

УТВЕРЖДАЮ

Директор Федерального государственного
бюджетного учреждения науки Института
лазерной физики Сибирского отделения
Российской академии наук



д.ф.-м.н.

Прудников О.Н.

«31» января 2025 г.

ВЫПИСКА

из протокола заседания научного семинара Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института лазерной физики Сибирского отделения Российской академии наук от 31 января 2025 г.

(Заключение о диссертации Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора»)

ПРИСУТСТВОВАЛИ:

Тайченачев А.В., д.ф.-м.н., чл.-корр. РАН – председатель семинара
Петров В.В., к.ф.-м.н. – секретарь семинара
Автаева С.В., д.ф.-м.н.
Прудников О.Н., д.ф.-м.н.
Басалаев М.Ю., к.ф.-м.н.
Березуцкий А.Г., к.ф.-м.н.
Васильев В.А.
Внуков Д.В.
Вишняков В.И.
Бетлени П.И.
Дресвянский В.П., д.ф.-м.н.
Зилов С.А., д.ф.-м.н.
Гончаров А.Н., к.ф.-м.н.
Мартынович Е.Ф., д.ф.-м.н.
Дмитриев А. К., д.ф.-м.н.
Дычков А.С., к.ф.-м.н.
Шерстов И.В., к.ф.-м.н.
Ильенков Р.Я., к.ф.-м.н.
Каргопольцев Е.С.
Кирпичникова А.А.
Кирпичников А.В.
Купцова А.О.
Лاپин Н.С.
Макаров А.О.
Медведев А.Э.
Петров В.А.
Покасов П.В., к.ф.-м.н.
Поллер Б.В., д.т.н.
Скворцов М.Н., д.ф.-м.н.

Трунов И.А.
Х. Диаб
Тютрин А.А.
Ткаченко Р.А., к.ф.-м.н.
Трашкеев С.И., д.ф.-м.н.
Громыко В.В.
Филонов А.А.
Сере С.Э.
Кривошеев Н.Д.
Чаповский П.Л., д.ф.-м.н.
Чепуров С.В., к.ф.-м.н.
Шарипов С.С.
Шайхисламов И.Ф., д.ф.-м.н.

Всего 42 человека.

СЛУШАЛИ: доклад И.В. Шерстова (ИЛФ СО РАН, г. Новосибирск) о результатах диссертационной работы «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора», представляемой на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

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

Представленная работа посвящена разработке и исследованию лазерных оптико-акустических (ОА) газоанализаторов, построенных на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора (ОАД) при использовании различных источников излучения среднего ИК диапазона. Исследованы процессы формирования акустических мод в разных типах резонансных ОАД, обоснован выбор оптимальной конструкции резонансного дифференциального ОАД для применения его в составе новых моделей высокочувствительных лазерных ОА-газоанализаторов. На предложенные оригинальные технические решения соискателем получен ряд патентов (в соавторстве и индивидуально). Разработанные при определяющем участии соискателя лазерные ОА-газоанализаторы нашли широкое применение в науке, технике и медицине.

ЦЕЛИ ИССЛЕДОВАНИЯ:

1) Повышение пороговой чувствительности резонансных ОАД за счёт снижения зависимости измерения поглощения газа от поглощения в окнах детектора, разработка новых вариантов резонансных ОАД.

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) Обоснование схемы высокочувствительного лазерного ОА-газоанализатора SF₆ на основе волноводного CO₂ лазера, резонансного дифференциального ОАД, отпаянной газонаполненной ОА-ячейки; создание на этой основе измерителя с пороговой чувствительностью ~100 ppt SF₆ и динамическим диапазоном измерения концентрации 10 декад.

4) Расширения сфер применения лазерных ОА-газоанализаторов, создание ОА-газоанализатора медицинского назначения на основе широкополосного перестраиваемого ПГС ($\lambda = 2,5...10,8$ мкм) для проведения многокомпонентного экспресс-анализа проб

выдоха пациентов, создание аэромобильного ОА-газоанализатора метана на основе квантово-каскадного лазера ($\lambda \approx 7,7$ мкм) для использования в геологоразведке, и проч.

На представление были вынесены следующие **ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ**:

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).

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.

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 первой главе 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). 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.

Во второй главе проведено исследование акустических мод резонансных ОАД различных типов. Показано, что в резонансном дифференциальном ОАД формируются резонансные акустические моды типа А, траектория распространения которых имеет кольцевую форму, проходящую через оба акустических резонатора детектора, причем колебания давления в разных акустических резонаторах противофазны. Кольцевые акустические моды типа А выступают из акустических резонаторов в буферные полости на расстояние $\sim 1...2$ мм и не достигают фланцев (окон) детектора, что существенно снижает чувствительность резонансного дифференциального ОАД к поглощению в окнах детектора. Определены оптимальные соотношения между длиной и диаметром акустических резонаторов и длиной буферных полостей модернизированного варианта резонансного дифференциального ОАД, реализованные в конструкции детектора ОАД-90, который в настоящее время широко используется в различных лабораториях мира. Разработан и испытан алгоритм оперативного измерения текущей низшей резонансной частоты ОАД практически в реальном времени. Процесс измерения занимает не более 0,1 с, относительная погрешность измерения низшей резонансной частоты ОАД не превышает 6×10^{-5} .

В третьей главе представлены результаты разработки и исследования высокочувствительного лазерного ОА-течеискателя SF_6 . Совпадение сильной широкой полосы поглощения SF_6 и 10Р полосы генерации CO_2 лазера позволило построить высокочувствительный лазерный ОА-газоанализатор элегаза с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt SF_6 . Для снижения погрешности измерения концентрации SF_6 предложено проводить нормировку сигналов поглощения в измерительном ОАД по сигналам поглощения в отпаянной газонаполненной ОА-ячейке, заполненной газовой смесью с примесью SF_6 . Для уверенного детектирования малых концентраций SF_6 с помощью разработанного лазерного ОА-газоанализатора уровень минимально необходимой мощности излучения CO_2 лазера составляет ~ 150 мВт. Оптическая схема ОА-газоанализатора с комбинацией детекторов *Ref-PAD* имеет верхний предел измерения концентрации SF_6 порядка 50 ppm. Для расширения динамического диапазона измерения концентрации SF_6 до ~ 1000 ppm в оптической схеме ОА-газоанализатора предложено использовать дополнительный ОА-детектор с малой оптической базой ($\sim 0,5...1$ мм). Показана возможность расширения динамического диапазона измерения концентрации элегаза до ~ 10 декад от ~ 100 ppt до 100 % SF_6 , используя эффект изменения скорости звука в газовых смесях с высоким содержанием примеси SF_6 (от 0,1 до 100 %). Проведена разработка и испытания новой серии переносных высокочувствительных лазерных ОА-течеискателей SF_6 (серия «KARAT»). Одна из моделей лазерного ОА-течеискателя («*SF₆ LaserGasTest*») зарегистрирована в реестре Средств измерений Росстандарта.

В четвертой главе описаны результаты разработки и исследования лазерного ОА-газоанализатора «ЛазерБриз», построенного на основе широкополосного перестраиваемого ПГС (2,5...10,8 мкм, разработка Д.Б. Колкера) и резонансного дифференциального детектора ОАД-90. ОА-газоанализатор «ЛазерБриз» предназначен для использования в медицине для экспресс-диагностики проб выдоха пациентов, страдающих различными хроническими заболеваниями. Исследованы спектры поглощения 24 различных газовых примесей. Пороговая чувствительность газоанализатора «ЛазерБриз», измеренная по поглощению CF_4 на длине волны 7,795 мкм, составила ~ 1 ppb CF_4 . 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.

В пятой главе представлены результаты разработки аэромобильного лазерного ОА-газоанализатора метана, построенного на основе квантово-каскадного лазера (7,7 мкм) и дифференциального детектора ОАД-90. Пороговая чувствительность ОА-газоанализатора метана составила $(26,64 \pm 8,39)$ ppb CH_4 , что соответствует величине параметра $(NNEA) = 8,22 \times 10^{-10} \text{ см}^{-1} \cdot \text{Вт} \cdot \text{Гц}^{-1/2}$. Разработан экспериментальный образец

аэромобильного Сенсора метана (габаритные размеры $315 \times 165 \times 110$ мм; масса 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 Заключение 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 течеискателей 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 SF_6 предложено установить частоту повторения импульсов излучения CO_2 лазера, равной одной из субгармоник низшей резонансной частоты дифференциального ОАД. Это техническое решение привело к существенному уменьшению общего энергопотребления лазерного ОА-газоанализатора SF_6 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 SF_6 с комбинацией детекторов *Ref-PAD* имеет верхний предел измерения концентрации SF_6 ~ 50 ppm из-за насыщения отклика резонансного дифференциального детектора ОАД-90. Для расширения динамического диапазона измерения концентрации SF_6 до ~ 1000 ppm (требуемый уровень ПДК) в оптической схеме лазерного ОА-газоанализатора SF_6 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 ppt 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 отпаянную 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 ppt CF₄ (при $\lambda = 7,795$ мкм).

11) Разработана и испытана новая система сбора и осушения проб выдоха 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 ppt 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.

Докладчику были заданы следующие вопросы:

1) Вопрос. Автаева С.В.: В каких условиях проводились измерения с оптико-акустическими детекторами, какое давление, состав газовых смесей, температура и проч.? Почему в защищаемых положениях нет результатов, описанных в пятой и шестой главах?

Ответ. Шерстов И.В.: Измерения параметров различных детекторов проводились в одинаковых условиях при заполнении ОАД комнатным воздухом, температура около 23 °С, давление нормальное. При заполнении детекторов азотом резонансные частоты увеличивались из-за повышения скорости звука в азоте. Все выдающиеся результаты получены соискателем во второй и третьей главах диссертации. Далее идет описание практического применения разработанных технических решений с использованием различных лазеров.

2) Вопрос. Прудников О.Н.: Как Вы определили, что регистрируются кольцевые моды типа А или продольные моды типа В? Как влияет атмосферное давление на результаты измерения концентрации исследуемой газовой примеси?

Ответ. Шерстов И.В.: Кольцевые моды типа А не достигают фланцев, закрывающих буферные полости дифференциального ОАД, и микрофоны МЗ их не регистрируют. У продольных мод типа В на фланцах детектора расположены пучности колебаний давления, и микрофоны МЗ их регистрируют. По откликам микрофона МЗ можно различить моды типа А и типа В. Обычно измерение концентрации примеси газа-маркера производится путем продувки газовой смеси через детектор и запираания газового входа/выхода ОАД. При этом внутри детектора давление равно атмосферному. Колебания атмосферного давления приводят к небольшим вариациям измеряемой концентрации газа-маркера на уровне 2 – 3 %, т.е. незначительно.

3) Вопрос. Тайченачев А.В.: Проводились ли расчеты акустических резонаторов исследуемых детекторов?

Ответ. Шерстов И.В.: Самостоятельные расчеты акустических резонансов исследуемых ОАД не проводились, но в экспериментах по исследованию параметров ОАД использовались данные из статей, где такие расчеты были проведены.

4) Вопрос. Чаповский П.Л.: В докладе нет информации, где распространяется акустическая волна: в газе или в материале ячейки. Какова толщина стенок ячейки, что за материал использован? Какие есть документы о внедрении результатов диссертации?

Ответ. Шерстов И.В.: Акустическая волна внутри детектора распространяется в газовой поглощающей среде, стенки ячейки не участвуют. Корпус детектора сделан из единого куска твердого алюминиевого сплава, обладающего высокой жесткостью и теплопроводностью. Толщина стенок детектора составляет не менее 3 мм. Есть 4 Акта внедрения от различных организаций. Они представлены в Приложении В к диссертации.

5) Вопрос. Гончаров А.Н.: При измерении высоких концентраций элегаза CO_2 лазер не используется. Селекции по поглощению элегаза в этом случае не будет. Сдвиг резонансной частоты ОАД может дать и другой газ. В докладе прозвучала фраза, что измерение низшей резонансной частоты дифференциального ОАД происходит практически в реальном времени. Что означает эта фраза? При измерении предельно малого поглощения в газе какую долю составляет поглощение в окнах?

Ответ. Шерстов И.В.: Данный подход к измерению объемной доли элегаза в динамическом диапазоне 0,1 – 100 % SF_6 применим в конкретном случае, когда известно, что исследуемой газовой средой является SF_6 . Существует ряд приборов для определения объемной доли элегаза, которые работают на принципе измерения скорости звука в SF_6 . В данном случае мы использовали тот же подход. Процедура измерения низшей резонансной частоты дифференциального ОАД проводится за интервал времени не более 0,1 сек, т.е. практически в реальном времени. При заполнении резонансного дифференциального детектора чистым азотом остаточное поглощение в окнах достигает 50 % в измеряемом шумовом сигнале. При этом собственные шумы электроники достигают 30 %.

6) Вопрос. Пивцов В.С.: При количественных измерениях может иметь значение насыщение поглощения газа. Как вы это учитывали?

Ответ. Шерстов И.В.: Во-первых, для предохранения от насыщения поглощения мы не используем фокусировку лазерных пучков, приводящую к формированию локальных

зон с высокой интенсивностью оптического излучения. Во-вторых, при работе с методом ЛОАС обычно используется приближение слабого поглощения, когда оптическая толщина исследуемой газовой среды мала и не превышает величины $\sim 0,1$. В этом случае используют линейное приближение экспоненты, входящей в закон Бугера. На практике достоверность параметров, измеряемых лазерным ОА-газоанализатором SF₆ «KARAT» нашей разработки, подтвердили независимые поверочные измерения в Китае.

7) Вопрос. Трашкеев С.И.: Насколько сильно влияние внешней вибрации?

Ответ. Шерстов И.В.: Для защиты резонансного дифференциального детектора ОАД-90 от внешней вибрации и акустических шумов применяется мягкая эластичная виброподвеска и акустическая защита в виде пористой шумопоглощающей оболочки вокруг корпуса ОАД.

Докладчику были даны следующие рекомендации:

1) В диссертации сформулировано несколько целей. Предпочтительнее сформулировать одну цель, объединяющую все разделы диссертации.

2) В четвертой главе недостаточно освещается значение медицинского оптико-акустического газоанализатора выдыхаемого воздуха, разработанного коллективом исполнителей из ОАО «ОКТАВА», ООО «Специальные технологии» и ИОА СО РАН.

3) В качестве научной новизны указаны несколько результатов, но ни у одного из них не указано, что он получен впервые.

4) В докладе следует обратить внимание на перегруженность некоторых слайдов.

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 SF₆ на основе волноводного СО₂ лазера предложено установить частоту повторения импульсов излучения равной одной из субгармоник низшей резонансной частоты измерительного ОАД при оптимальном уровне средней мощности излучения СО₂ лазера не менее 150 мВт.

5) Разработан переносной высокочувствительный лазерный ОА-течеискатель SF₆ с пороговой чувствительностью ~ 100 ppt, которая превышает чувствительность лучших коммерческих течеискателей SF₆ 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 пробоборном 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.

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 SF₆ до ~ 10 декад (от ~ 100 ppt до 100 % SF₆), реализованная в одном приборе.

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.

Работа проводилась в период 2004 – 2024 гг. в соответствии с хоздоговорами и планами НИР ИЛФ СО РАН по темам:

- Контракт № 3/2.2-05 от 01.04 2005 г. между компанией «Scien Co., Ltd.» (г. Ульсан, Республика Корея) (Заказчик) и ИЛФ СО РАН (Исполнитель) на изготовление и поставку Лазерного оптико-акустического детектора; кол-во: 1 шт.; руководитель – А.И. Карапузиков;

- Контракт № 1/2.2-06 от 16.01 2006 г. между компанией «Scien Co., Ltd.» (г. Ульсан, Республика Корея) (Заказчик) и ИЛФ СО РАН (Исполнитель) на изготовление и поставку Лазерного фото-акустического детектора LLDV-1; кол-во: 1 шт.; руководитель – А.И. Карапузиков;

- Контракт № 3/2.2-07 от 25.01 2007 г. между компанией «Scien Co., Ltd.» (г. Ульсан, Республика Корея) (Заказчик) и ИЛФ СО РАН (Исполнитель) на изготовление и поставку Лазерного фото-акустического детектора LLDV-1; кол-во: 2 шт.; руководитель – А.И. Карапузиков;

- Исследования по созданию газоаналитических приборов на основе лазеров среднего ИК диапазона (2007-2009 гг.); руководитель – А.И. Карапузиков;

- Стабилизация линии излучения волноводного CO₂-лазера для лазерного оптико-акустического детектора утечек SF₆ (2011 г.); руководитель – А.И. Карапузиков;

- Разработка и создание малогабаритных перестраиваемых источников когерентного излучения в среднем ИК и ТГц диапазонах на новых нелинейных средах для применения в биологии, медицине и других областях (2018-2020 гг.); руководитель – А.И. Карапузиков;

- Комплексные исследования по созданию малогабаритных перестраиваемых источников когерентного излучения в среднем ИК и ТГц диапазонах на новых нелинейных средах для применения в биологии, медицине и других областях (FWGU-2021-0010) (2021-2024 гг.); руководители – А.И. Карапузиков (2021-2023), И.В. Шерстов (2024).

Основными публикациями по теме диссертации являются:

1. 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.
2. 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.]
3. 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.]
4. 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.]
5. 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.
 6. 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]
 7. 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., Miroshnichenko I.B., Zenov K.G., Miroshnichenko 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.
 8. 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., Miroshnichenko I.B., Miroshnichenko 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.]
 9. 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.]
 10. 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. Laser Breeze gas analyzer for noninvasive diagnostics of air exhaled by patients // Physics of Wave Phenomena. – 2014. – Vol. 22. – N 3. – P. 189–196.
 11. 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.
 12. 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.]
 13. 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.]
 14. 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., Spitcin 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.]
 15. 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.]
 16. 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., Shadrinseva 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.]
17. Колкер Д.Б., Шерстов И.В., Костюкова Н.Ю., Бойко А.А., Ерушин Е.Ю., Ньюшков 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.]
 18. 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.
 19. 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.
 20. 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-μm optical parametric oscillator // Quantum Electronics. – 2020. – Vol. 50. – N 11. – P. 1063–1067.]
 21. Sherstov I.V., Kolker D.B., Boyko A.A., Vasiliev V.A., Pustovalova R.V. Methane photo-acoustic gas analyzer based on 7.7-μm quantum cascade laser // Infrared Physics & Technology. – 2021. – Vol. 117. – A.n. 103858.
 22. 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.
 23. 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.
 24. 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.]
 25. 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.
 26. Капитанов В.А., Карапузилов А.И., Пономарев Ю.Н., Шерстов И.В. Оптико-акустический лазерный теиескатель / Патент на полезную модель RU 38228, 27.05.2004. Заявка № 2003134766/20 от 01.12.2003. Опубликовано: 27.05.2004, Бюл. № 15.
 27. Капитанов В.А., Карапузилов 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.
 28. Васильев В.А., Карапузилов А.И., Карапузилов 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.
 29. Карапузилов А.И., Карапузилов 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.
 30. Карапузилов А.И., Карапузилов 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.
 31. Карапузилов А.И., Карапузилов 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.
 32. Карапузилов 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.
 33. 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.
 34. Шерстов И.В. Лазерный оптико-акустический газоанализатор и резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор / Патент на изобретение 2748054 C1, 19.05.2021. Заявка № 2020119016 от 02.06.2020. Опубликовано: 19.05.2021, Бюл. № 14.
 35. Шерстов И.В. Резонансный дифференциальный оптико-акустический детектор / Патент на изобретение 2761906 C1, 14.12.2021. Заявка № 2020143429 от 25.12.2020. Опубликовано: 14.12.2021, Бюл. № 35.

ПОСТАНОВИЛИ:

1. Работа выполнена на высоком научном уровне и является законченным исследованием, посвященным разработке и исследованию лазерных ОА-газоанализаторов на основе резонансного дифференциального ОАД (собственной разработки) при использовании различных источников излучения среднего ИК диапазона. Совокупность полученных автором работы результатов может быть квалифицирована как научное достижение высокого уровня.
2. Работа удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени доктора технических наук.
3. Рекомендовать диссертацию Шерстова Игоря Владимировича «Лазерные оптико-акустические газоанализаторы на основе резонансного дифференциального оптико-акустического детектора» к защите на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 1.3.6 – Оптика.

Председатель семинара,
д.ф.-м.н., член-корреспондент РАН

Секретарь семинара,
к.ф.-м.н.

Тайченачев А.В.

Петров В.В.