 11 представляет собой универсальную платформу для построения лазерных ОА-газоанализаторов для детектирования различных газовых примесей.

Разработан (при определяющем участии соискателя) экспериментальный образец аэромобильного Сенсора метана на основе ККЛ ($\lambda = 7,652$ мкм) (см. рисунок 13) [А25]. Областью применения аэромобильного Сенсора метана является измерение фоновой концентрации метана в воздухе при проведении геофизических исследований с помощью БПЛА. На рисунке 13.а представлена схема работы аэромобильного Сенсора метана в реальных условиях. Газоанализатор с помощью ремней мягко закреплен под днищем БПЛА. Для забора пробы воздуха в приземном слое атмосферы используется пробозаборный шланг (длиной до $\sim 3 \dots 6$ м) с грузилом и фильтром на конце. Грузило необходимо для придания вертикального положения пробозаборному шлангу.



(а)



(б)

Рисунок 13 – (а) – Схема практического использования ОА-сенсора метана на борту БПЛА: *ГУК* – головной управляющий контроллер; *ИП* – источник питания (аккумулятор); *ДГ* – датчик *ГЛОНАСС*; *ППУ* – приемно-передающее устройство; *РС* – компьютер оператора;

(б) – Внешний вид аэромобильного лазерного ОА-сенсора метана [А25]

Экспериментальный образец аэромобильного Сенсора метана (см. рисунок 13.б) [А25] имеет габаритные размеры $315 \times 165 \times 110$ мм; масса не превышает 3,1 кг. Питание Сенсора метана производится от внешнего источника

постоянного тока (аккумулятор) напряжением от +9 до +60 В; потребляемая мощность не превышает 20 Вт.

В **Заключении** подводятся итоги диссертационной работы, формулируются ее основные результаты:

1) Экспериментально показано, что в резонансном дифференциальном ОАД на низшей резонансной частоте формируется акустическая мода (типа А) с кольцевой траекторией распространения колебаний давления через оба акустических резонатора, у которой узлы выступают в буферные полости на расстояние 1...2 мм и не контактируют с окнами детектора, что обеспечивает снижение влияния поглощения в окнах. Также показано, что в резонансном дифференциальном ОАД формируются продольные акустические моды (типа В), у которых пучности колебаний давления расположены на фланцах (окнах) ОАД. При малой длине буферных полостей обеспечивается максимальный частотный интервал между резонансами низшей кольцевой акустической моды (типа А) и ближайшей продольной акустической моды (типа В).

2) Экспериментально установлено, что в резонансном продольном ОАД формируются только резонансные продольные акустические моды (типа С; аналог мод типа В дифференциального ОАД), которые распространяются по всей длине детектора, включая буферные полости, отражаясь от фланцев ОАД. Причем на фланцах (окнах) детектора расположены пучности колебаний давления.

3) Разработана и испытана процедура оперативного измерения низшей резонансной частоты ОАД практически в реальном времени (не более 0,1 с), погрешность измерения не превышает $\pm 0,1$ Гц. Данная процедура обеспечивает сохранение калибровки отклика лазерного ОА-газоанализатора на поглощение газа-маркера в условиях изменения температуры и состава исследуемых газовых смесей, снижает погрешности измерений поглощения.

4) На основе волноводного CO_2 лазера и резонансного дифференциального ОАД с малой длиной буферных полостей (детектор *ОАД-90*) разработан высокочувствительный лазерный ОА-газоанализатор элегаза с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt SF_6 , которая превосходит чувствительность лучших течискателей элегаза в мире как минимум в ~ 1000 раз. Для снижения погрешности измерения концентрации SF_6 предложено проводить нормировку сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке (*Ref*), заполненной газовой смесью с примесью SF_6 . В этом случае происходит компенсация зависимости показаний ОА-газоанализатора SF_6 от влияния нестабильности длины волны излучения CO_2 лазера. Показано, что для уверенного детектирования малых концентраций SF_6 (ppb уровень) с помощью разработанного лазерного ОА-газоанализатора необходима средняя мощность излучения CO_2 лазера не менее ~ 150 мВт.

5) Для снижения энергопотребления и тепловыделения элементов лазерного ОА-газоанализатора SF₆ предложено установить частоту повторения импульсов излучения CO₂ лазера, равной одной из субгармоник низшей резонансной частоты дифференциального ОАД. Это техническое решение привело к существенному уменьшению общего энергопотребления лазерного ОА-газоанализатора SF₆ без снижения пороговой чувствительности, что позволило использовать в приборе встроенный *Li-ion* аккумулятор и обеспечить автономной ресурс непрерывной работы прибора в течение ~6 час.

6) Экспериментально показано, что оптическая схема лазерного ОА-газоанализатора SF₆ с комбинацией детекторов *Ref-PAD* имеет верхний предел измерения концентрации SF₆ ~50 ppm из-за насыщения отклика резонансного дифференциального детектора *ОАД-90*. Для расширения динамического диапазона измерения концентрации SF₆ до ~1000 ppm (требуемый уровень ПДК) в оптической схеме лазерного ОА-газоанализатора SF₆ предложено использовать дополнительный ОА-детектор (*Mid*) с малой оптической базой (~0,5...1 мм). В результате динамический диапазон измерения составил от ~100 ppt до 1000 ppm SF₆ (~7 декад).

7) Экспериментально показана возможность расширения динамического диапазона измерения концентрации элегаза до ~10 декад (от ~100 ppt до 100 % SF₆), используя эффект изменения скорости звука в газовых смесях с высоким содержанием примеси SF₆ (от 0,1 % до 100 %). При этом достаточно измерять только низшую резонансную частоту дифференциального детектора *ОАД-90* и температуру газовой смеси.

8) Разработана и испытана новая серия переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей SF₆ (серия «*KARAT*»). Одна из модернизированных моделей лазерного ОА-течеискателя элегаза («*SF₆ LaserGasTest*») зарегистрирована в реестре Средств измерений Росстандарта.

9) Разработан и исследован лазерный ОА-газоанализатор «*ЛазерБриз*» на основе широкополосного перестраиваемого ПГС (2,5...10,8 мкм) и резонансного дифференциального детектора *ОАД-90*, предназначенный для экспресс-анализа выдыхаемого воздуха. В ОА-газоанализаторе «*ЛазерБриз*» использован комбинированный ПГС с непрерывной плавной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне $\lambda_{id} = 2,5...10,8$ мкм, состоящий из двух отдельных ПГС на основе MgO:PPLN «*fan-out*» структуры (блок ПГС-1) и нелинейных кристаллов HgGa₂S₄ (блок ПГС-2) при оптической накачке от одного Nd:YLF лазера ($\lambda_p = 1,053$ мкм). Предложено использовать отпаиваемую газонаполненную ОА-ячейку (*Ref*) для проверки калибровки длины волны излучения перестраиваемого ПГС в спектральном диапазоне $\lambda = 2,5...10,8$ мкм по положению характерных пиков поглощения определенных газов-маркеров, заполняющих *Ref*-ячейку.

10) Экспериментально исследованы спектры поглощения 24 газовых соединений. Проведена калибровка отклика ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» на каждый из исследованных газов. Относительная погрешность измерения концентрации различных газов составила от 3,5 % до 26 %. Достоверность определения всех газов составила не менее 0,95. Пороговая чувствительность ОА-газоанализатора «ЛазерБриз» составила ~1 ppb CF₄ (при $\lambda = 7,795$ мкм).

11) Разработана и испытана новая система сбора и осушения проб выдыха пациентов, которая основана на вымораживании влаги в морозильнике непосредственно в пробоотборном пакете, не требует помещения специального оборудования в ОА-газоанализатор, что делает ее универсальной для применения в других устройствах.

12) Разработан и исследован ОА-сенсор метана, построенный на основе квантово-каскадного лазера ($\lambda \approx 7,65$ мкм), резонансного дифференциального детектора ОАД-90, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки. Пороговая чувствительность ОА-сенсора метана составила ~25 ppb CH₄ (средний фоновый сигнал), величина нормированного параметра ($NNEA$) = $8,22 \times 10^{-10}$ см⁻¹·Вт·Гц^{-1/2}, что ставит его в ряд наиболее чувствительных лазерных ОА-сенсоров метана. Сравнительный анализ показал, что лазерные ОА-газоанализаторы среднего ИК диапазона на основе резонансного дифференциального детектора ОАД-90 практически ничем не уступают, а в ряде случаев заметно превосходят пороговую чувствительность QEPAS-датчиков метана.

13) Разработан экспериментальный образец аэромобильного оптико-акустического сенсора метана на основе ККЛ ($\lambda = 7,652$ мкм), приспособленного для работы на борту БПЛА. Масса прибора не превышает 3,1 кг; питание производится от внешнего источника постоянного тока напряжением +9...+60 В; потребляемая мощность не превышает 20 Вт.

Таким образом, на основе модернизированного варианта резонансного дифференциального ОАД соискателем (лично или при его определяющем участии) разработан ряд лазерных ОА-газоанализаторов с использованием волноводных СО₂ лазеров ($\lambda = 9,2...10,8$ мкм; разработка А.И. Карапузикова), широкополосного комбинированного ПГС ($\lambda = 2,5...10,8$ мкм; разработка Д.Б. Колкера), квантово-каскадного лазера ($\lambda = 7,7$ мкм), которые нашли широкое применение в электроэнергетике (поиск мест утечки SF₆ из газонаполненного высоковольтного оборудования), медицине (многокомпонентный экспресс-анализ выдыхаемого воздуха), при измерении фоновой концентрации метана в атмосфере (геологоразведка, МЧС и др.).

Приложения содержат различные дополнительные материалы по разработке высокочувствительного лазерного ОА-течеискателя SF₆ «KARAT» /

«*SF₆ LaserGasTest*», лазерного ОА-газоанализатора «*ЛазерБриз*» на основе широкополосного перестраиваемого ПГС ($\lambda = 2,5 \dots 10,8$ мкм), Акты внедрения.

Автор считает своим долгом выразить глубокую признательность проф., д.ф.-м.н. Ю.Н. Пономареву, к.ф.-м.н. В.А. Капитанову, к.ф.-м.н. Б.Г. Агееву (все – ИОА СО РАН, г. Томск) за сотрудничество и консультации при выполнении данной работы, д.ф.-м.н. Д.Б. Колкеру (НГУ, ИЛФ СО РАН, НГТУ), к.ф.-м.н. А.И. Карапузикову, В.В. Спицыну, С.Б. Черникову, В.А. Васильеву, А.М. Гончаренко, Р.В. Пустоваловой (все – ИЛФ СО РАН), к.ф.-м.н. Н.Ю. Костюковой, к.ф.-м.н. А.А. Бойко (оба – ИЛФ СО РАН, НГУ, ООО «Специальные технологии»), А.А. Карапузикову, К.Г. Зену (оба – ООО «Специальные технологии») за многолетнее плодотворное сотрудничество, всем другим коллегам из ИЛФ СО РАН, ООО «Специальные технологии», ОАО «ОКТАВА», НГУ, в коллективе которых автор разрабатывал и исследовал новые модели лазерных ОА-газоанализаторов, д.т.н. В.А. Жмудю, д.ф.-м.н. А.К. Дмитриеву, д.т.н. Б.В. Поллеру, к.т.н. А.Н. Бритвину (все – ИЛФ СО РАН) за полезные замечания и рекомендации при оформлении диссертации, а также другим сотрудникам, которые помогали в подготовке и проведении экспериментов, обработке экспериментальных данных, оформлении рисунков, текстов статей, и проч.

Основные результаты диссертации опубликованы в работах:

- A01. Пономарев Ю.Н., Капитанов В.А., Карапузиков А.И., Шерстов И.В. Измерения уширения и сдвига линий поглощения молекул столкновениями с селективно возбужденными молекулами буферного газа. 1. Экспериментальный стенд // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 10. – С. 865–868.
- A02. Шерстов И.В., Капитанов В.А., Агеев Б.Г., Карапузиков А.И., Пономарев Ю.Н. Лазерный оптико-акустический течеискатель // Оптика атмосферы и океана. – 2004. – Т. 17. – № 2–3. – С. 119–123. [Sherstov I.V., Kapitanov V.A., Ageev B.G., Karapuzikov A.I., Ponomarev Y.N. Laser optoacoustic leak detector // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2004. – Vol. 17. – N 2–3. – P. 102–105.]
- A03. Шерстов И.В., Бычков К.В., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Спицын В.В., Черников С.Б. Двухканальная CO₂ лазерная система для гетеродинного лидара // Оптика атмосферы и океана. – 2005. – Т. 18. – № 3. – С. 270–276. [Sherstov I.V., Bychkov K.V., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Spitsin V.V.,

Chernikov S.B. Two-channel CO₂ laser system for heterodyne lidar // Atmospheric and oceanic optics. – 2005. – Vol. 18. – N 3. – P. 248–253.]

- A04. Карапузиков А.И., Шерстов И.В., Агеев Б.Г., Капитанов В.А., Пономарев Ю.Н. Лазерные сенсоры-газоанализаторы на основе интеллектуальных волноводных CO₂-лазеров и резонансных оптико-акустических детекторов и их приложения // Оптика атмосферы и океана. – 2007. – Т. 20. – № 5. – С. 453–458. [Karapuzikov A.I., Sherstov I.V., Ageev B.G., Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N. Laser sensors-gas analyzers based on smart waveguide CO₂ lasers and resonance photoacoustic detectors and their applications // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2007. – Vol. 20. – N 5. – P. 418–423.]
- A05. Lee C.-M., Bychkov K.V., Karapuzikov A.I., Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Kapitanov V.A., Ponomarev Y.N. High-sensitivity laser photoacoustic leak detector // Optical Engineering. – 2007. – Vol. 46. – N 6. – P. 064302.
- A06. Каштанов Д.А., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Шерстов И.В. Стабилизация линии излучения волноводного CO₂-лазера для лазерного оптико-акустического детектора утечек SF₆ // Оптика атмосферы и океана. – 2011. – Т. 24. – № 5. – С. 411–417. [Kashtanov D.A., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Sherstov I.V. Stabilization of the waveguide CO₂ laser line for a laser photoacoustic SF₆-leak detector // Atmospheric and Oceanic Optics. – 2011. – Vol. 24. – N 5. – P. 495–501.]
- A07. Kolker D.B., Sherstov I.V., Karapuzikov A.I., Karapuzikov A.A., Boyko A.A., Starikova M.K., Dukhovnikova N.Yu., Loconov V.N., Shtyrov M.Yu., Miroschnichenko I.B., Zenov K.G., Miroschnichenko M.B. PAD spectrometer based on wide tunable optical parametric oscillator for noninvasive medical diagnostics // Optics and Photonics Journal. – 2013. – Vol. 3. – N 2B. – P. 43–46.
- A08. Колкер Д.Б., Бойко А.А., Духовникова Н.Ю., Зенов К.Г., Шерстов И.В., Старикова М.К., Мирошниченко И.Б., Мирошниченко М.Б., Каштанов Д.А., Кузнецова И.Б., Штыров М.Ю., Zachariadis S., Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Локонов В.Н. Параметрический генератор света на основе периодических структур ниобата лития с плавной перестройкой длины волны излучения // Приборы и техника эксперимента. – 2014. – № 1. – С. 85–89. [Kolker D.B., Boyko A.A., Dukhovnikova N.Y., Zenov K.G., Sherstov I.V., Starikova M.K., Miroschnichenko I.B., Miroschnichenko M.B., Kashtanov D.A., Kuznetsova I.B., Shtyrov M.Y., Karapuzikov A.I., Karapuzikov A.A., Lokonov V.N., Zachariadis S. Continuously wavelength tuned optical parametric oscillator based on fan-out periodically poled lithium niobate // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Vol. 57. – N 1. – P. 50–54.]
- A09. Карапузиков А.А., Карапузиков А.И., Каштанов Д.А., Мирошниченко И.Б., Шерстов И.В. Компактный частотно-стабилизированный импульсно-периодический CO₂-лазер для калибровки измерителей длин волн // Приборы

- и техника эксперимента. – 2014. – № 2. – С. 122-126. [Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Karapuzikov A.I., Kashtanov D.A., Miroshnichenko I.B. A compact frequency-stabilized pulse-periodic waveguide CO₂ laser for calibration of wavelength meters // Instruments and Experimental Techniques. – 2014. – Vol. 57. – N 2. – P. 209–213.]
- A10. Karapuzikov A.A., Sherstov I.V., Karapuzikov A.I., Shtyrov M.Y., Dukhovnikova N.Y., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Tikhonyuk I.I., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko M.B., Kolker D.B., Myakishev Y.B., Lokonov V.N., Kistenev Y.V., Kuzmin D.A. LaserBreeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients // Physics of Wave Phenomena. – 2014. – Vol. 22. – N 3. – P. 189–196.
- A11. Kostyukova N.Y., Kolker D.B., Zenov K.G., Boyko A.A., Starikova M.K., Sherstov I.V., Karapuzikov A.A. Mercury thiogallate nanosecond optical parametric oscillator continuously tunable from 4.2 to 10.8 μm // Laser Physics Letters. – 2015. – Vol. 12. – N 9. – A.n. 095401.
- A12. Шерстов И.В., Васильев В.А., Гончаренко А.М., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В., Карапузиков А.И. Метод измерения резонансной частоты оптико-акустического детектора в реальном времени // Приборы и техника эксперимента. – 2016. – № 5. – С. 133–137. [Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Goncharenko A.M., Zenov K.G., Pustovalova R.V., Karapuzikov A.I. Method for measuring the resonant frequency of photoacoustic detector in the real-time mode // Instruments and Experimental Techniques. – 2016. – Vol. 59. – N 5. – P. 749–753.]
- A13. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. Комбинированный параметрический генератор света с непрерывной перестройкой длины волны излучения в спектральном диапазоне 2,5-10,8 мкм // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 1. – С. 14-19. [Kolker D.B., Sherstov I.V., Pustovalova R.V., Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Zenov K.G. Combined optical parametric oscillator with continuous tuning of radiation wavelength in the spectral range 2.5-10.8 μm // Quantum Electronics. – 2017. – Vol. 47. – N 1. – P. 14–19.]
- A14. Шерстов И.В., Васильев В.А., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В., Спицын В.В., Черников С.Б. Разработка и исследование лазерного оптико-акустического газоанализатора SF₆ // Приборы и техника эксперимента. – 2017. – № 3. – С. 106–113. [Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Zenov K.G., Pustovalova R.V., Spitsin V.V., Chernikov S.B. Development and research of a laser photo-acoustic SF₆ gas analyzer // Instruments and Experimental Techniques. – 2017. – Vol. 60. – N 3. – P. 407–413.]
- A15. Шерстов И.В., Васильев В.А., Карапузиков А.И., Зенов К.Г., Пустовалова Р.В. Снижение энергопотребления лазерного оптико-

- акустического газоанализатора SF₆ // Приборы и техника эксперимента. – 2018. – № 4. – С. 117–124. [Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Zenov K.G., Pustovalova R.V. Reducing the energy consumption of a laser photo-acoustic SF₆ gas analyzer // Instruments and Experimental Techniques. – 2018. – Vol. 61. – N 4. – P. 583–589.]
- A16. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Кистенев Ю.В., Нюшков Б.Н., Зенов К.Г., Шадринцева А.Г., Третьякова Н.Н. Перестраиваемый в широком спектральном интервале источник лазерного излучения среднего ИК диапазона для оптико-акустической спектроскопии // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – № 1. – С. 29–34. [Kolker D.B., Sherstov I.V., Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Nyushkov B.N., Kistenev Y.V., Zenov K.G., Shadrintseva A.G., Tretyakova N.N. Broadband tunable source of mid-IR laser radiation for photoacoustic spectroscopy // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49. – N 1. – P. 29–34.]
- A17. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Ерушин Е.Ю., Нюшков Б.Н. Широкополосный источник излучения среднего ИК диапазона на основе параметрического генератора света с MgO:PPLN-структурой // Квантовая электроника. – 2019. – Т. 49. – № 2. – С. 191–194. [Kolker D.B., Sherstov I.V., Kostyukova N.Y., Boyko A.A., Nyushkov B.N., Erushin E.Y. Broadband mid-IR source based on a MgO:PPLN optical parametric oscillator // Quantum Electronics. – 2019. – Vol. 49. – N 2. – P. 191–194.]
- A18. Sherstov I.V., Vasiliev V.A., Karapuzikov A.I., Zenov K.G. Comparative studies of photo-acoustic gas analyzers based on tunable CO₂ lasers with external and intracavity detector arrangement // Infrared Physics & Technology. – 2020. – Vol. 105. – A.n. 103170.
- A19. Sherstov I., Chetvergova L. Experimental researches of acoustical modes of various types of resonant photo-acoustic detectors // Optics Communications. – 2020. – Vol. 462. – A.n. 125184.
- A20. Шерстов И.В., Колкер Д.Б. Оптико-акустический газоанализатор метана на основе параметрического генератора света с длиной волны 3,3 мкм // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 11. – С. 1063–1067. [Sherstov I.V., Kolker D.B. Photoacoustic methane gas analyser based on a 3.3- μ m optical parametric oscillator // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50. – N 11. – P. 1063-1067.]
- A21. Sherstov I.V., Kolker D.B., Boyko A.A., Vasiliev V.A., Pustovalova R.V. Methane photo-acoustic gas analyzer based on 7.7- μ m quantum cascade laser // Infrared Physics & Technology. – 2021. – Vol. 117. – A.n. 103858.
- A22. Sherstov I.V., Vasiliev V.A. Highly sensitive laser photo-acoustic SF₆ gas analyzer with 10 decades dynamic range of concentration measurement // Infrared Physics & Technology. – 2021. – Vol. 119. – A.n. 103922.

- A23. Sherstov I.V., Pustovalova R.V. Development of a new system to collect and dry patient exhalation samples for laser photo-acoustic gas analyzer // *Lasers in Medical Science*. – 2021. – Vol. 36. – N 1. – P. 33–41.
- A24. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Бойко А.А., Костюкова Н.Ю., Ерушин Е.Ю., Павлюк А.В. Квантово-каскадные лазеры среднего ИК-диапазона в компактных оптико-акустических газовых сенсорах // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2022. – Т. 89. – № 4. – С. 580–586. [Kolker D.B., Sherstov I.V., Boiko A.A., Kostyukova N.Yu., Erushin E.Yu., Pavlyuk A.V. Mid-IR Range Quantum-Cascade Lasers in Compact Optoacoustic Gas Analyzers // *Journal of Applied Spectroscopy*. – 2022. – Vol. 89. – P. 742–747.]
- A25. Sherstov I.V., Kolker D.B., Vasiliev V.A., Pavlyuk A.V., Miroshnichenko M.B., Boyko A.A., Kostyukova N.Yu., Miroshnichenko I.B. Laser photo-acoustic methane sensor (7.7 μm) for use at unmanned aerial vehicles // *Infrared Physics & Technology*. – 2023. – Vol. 133. – A.n. 104865.

Патенты:

1. Капитанов В.А., Карапузиков А.И., Пономарев Ю.Н., Шерстов И.В. Оптико-акустический лазерный течеискатель / Патент на полезную модель RU 38228, 27.05.2004. Заявка № 2003134766/20 от 01.12.2003. Опубликовано: 27.05.2004, Бюл. № 15.
2. Капитанов В.А., Карапузиков А.И., Пономарев Ю.Н., Шерстов И.В. Резонансный оптико-акустический детектор и оптико-акустический лазерный газоанализатор / Патент на полезную модель RU 51746 U1, 27.02.2006. Заявка № 2005109649/22 от 04.04.2005. Опубликовано: 27.02.2006, Бюл. № 6.
3. Васильев В.А., Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Шерстов И.В. Лазерный оптико-акустический газоанализатор / Патент на полезную модель RU 90905 U1, 20.01.2010. Заявка № 2009134766/22 от 16.09.2009. Опубликовано: 20.01.2010, Бюл. № 2.
4. Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Шерстов И.В. Оптико-акустический детектор / Патент на полезную модель RU 133306 U1, 10.10.2013. Заявка № 2012150902/28 от 28.11.2012. Опубликовано: 10.10.2013, Бюл. № 28.
5. Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Колкер Д.Б., Шерстов И.В. Генератор лазерного излучения с перестраиваемой длиной волны / Патент на полезную модель RU 133355 U1, 10.10.2013. Заявка № 2012136126/28 от 22.08.2012. Опубликовано: 10.10.2013, Бюл. № 28.
6. Карапузиков А.И., Карапузиков А.А., Колкер Д.Б., Шерстов И.В. Оптико-акустический газоанализатор / Патент на полезную модель RU 139181 U1, 10.04.2014. Заявка № 2013114813/28 от 01.04.2013. Опубликовано: 10.04.2014, Бюл. № 10.

7. Карапузиков А.А., Шерстов И.В. Устройство подготовки газовых проб для анализа / Патент на полезную модель RU 150417 U1, 20.02.2015. Заявка № 2013154662/14 от 18.04.2014. Опубликовано: 20.02.2015, Бюл. № 5.
8. Шерстов И.В. Резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор / Патент на полезную модель 199702 U1, 15.09.2020. Заявка № 2020119036 от 02.06.2020. Опубликовано: 15.09.2020, Бюл. № 26.
9. Шерстов И.В. Лазерный оптико-акустический газоанализатор и резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор / Патент на изобретение 2748054 С1, 19.05.2021. Заявка № 2020119016 от 02.06.2020. Опубликовано: 19.05.2021, Бюл. № 14.
10. Шерстов И.В. Резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор / Патент на изобретение 2761906 С1, 14.12.2021. Заявка № 2020143429 от 25.12.2020. Опубликовано: 14.12.2021, Бюл. № 35.

Список использованной литературы

1. Hübschmann H.J. Handbook of GC-MS: Fundamentals and Applications. – 3 ed. – John Wiley & Sons, 2015. – 863 pp. – ISBN 9783527674336.
2. Жаров В.П., Летохов В.С. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия. – М: Наука, 1984. – 320 с.
3. Пономарев Ю.Н., Агеев Б.Г., Зигрист М.В., Капитанов В.А., Куртуа Д., Никифорова О.Ю. Лазерная оптико-акустическая спектроскопия межмолекулярных взаимодействий в газах / Под ред. Л.Н. Синецы. – Томск: МГП «РАСКО», 2000. – 199 с. – ISBN 5-88276-055-5.
4. Harren F.J.M., Cristescu S.M. Photoacoustic Spectroscopy in Trace Gas Monitoring // Encyclopedia of Analytical Chemistry. – John Wiley & Sons, Ltd., 2019. – <https://doi.org/10.1002/9780470027318.a0718.pub3>.
5. Patimisco P., Spagnolo V. Quartz-Enhanced Photoacoustic Spectroscopy for Trace Gas Sensing // Encyclopedia of Analytical Chemistry: Applications, Theory and Instrumentation. – Wiley Online Library, 2021.
6. Yin Y., Ren D., Li C., Chen R., Shi J. Cantilever-enhanced photoacoustic spectroscopy for gas sensing: A comparison of different displacement detection methods // Photoacoustics. – 2022. – Vol. 28. – A.n. 100423.
7. Miklos A., Hess P., Bozoki Z. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology // Rev. Sci. Instrum. – 2001. – Vol. 72. – N 4. – P. 1937–1955.
8. Spitz O., Grillot F. A review of recent results of mid-infrared quantum cascade photonic devices operating under external optical control // J. Phys. Photonics. – 2022. – Vol. 4. – N 2. – A.n. 022001.

9. Miklós A., Lörincz A. Windowless resonant acoustic chamber for laser-photoacoustic applications // *Appl. Phys. B.* – 1989. – Vol. 48. – P. 213–218.
10. Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Tyryshkin I.S., et al. Two-channel opto-acoustic diode laser spectrometer and fine structure of methane absorption spectra in 6070–6180 cm^{-1} region // *Spectrochim. Acta A.* – 2007. – Vol. 66. – N 4–5. – P. 811–818.
11. Harren F.J.M., Bijnen F.G.C., Reuss J., Voesenek L.A.C.J., Blom C.W.P.M. Sensitive intracavity photoacoustic measurements with a CO_2 waveguide laser // *Appl. Phys. B.* – 1990. – Vol. 50. – N 2. – P. 137–144.
12. Song K, Cha H.K., Kapitanov V.A., Ponomarev Yu.N., Rostov A.P., Courtois D., Parvitte B., Zeninari V. Differential Helmholtz resonant photoacoustic cell for spectroscopy and gas analysis with room-temperature diode lasers // *Appl. Phys. B.* – 2002. – Vol. 75. – N 2. – P. 215–227.
13. Kachanov A., Koulikov S., Tittel F.K. Cavity-enhanced optical feedback-assisted photo-acoustic spectroscopy with a 10.4 μm external cavity quantum cascade laser // *Appl. Phys. B.* – 2013. – Vol. 110. – P. 47–56.
14. Miklós A., Lim C.H., Hsiang W.W., Liang G.C., Kung A.H., Schmohl A., Hess P. Photoacoustic measurement of methane concentrations with a compact pulsed optical parametric oscillator // *Appl. Opt.* – 2002. – Vol. 41. – N 15. – P. 2985–2993.
15. Gong L., Lewicki R., Griffin R.J., Flynn J.H., Lefer B.L., Tittel F.K. Atmospheric ammonia measurements in Houston, TX using an external-cavity quantum cascade laser-based sensor // *Atmos. Chem. Phys.* – 2011. – Vol. 11. – P. 9721–9733.
16. Zheng H., Dong L., Wu H., Ye W., Yin X., Meyer J.R., Tittel F.K., et al. Compact photoacoustic module for methane detection incorporating interband cascade light emitting device // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25. – N 14. – P. 16761–16770.
17. Yin X., Dong L., Wu H., Zheng H., Ma W., Zhang L., Yin W., Jia S., Tittel F.K. Sub-ppb nitrogen dioxide detection with a large linear dynamic range by use of a differential photoacoustic cell and a 3.5 W blue multimode diode laser // *Sensors & Actuators B.* – 2017. – Vol. 247. – P. 329–335.
18. Yin X., Dong L., Wu H., Zheng H., Tittel F.K., et al. Highly sensitive SO_2 photoacoustic sensor for SF_6 decomposition detection using a compact mW-level diode-pumped solid-state laser emitting at 303 nm // *Opt. Express.* – 2017. – Vol. 25. – N 26. – P. 32581–32590.
19. Yin X., Wu H., Dong L., Li B., Ma W., Zhang L., Yin W., Xiao L., Jia S., Tittel F.K. Ppb-Level SO_2 Photoacoustic Sensors with a Suppressed Absorption-Desorption Effect by Using a 7.41 μm External-Cavity Quantum Cascade Laser // *ACS Sensors.* – 2020. – Vol. 5. – P. 549–556.
20. Zheng H., Liu Y., Lin H., Kan R., Patimisco P., Sampaolo A., Tittel F.K., Spagnolo V., et al. Sub-ppb-level CH_4 detection by exploiting a low-noise differential photoacoustic resonator with a room-temperature interband cascade laser // *Opt. Express.* – 2020. – Vol. 28. – N 13. – P. 19446–19456.

21. Feng C., Shen X., Li B., Liu X., Jing Y., Huang Q., Patimisco P., Spagnolo V., et al. Carbon monoxide impurities in hydrogen detected with resonant photoacoustic cell using a mid-IR laser source // *Photoacoustics*. – 2024. – Vol. 36. – A.n. 100585.
22. Feng C., Li B., Jing Y., Wang J., Patimisco P., Spagnolo V., Sampaolo A., Dong L., Wu H. Enrichment-enhanced photoacoustic spectroscopy based on vertical graphene // *Sensors & Actuators: B. Chemical*. – 2024. – Vol. 417. – A.n. 36204.
23. NIST Chemistry WebBook [Электронный ресурс]: <http://webbook.nist.gov/chemistry/>.
24. Rothman L.S., Gordon I.E., et al. The HITRAN 2012 molecular spectroscopic database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. – 2013. – Vol. 130. – P. 4–50.
25. Cox D.M., Gnauck A. Continuous-wave CO₂ laser spectroscopy of SF₆, WF₆, and UF₆ // *J. Mol. Spectrosc.* – 1980. – Vol. 81. – P. 207–215.
26. Витteman В. CO₂-лазер: Пер. с англ. – М.: Мир, 1990. – 360 с. – ISBN 5-03-001351-2.
27. Долин А.П., Карапузиков А.И., Ковалькова Ю.А. Эффективность использования лазерного течеискателя элегаза «КАПАТ» для определения места и уровня развития дефектов электрооборудования // *Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность*. – 2009. – № 6. – С. 25–28.
28. Kistenev Y.V., Bukreeva E.B., Bulanova A.A., Kuzmin D.A., Tuzikov S.A., Yumov E.L. Laser spectroscopy and chemometric study of the specific features of air exhaled by patients with lung cancer and chronic obstructive pulmonary disease // *Phys. Wave Phen.* – 2014. – Vol. 22. – N 3. – P. 210–215.
29. Kistenev Y.V., Borisov A.V., Kuzmin D.A., Penkova O.V., et al. Exhaled air analysis using wideband wave number tuning range infrared laser photoacoustic spectroscopy // *J. Biomed. Opt.* – 2017. – Vol. 22. – N 1. – A.n. 017002.
30. Kistenev Yu.V., Borisov A.V., Nikolaev V.V., Vrazhnov D.A., Kuzmin D.A. Laser photoacoustic spectroscopy applications in breathomics // *J. Biomed. Photonics & Eng.* – 2019. – Vol. 5. – N 1. – A.n. 10303.
31. Boyko A.A., Borisov A.V., Zasedatel V.S., Romanchuk V.V., Kistenev Y.V. Diagnostics of Oxidative Stress by Laser Optical-Acoustic Spectroscopy // *J. Biomed. Photonics & Eng.* – 2022. – Vol. 8. – N 4. – A.n. 040301.
32. Wu H., Dong L., Yin X., Sampaolo A., Patimisco P., et al. Atmospheric CH₄ measurement near a landfill using an ICL-based QEPAS sensor with V-T relaxation self-calibration // *Sensors & Actuators B*. – 2019. – Vol. 297. – A.n. 126753.

Подписано в печать 24.11.2025 г. Формат 60x84/16.
Бумага офсетная. Гарнитура Times. Печать цифровая.
Усл. печ. л 1,0. Тираж 100 экз. Заказ № 55952

Отпечатано в ООО «Типография Кант».
г. Новосибирск, ул. Путевая, 18. Тел. (383) 351-06-19