

На правах рукописи

Корольков Владимир Александрович

**АВТОМАТИЗИРОВАННЫЕ АКУСТИЧЕСКИЕ И ОПТИКО-
ЭЛЕКТРОННЫЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ
ДЛЯ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО И МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА
АТМОСФЕРЫ**

Специальность 05.11.13 – Приборы и методы контроля природной среды,
веществ, материалов и изделий

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

доктора технических наук

Томск-2016

Работа выполнена в ФГБУН «Институт мониторинга климатических и экологических систем» СО РАН

Научный консультант: доктор технических наук, профессор
Тихомиров Александр Алексеевич

Официальные оппоненты: Грузнов Владимир Матвеевич, доктор технических наук, профессор, ФГБУН Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, г. Новосибирск, заместитель директора по научной работе.

Пронин Сергей Петрович, доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВПО "Алтайский государственный технический университет им. И. И. Ползунова", г. Барнаул, заведующий кафедрой информационных технологий.

Булкин Владислав Венедиктович, доктор технических наук, доцент, Муромский институт (филиал) ФГБОУ ВО "Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н.Г. Столетовых", г. Муром, профессор кафедры техносферной безопасности.

Ведущая организация Военный учебно-научный центр военно-воздушных сил «Военно-воздушная академия им. профессора Н.Е. Жуковского и Ю.А. Гагарина», г. Воронеж.

Защита состоится «14» марта 2017 г. в 15 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.269.09 при ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» по адресу: Россия, 634028, г. Томск, ул. Савиных, 7, ауд. 215 (актовый зал).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ФГАОУ ВО «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» и на сайте: <http://portal.tpu.ru/council/916/worklist>

Автореферат разослан _____ 2016 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,
кандидат технических наук _____ Е.А. Васендина

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы и состояние вопроса

Контроль за экологическим состоянием окружающей среды и сокращение ее загрязнения является на сегодня одной из важнейших задач человеческого общества, напрямую связанной с возможностью его дальнейшего технологического развития и безопасностью. В связи с особой актуальностью проблемы указом Президента 2017 год объявлен в России Годом экологии [1С].

Одним из определяющих экологических факторов территории является состояние воздушной среды, которое определяется характеристиками атмосферного пограничного слоя (АПС), в особенности его приземной части. При этом мезомасштабная экологическая ситуация, формирующаяся на локальной территории в тот или иной период времени, определяется не только загрязнением АПС источниками выбросов, но и складывающейся метеорологической обстановкой. Существенную роль в этом играют метеорологические факторы - скорость и направление ветра, температура и влажность воздуха, параметры осадков, присутствие вертикальных ветровых потоков и потоков тепла, наличие особых состояний АПС (инверсии, конвекции), другие статистические и динамические метеорологические характеристики. Поэтому анализ и прогнозирование экологического состояния АПС требуют осуществления комплексного контроля его параметров, в том числе, не входящих в стандартный перечень величин, контролируемых гидрометеорологической службой.

Обеспечение контроля экологической и метеорологической ситуации в режиме мониторинга и реализация технологий мезомасштабного и краткосрочного прогнозирования состояния АПС требует применения новых инструментальных средств и использования созданных на их основе программно-аппаратных систем для определения метеорологических параметров атмосферы и контроля количественного состава поллютантов в атмосферном воздухе.

Актуальность создания новых приборов и комплексов, использующих новые способы измерений в области метеорологического мониторинга и контроля загрязнения атмосферного воздуха определена в документе Минобрнауки России «Прогноз научно-технического развития Российской Федерации на период до 2030 года» [2С], являющимся одним из основополагающих документов системы стратегического планирования развития страны. В нем определены наиболее перспективные направления научных исследований, в том числе:

- разработка новых технологий инструментального контроля выбросов загрязнений в атмосферу и создание систем раннего обнаружения и прогнозирования чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера, разработка технологий обеспечения безопасности производственных объектов;
- создание систем мониторинга, оценки и прогнозирования состояния окружающей среды, включая разработку автоматизированных систем контроля состояния атмосферы, а также разработка оборудования для мониторинга, контроля риска возникновения и уменьшения последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера и пр.

Проблема создания автоматизированных систем непрерывного экологического и метеорологического мониторинга (ЭММ) соответствует приоритетным

направлениям развития науки, технологий и техники Российской Федерации и входит в перечень критических технологий. Создание новых видов измерительных систем, приборов и комплексов для ЭММ предусмотрено планами федеральных целевых программ (ФЦП):

- «Снижение рисков и смягчение последствий чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера в Российской Федерации до 2015 года»,
- «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы».

Настоящая работа выполнялась в рамках государственных заданий по программам:

1. В ФЦП «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». Направление «Рациональное природопользование», мероприятие 1.3. Проект «Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя» (шифр ПНИ «2014-14-579-0004-034», идентификатор RFMEFI60714X0030) (2014-2016 гг.) [ЗС].

2. В Программах СО РАН и ФНИ ГАН:

а) Базовый проект СО РАН 28.2.3 Разработка новых методов, технологий и приборов на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для контроля природных и техногенных систем, а также для решения спецзадач (2004-2006 гг.);

б) Базовый проект СО РАН 7.13.1.2 "Развитие методов и технических средств на основе оптических, радиоволновых и акустических эффектов для изучения природных и техногенных систем" (2007-2009 гг.);

в) Базовый проект СО РАН № VII.66.1.2 "Развитие физических методов и технических средств для мониторинга окружающей среды и обеспечения безопасности населения" (2010-2012 гг.);

г) Проект VIII.80.1.2 "Научные основы создания новых газоаналитических приборов и методик их использования для мониторинга окружающей среды и специального контроля" (2012-2016 гг.);

г) Проект VIII.80.2.2 "Научные основы создания оптических, акустических и электронных приборов, комплексов и систем для метеорологических измерений и технологии их применения в задачах мониторинга окружающей среды" (2012-2016 гг.).

3. В Проектах РФФИ:

а) № 09-05-99014/р_офи "Разработка научных основ технологии и создание измерительно-вычислительной системы для регионального прогноза опасных метеорологических явлений" (2009-2010 гг.);

б) № 11-05-98062/ р_сибирь_а "Разработка и исследование алгоритмов пространственно-временного прогнозирования возникновения и развития опасных метеорологических ситуаций и создание макета региональной измерительно-вычислительной системы для их реализации" (2011-2012 гг.).

4. В ОКР специального назначения (заказчик – МО РФ): "Городище-СО-М", "Борисполь-2", "Трасса-М", "Ринг-2/15-ВДВ", "Механизм", "Фальцет", "Канонада", "Броненосец" и др.

5. В двенадцати проектах Приборной программы СО РАН «Импортозамещение» (2005 – 2012 гг.).

6. По планам работ СКБ НП "Оптика" СО АН СССР, КТИ "Оптика" СО РАН и ИОМ СО РАН в период 1980-2003 гг.

Цель диссертационной работы:

Разработка методологических основ и создание инструментальной базы для обеспечения экспериментальных натурных исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля атмосферного пограничного слоя, а также решение проблемы импортозамещения в области экологического и метеорологического приборостроения.

Основные задачи диссертационной работы:

- разработка, создание, испытания и организация производства новых автоматических приборов и комплексов на основе использования оптических и акустических методов;
- разработка метрологического обеспечения разрабатываемых технических средств;
- разработка алгоритмического и программно-технического обеспечения процессов обработки информативных сигналов и представление результатов в приборах для экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя и в средствах контроля технологических процессов;
- разработка методов повышения информационной и метрологической надежности разрабатываемых приборов и средств контроля в процессе эксплуатации, обеспечение диагностики приборов контроля.

Научная новизна:

1. Разработаны новые схмотехнические и конструктивные решения для ультразвуковых 3D-термоанемометров (3D-УТА), обеспечивающие малое затенение электроакустических преобразователей (ЭАП) и жесткость несущей конструкции. На основе разработанных 3D-УТА создан ряд модификаций ультразвуковых автоматических метеорологических станций (УАМС) с улучшенными техническими и эксплуатационными характеристиками. Новые технические решения защищены патентом РФ [59].

2. Разработаны новые способы и реализующие их устройства для контроля и диагностики 3D-УТА, позволяющие оперативно выполнять эти операции непосредственно на месте эксплуатации измерительных приборов. Новые технические решения защищены двумя патентами РФ [54, 60].

3. Разработаны новые схмотехнические и конструктивные решения, алгоритм работы и методика калибровки оптического измерителя осадков, использующего теневой метод, и создан опытный образец осадкомера. Новые технические решения защищены двумя патентами РФ [61, 62].

4. Предложены и апробированы в натурных условиях новые методы и технологии дистанционного контроля метеорологических параметров АПС посредством портативных автоматических метеостанций, устанавливаемых на борту беспилотных летательных аппаратов (БПЛА), а также разработаны способы и технические решения для комплексного контроля метеорологических параметров АПС и содержания поллютантов в воздухе посредством измерения характеристик оптического и акустического излучения плазмы дистанционного оптического пробоя. Новые

технические решения защищены 11 авторскими свидетельствами СССР [37–47] и 2 патентами РФ [53, 56].

5. Впервые предложен и обоснован новый термоакустический метод определения энергии излучения инфракрасного диапазона, обладающий малой инерционностью (~10 мс), и разработан новый оптико-акустический способ измерения этой энергии с помощью ультразвукового термоанемометра, показана возможность использования предложенного способа для детектирования оптических сигналов в абсорбционных ИК-газоанализаторах. Новые технические решения защищены 3 патентами РФ [49–51].

6. Разработаны новые схмотехнические и конструктивные решения автоматических оптических газоанализаторов на основе метода дифференциальной спектроскопии в ближней ультрафиолетовой и видимой области оптического спектра, а также метода спонтанного комбинационного рассеяния света (СКР), что позволило создать ряд модификаций приборов для непрерывного мониторинга дымовых выбросов и определения загрязнений воздушной среды токсичными газами и парами ртути. Новые технические решения защищены 5 патентами РФ [48, 52, 55, 57, 58].

7. Разработана, создана и введена в опытную эксплуатацию мезомасштабная автоматизированная система для обеспечения экспериментальных исследований и натурной апробации новых алгоритмов, методов и технологий контроля состояния АПС.

Разработки, выполненные при участии и под руководством автора в период с 1997 по 2015 гг., десять раз включались в годовые отчетные доклады РАН и СО РАН в качестве важнейших научных достижений:

- 1997 г. (СО РАН) – разработка газоанализатора "Оксид-1М" (прототип ДОГ);
- 2000 г. (СО РАН) – разработка газоанализатора ДОГ (модификация ДОГ-1М);
- 2003 г. (РАН) – разработка бортового метеокомплекса БМК-01 (в составе бортовой системы прогнозирования дальности и качества звукового вещания);
- 2008 г. (СО РАН) – разработка мобильного варианта УАМС АМК-03Б;
- 2009 г. (РАН) – разработка переносного метеокомплекса ЭКСМЕТЕО (аналог ПАМК 1Б65 военного назначения);
- 2009 г. (РАН) – разработка оптического измерителя осадков;
- 2010 г. (РАН) – разработка прототипа региональной информационно-измерительной системы для мониторинга опасных метеорологических явлений;
- 2012 г. (РАН) – разработка СКР-газоанализатора;
- 2013 г. (СО РАН) – разработка оптического измерителя осадков;
- 2014 г. (РАН) – разработка оптического измерителя осадков ОПТИОС.

Практическая значимость и реализация результатов работы

Практическая значимость результатов работы определяется прикладным характером выполненных исследований и подтверждается внедрением разработанных способов измерений и реализующих их устройств в различных отраслях экономики и оборонного комплекса страны:

1) Сертифицированы в качестве средств измерений гражданского и военного назначения УАМС АМК-03, ПАМК 1Б65 и бортовой метеокомплекс АМК-Б (в составе изделия ГО.1.26.02). Метеокомплексы 1Б65, 1Б65Б и АМК-Б (в составе из-

делия ГО.1.26.02) приняты на снабжение Вооруженных Сил РФ. Организовано опытное и промышленное производство УАМС АМК-03 и ее модификаций гражданского и военного назначения: УАМС АМК-03, 1Б65, 1Б65Б, АМК-Б выпускаются серийно, метеокомплексы БМК-01, АМК-03/3у АМК-03Б – в виде опытных и экспериментальных образцов.

Основными потребителями метеокомплексов являются Минобороны России, МВД России, МЧС России, научно-исследовательские институты СО РАН, промышленные предприятия и государственные спецобъекты России (космодром «Восточный», космодром «Байконур»), а также зарубежные пользователи - Северо-западный институт ядерных исследований (NINT) (Китайская народная республика), ЗАО «Завод им. Кирова» (республика Казахстан), Центр парашютной подготовки Вооруженных Сил республики Казахстан, вооруженные силы иностранных государств (АО «Рособоронэкспорт).

Производителями УАМС АМК-03 и ее модификаций являются предприятия и организации г. Томска – ООО «Сибаналитприбор», ЗАО «Томский приборный завод» и ИМКЭС СО РАН (годовой объем выпуска изделий в 2016 году превысил 120 штук, всего за время выпуска изготовлено и отправлено заказчикам около 700 метеокомплексов всех модификаций).

2) Опытный образец оптического измерителя осадков ОПТИОС входит в состав комплекса аппаратуры для обеспечения безопасности взлетно-посадочной полосы аэродромов, разрабатываемого ООО «БАНС» (г. Москва) по заказу МО РФ, а также в состав измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, разрабатываемой в рамках ФЦП МОН РФ [2С].

3) Экспериментальные образцы автоматических портативных метеостанций ПЭМС и ПУМС используются в составе измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, разрабатываемой в рамках ФЦП МОН РФ [2С].

4) Способ дистанционного определения элементного состава атмосферных газов и аэрозолей и реализующее его устройство (спектрохимический лидар) разработаны и изготовлены в СКБ НП «Оптика» СО АН СССР по заказу Института оптики атмосферы СО АН СССР и в 1982-1985 гг. использовались для обеспечения научно-исследовательских работ по спецтематике в НПО «Астрофизика» (ОКБ «Радуга», г. Владимир).

5) Сертифицированы в качестве средств измерений РФ газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4. Организовано промышленное производство газоанализаторов ДОГ-1М, партия которых в количестве 70 шт. внедрена на теплоэнергетических предприятиях ОАО «Тюменьэнерго». Опытный образец двухкомпонентного газоанализатора ДОГ-4 прошел промышленные испытания на ГРЭС-2 г. Томска и готовится к внедрению на предприятиях теплоэнергетики.

6) Экспериментальные образцы ртутных газоанализаторов ДОГ-5, РГА-15 и РГА/м используются для научных исследований в институтах СО РАН (ИВЭП СО РАН, г. Барнаул и ИМКЭС СО РАН, г. Томск), а также в составе измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, разрабатываемой в рамках ФЦП МОН РФ [3С].

7) Экспериментальный образец СКР-газоанализатора прошел испытания во ФГУП «ВНИИМ им. Д. И. Менделеева» с целью получения рекомендации на внедрение метода СКР на предприятиях ПАО «Газпром» в качестве штатного средст-

ва контроля компонентного состава природного газа, транспортируемого по магистральным газопроводам. Мобильная модификация газоанализатора СКР/м используется в составе измерительно-вычислительной системы ЭО ИВС, разрабатываемой в рамках ФЦП МОН РФ [3С].

8) Опытные образцы автоматизированной системы метеорологического мониторинга мезомасштабной территории «ИВС-МЕТЕО-3», ИВС-МЕТЕО-5» и ЭО ИВС изготовлены в ООО «Сибаналитприбор» (г. Томск) и внедрены в ИМКЭС СО РАН (г. Томск) и в ОАО «Ванкорнефть» (г. Красноярск).

На защиту выносятся следующие положения:

1. Использование совокупности новых технических решений в реализации метода акустической термоанемометрии и оптического теневого метода контроля атмосферных осадков позволило создать программно-аппаратный комплекс для определения метеорологических и турбулентных характеристик приземной атмосферы, обладающий расширенными функциональными возможностями, улучшенными техническими характеристиками и способный выполнять измерения в автоматическом режиме без участия оператора в условиях арктического, умеренно-холодного и тропического климата.

2. Использование совокупности новых технических решений при создании автоматизированных диагностических устройств и систем для контроля и восстановления метеорологических характеристик ультразвуковых термоанемометров, а также применение новых технических решений в конструкции ультразвукового термоанемометра, позволило создать мобильные (переносные и бортовые) автоматические метеорологические комплексы военного и гражданского назначения, сохраняющие работоспособность после воздействия возникающих при транспортировке и развертывании комплекса ударных и вибрационных нагрузок, предусмотренных ГОСТ РВ 20.39.304-98 по группам исполнения 4.16 и 1.6.5, способные при этом проводить измерения на произвольных неподготовленных метеорологических площадках и выполнять задачи по оперативному метеорологическому обеспечению проведения специальных операций и боевых действий различными видами и родами войск.

3. Разработанный на основе метода ультразвуковой термометрии новый тип селективного фотоприемника инфракрасного диапазона обладает малой инерционностью (не более 10^{-2} с), высокой пороговой чувствительностью (не хуже 10^{-3} Дж), а также широким динамическим диапазоном, определяемым, с одной стороны, чувствительностью ультразвукового метода измерения температуры газа, используемого в качестве детектора (порядка $10^{-2} - 10^{-3}$ К), и, с другой стороны, пороговыми значениями энергии оптического пробоя в этом газе (порядка 10 Дж/см²).

4. Разработанные дистанционные методы и реализующие их аппаратные комплексы, использующие портативные автоматические метеостанции, устанавливаемые на борту беспилотных летательных аппаратов, а также устройства, инициирующие в атмосфере дистанционный оптический пробой путем фокусировки в атмосфере мощного лазерного пучка и затем регистрирующие спектральные и временные параметры оптического и акустического излучения плазмы оптического пробоя, позволяют контролировать метеорологические и турбулентные па-

раметры атмосферы до высот 1000 – 2000 метров и определять в режиме реального времени содержание поллютантов в атмосферном воздухе.

5. Использование совокупности новых технических решений при реализации оптических методов газоанализа, основанных на использовании эффекта дифференциального поглощения оптического излучения молекулами газа, эффекта расщепления в поперечном магнитном поле линий излучения ртутной лампы с естественным изотопным составом паров ртути (поперечный эффект Зеемана), эффекта спонтанного комбинационного рассеяния света молекулами газа, позволило создать многофункциональный газоаналитический комплекс для мониторинга газовых загрязнений приземного слоя атмосферы и работы в составе автоматизированных систем управления технологических процессов.

6. Разработка новых автоматических приборов и комплексов, построенных на использовании оптических и акустических методов измерений, позволила создать мезомасштабную пространственно-распределенную измерительно-вычислительную систему, обеспечивающую выполнение комплексных экспериментальных исследований и натурную апробацию новых методов экологического и метеорологического мониторинга атмосферного пограничного слоя (АПС), в том числе алгоритмов определения термодинамического состояния приземной атмосферы, методик восстановления вертикальных профилей метеорологических характеристик, технологий сверхкраткосрочного временного и мезомасштабного пространственного прогнозирования эволюции параметров АПС.

Достоверность полученных результатов подтверждается метрологически обоснованными испытаниями разработанной аппаратуры, сертификацией разработанных измерительных средств в Росстандарте, а также итогами их опытной и промышленной эксплуатации.

Личный вклад автора

Диссертация является обобщением результатов работ, выполненных автором в ИМКЭС СО РАН в период с 1980 г. по настоящее время, по разработке, созданию и внедрению новых приборов, программно-аппаратных комплексов и систем, построенных на использовании оптических и акустических методов измерений. Работа выполнена с использованием результатов, полученных лично автором или при его творческом участии в постановке задач и исследований.

В материалах, изложенных в главе 2 (параграфах 2.1, 2.3, 2.4) и главе 3 автору принадлежат основные теоретические и экспериментальные результаты, в главе 4 автором выполнялась конкретизация разработанных методов и решение частных инженерных задач, в параграфе 2.2 главы 2 и главе 5 автором сформулированы задачи, определены способы их решения, выбраны методы исследования. В обзорных статьях главы 1 автором использованы собственные материалы, а также материалы соавторов и других авторов.

Автором осуществлялось непосредственное руководство инженерно-конструкторскими разработками, работами по аттестации методик измерений и сертификации приборов, ему принадлежит, так же, основная роль в организации их производства и внедрении в различных областях научно-производственного и оборонного комплекса страны. Под руководством автора защищена диссертация на соискание степени кандидата технических наук [4С], часть результатов которой приведено в параграфе 2.2 настоящей работы.

За большой личный вклад в разработку и создание автоматических метеорологических комплексов военного назначения автору дважды (в 2008 и 2015 гг.) назначались именные стипендии МО РФ. Достижения автора в научной деятельности отмечены Почетными грамотами РАН (2002 г.) и СО РАН (2012 г., 2016 г.). За значительный вклад в процесс создания интеллектуальной собственности автор награжден Дипломом Торгово-промышленной палаты РФ (2013 г.) и нагрудным знаком «Изобретатель СССР» (1983 г.).

Автор выражает благодарность сотрудникам ИМКЭС СО РАН Азбукину А.А., Богушевичу А.Я., Кальчихину В.В., Кобзеву А.А., Матросову И.И., Петрову Д.В., Татуру В.В., являвшимся основными соавторами публикаций по совместно проведенным исследованиям. Особая благодарность выражается научному консультанту Тихомирову А.А. за неоценимую помощь в организации работ и подготовке диссертации.

Апробация работы

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались более чем на 60 международных, всероссийских (всесоюзных) и региональных конференциях и симпозиумах, в том числе: VII и X Всесоюзные симпозиумы по лазерному и акустическому зондированию атмосферы (г. Томск, 1982, 1989 гг.); III Всесоюзная конференция «Применение лазеров в технологии и системах передачи и обработки информации» (г. Таллин, 1987 г.); III, VI и XIX Межреспубликанские (Международные) симпозиумы «Оптика атмосферы и океана» (г. Томск, 1996, 1999, 2013 гг.); I, II, III, IV, V и VI Международные симпозиумы «Контроль и реабилитация окружающей среды» (г. Томск, 1998, 2000, 2002, 2004, 2006, 2008 гг.); III Российская научно-техническая конференция «Современное состояние проблемы навигации и океанографии» (г. Санкт-Петербург, 1998 г.); Международная конференция «Физика атмосферного аэрозоля» (г. Москва, 1999 г.); Международная конференция «Проблемы методологии, автоматизированного сбора и обработки метеоинформации и новые направления в развитии гидрометеорологического приборостроения (г. Ташкент, Республика Узбекистан, 1999 г.); IV, V, VI, VIII, IX, X и XI Сибирские совещания по климатологическому мониторингу (г. Томск, 2001, 2003, 2005, 2009, 2011, 2013, 2015 гг.); VI Международная конференция по судостроению, судоходству, оборудованию морских платформ и обеспечивающих их работу плавсредств, морская техника для освоения океана и шельфа (г. Санкт-Петербург, 2001 г.); VIII Joint International Symp. «Atmospheric and Ocean Optics. Atmospheric Physics» (г. Иркутск, 2001 г.); IV Российская научно-техническая конференция «Современное состояние, проблемы навигации и океанографии НО-2001» (г. Санкт-Петербург, 2001 г.); I Международная научно-практическая конференция «Управление отходами – основа восстановления экологического равновесия в Кузбассе» (г. Новокузнецк, 2005 г.); IV Межрегиональная научно-практическая конференция "Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, модернизация, эксплуатация, боевая эффективность, наука и образование" – "БРОНЯ-2008" (г. Омск, 2008 г.); X и XI Всероссийские конференции «Проблемы мониторинга окружающей среды (г. Кемерово, 2009, 2011 гг.); VII и VIII Всероссийские симпозиумы «Контроль окружающей среды и климата» (г. Томск, 2010, 2012 гг.); XVIII, XIX, XX, XXI, XXII и XXIII Международные конференции «Лазерно-информационные технологии в

медицине, биологии и геоэкологии» (г. Новороссийск, 2010, 2011, 2012, 2013, 2014, 2015 гг.); I и II Международные симпозиумы «Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты» (г. Москва, 2010 г., г. Новосибирск 2015 г.); XX Международная конференция «Лазеры. Измерения. Информация» (г. Санкт-Петербург, 2010 г.); Environmental Geosciences and Engineering Survey for Territory Protection and Population Safety (EngeoPro-2011) Intern. Conf. Moscow (г. Москва, 2011 г.); Международная конференция «Фундаментальные проблемы оптики - 2012» (г. Санкт-Петербург, 2012 г.); Международная конференция памяти академика А.М. Обухова «Турбулентность, динамика атмосферы и климата» (г. Москва, 2013г.); III Всероссийская научно-практическая конференция «Системы гидрометеорологического, экологического и специального мониторинга». Академические Жуковские чтения (г. Воронеж, 2015) и др.

Экспериментальные и опытные образцы разработанных измерительных приборов, комплексов и систем экспонировались, в общем счете, более чем на 30 международных, всероссийских и региональных выставках, в том числе:

- на специализированных международных метеорологических выставках «METEO EXPO-2003» и «METEOREX-2014» (г. Санкт-Петербург);
- на специализированных международных выставках по военной технике и средствам безопасности: «ВТТВ-Омск-2009» и «ВТТВ-Омск-2011» (г. Омск), «KADEX-2012» (г. Астана, Республика Казахстан), «День инноваций министерства обороны РФ. 2013 г.» (г. Москва), АРМИЯ-2015 (г. Кубинка), «Средства спасения-2006» (г. Санкт-Петербург), «Ергаки-2010» (пос. Танзыбей, Хакасия), Международный салон «Комплексная безопасность 2011» (г. Москва);
- на международных выставках: «OPTICS-EXPO - 2012» (г. Москва), INNOVUS-2013 (г. Томск), VI промышленная выставка «EXPO-RUSSIA KAZAKHSTAN 2015» (г. Алма-Ата, Республика Казахстан), «Открытые инновации - 2015» (г. Москва), «ТЕХНОПРОМ-2016 (г. Новосибирск).

Публикации

По теме диссертационной работы автором опубликовано более 150 работ, в том числе: 1 коллективная монография, 27 статей в рецензируемых научных журналах, входящих в перечень ВАК, 7 статей в зарубежных изданиях, входящих в базы данных WoS и Scopus, 45 докладов на международных и 38 докладов на отечественных конференциях; получено 26 авторских свидетельств и патентов (6 из них без соавторов) и 5 свидетельств о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Объем и структура работы

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка основных обозначений, списка цитируемой литературы и приложений. Рукопись содержит 471 страницу, включая 175 рисунков и 44 таблицы. Списки цитируемой литературы и публикаций содержат суммарно 258 наименований.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении кратко проанализировано состояние научно-технической проблемы, обоснована актуальность темы, сформулированы цель и основные задачи исследований, отмечены научная новизна, практическая значимость и реализация результатов работы, обоснованы достоверность результатов и личный вклад автора, указаны структура, объем и содержание работы, а также количество публикаций по теме диссертации.

В 1-й главе приведен краткий анализ современного состояния проблемы инструментального обеспечения экологического и метеорологического мониторинга атмосферы и сформулированы технические требования к разрабатываемым для этих целей автоматизированным системам, комплексам и приборам.

В п. 1.1 рассмотрены существующие автоматизированные информационно-измерительные системы (АИИС) для ЭММ АПС различного назначения, описаны их типы и приведены примеры их реализации [5С, 6С].

В п. 1.2 проведен краткий обзор технических средств, используемых в настоящее время для контроля метеорологических характеристик и газового состава приземной атмосферы – измерителей скорости и направления ветра, температуры и влажности воздуха, атмосферного давления и осадков, а также основных типов оптических газоанализаторов; оценена возможность применения этих технических средств в составе АИИС ЭММ АПС [4С, 7С, 8С, 9С, 14].

В п. 1.3 рассмотрены методы и технические средства дистанционного контроля метеорологических параметров АПС – локационные, аэрологические и основанные на использовании БПЛА, и также проанализирована возможность их применения в составе АИИС ЭММ АПС [10С].

В п.1.4 приведено краткое описание концепции построения измерительно-вычислительной системы для исследований новых алгоритмов, методов и технологий контроля АПС.

Во 2-й главе приведены результаты разработки акустических и оптических приборов и комплексов для измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС.

В п. 2.1 рассмотрены физические основы метода акустической термоанемометрии и технические аспекты его реализации в задачах контроля АПС.

Приведены результаты разработки 3D-УТА, построенного по бистатической акустической схеме. В этой схеме попарно согласованные акустические излучатели и приемники располагаются в пространстве по углам куба, а ультразвуковые импульсы распространяются по его диагоналям (рис.1). Компоненты вектора скорости ветра v_i и скорость звука в воздухе C определяются из системы уравнений:

$$\begin{aligned} L_1/t_1 &= C + v_z \cos \alpha + v_x \sin \alpha & (7-1 - \text{для канала №1}); \\ L_2/t_2 &= C + v_z \cos \alpha - v_x \sin \alpha & (5-3 - \text{для канала №2}); \\ L_3/t_3 &= C - v_z \cos \alpha + v_y \sin \alpha & (4-6 - \text{для канала №3}); \\ L_4/t_4 &= C - v_z \cos \alpha - v_y \sin \alpha & (2-8 - \text{для канала №4}); \end{aligned} \quad (1)$$

где L_i – расстояния между ЭАП, t_i – времена пролета ультразвуковых импульсов. Температура воздуха T определяется из известного соотноше-

ния: $C = 20,067 \sqrt{(1 + 0,3192e/P)T_k}$ (2), где e – давление водяного пара, P – атмосферное давление, T_k – абсолютная температура воздуха [1].

Разработаны варианты конструкции 3D-УТА (рис. 2), способные сохранять фиксированное расстояние между электроакустическими преобразователями (ЭАП) в условиях воздействия вибрации в диапазоне частот от 1 до 80 Гц с амплитудой виброускорения 39 м/с^2 (4g), механических ударов с пиковым ускорением до 59 м/с^2 (6g) при длительности действия ударного ускорения до 4 мс и с ускорением 196 м/с^2 (20g) при длительности действия 0,2 с, механических ударов многократного действия с ускорением 147 м/с^2 (15g) при длительности действия от 5 до 10 мс, при этом коэффициент «ветровой прозрачности» 3D-конструкции, характеризующий степень искажения ветрового потока элементами конструкции, не превышает значений 0.87 – 0.92 [59].

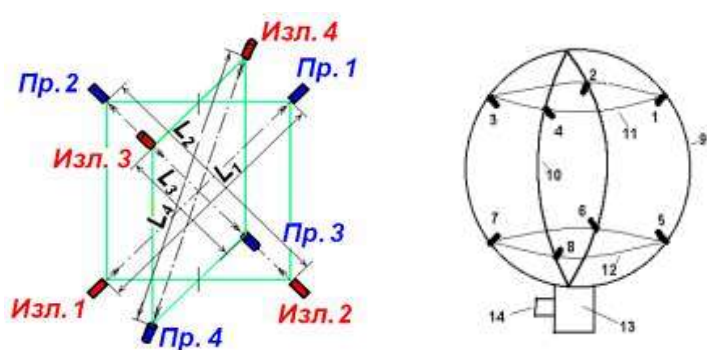


Рис. 1 – Акустическая и геометрическая схемы 3D-УТА ДСВ-15 и УТАМ-75: 2, 4, 6, 8 – ЭАП-излучатели 1, 3, 5, 7 – ЭАП-приемники, 9, 10, 11, 12 – кольца арматуры, несущей ЭАП, 13, 14 – основание конструкции (корпус с электронными платами.)



Рис. 2 – Конструкция 3D-УТА ДСВ-15 (а) и УТАМ-75 (б): 1 – ЭАП (излучатели и приемники) 2 – поддерживающая арматура; 3 – корпус с электронными платами.

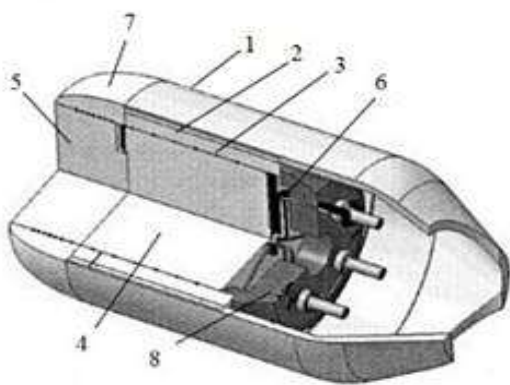


Рис. 3 – ЭАП ДСВ-15 и УТАМ-75: 1 – корпус, 2 – акустический изолятор, 3 – нагреватель, 4 – пьезоэлемент, 5 – проектор, 6 – демпфер, 7 – герметик, 8 – плата

Разработанные ЭАП (рис. 3) способны длительное время работать в условиях воздействия различных внешних факторов – колебаний температуры в пределах $\pm 60^\circ\text{C}$, влажности до 100%, осадков в виде дождя и снега, ветровых нагрузок и пр.

Программное обеспечение (компьютерные программы «МЕТЕО-3.0» и «АМК-СОФТ-4» [63]) позволяет осуществлять на основе первичных данных ультразвукового блока вычисление мгновенных значений метеорологических величин с учетом мешающих факторов (различных видов помех, фактора качания устройства и пр.). Определение метеорологических величин выполняется в режиме реального времени [6].

В п. 2.2 рассмотрены физические основы оптического метода измерения осадков и технические аспекты его реализации в задачах контроля АПС, приведено описание разработанных оптических измерителей осадков и результаты их испытаний [18].

Определение характеристик осадков выполняется посредством получения и анализа теневых изображений частиц, проходящих под действием силы тяжести через виртуальную измерительную площадку оптического канала устройства (рис.4) [27].

Измерение размеров последовательных сечений мгновенных теневых изображений частиц атмосферных осадков позволяет определить их микроструктурные и динамические характеристики [25]: эквивалентный диаметр, скорость падения, вид атмосферных осадков, а также вычислить значения интегральных характеристик осадков [28, 31]:

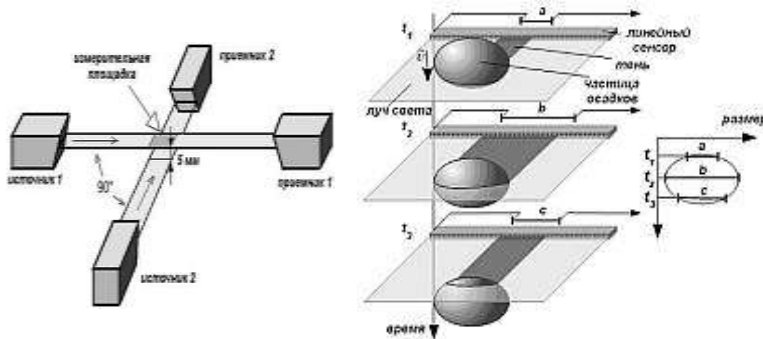


Рис.4 – Принцип регистрации теневых изображений частицы осадков в двух проекциях (размер виртуальной измерительной площадки – 50 кв. см, частота сканирования– 20 КГц)

- объем частицы осадков V :

$$V = \frac{\pi(k_{\max}l)^3}{6} \quad (6)$$

где $k_{\max}$ – максимальное количество затененных светочувствительных элементов линейного сенсора, зарегистрированное для данной частицы осадков, l – среднее значение горизонтального размера светочувствительного элемента, произведение $k_{\max}l$ – эквивалентный диаметр d_3 данной частицы;

- интенсивность I (мм/час):
$$I = 6\pi \times 10^{-4} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) \rho(d_3^3) V(d_3) dd_3 \quad (7)$$

где $V(d_3)$ – скорости падения частиц в зависимости от эквивалентного диаметра; $\rho(d_3)$ – функция распределения по среднему d_3 ;

- сумму осадков $Q(\text{мм})^*$:
$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt, \quad (8)$$

где t_1 и t_2 время начала и окончания выпадения осадков;

- концентрацию частиц N :
$$N = \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) dd. \quad (9)$$

Теневой метод измерения позволяет также определять такие характеристики осадков, как водность W (г/м³), удельное сечение B_y (км⁻¹) и радиолокационная отражаемость Z (мм⁶/м³), используемых в задачах исследования физики АПС и прикладных задач радиолокации:

$$W = \frac{\pi \rho \cdot 10^{-3}}{6} \int_{d_{\min}}^{d_{\max}} \rho(d_3) d_3^3 dd_3; \quad B_y = \frac{\pi \cdot 10^{-3}}{2} \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \rho(D) D^2 dD; \quad Z = \int_{D_{\min}}^{D_{\max}} \rho(D) D^6 dD, \quad (10)$$

где $\rho(D)$ – функция распределения по среднему видимому диаметру.

На рисунках 5 и 6 приведены внешний вид, структурная и функциональная схемы двухканального измерителя осадков ОДИО и одноканального ОПТИОС [23, 61]. В таблице 1 – их основные технические характеристики.

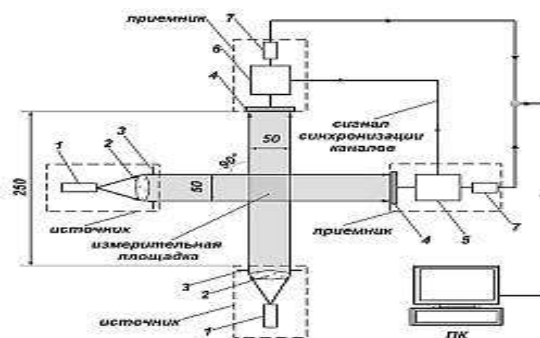
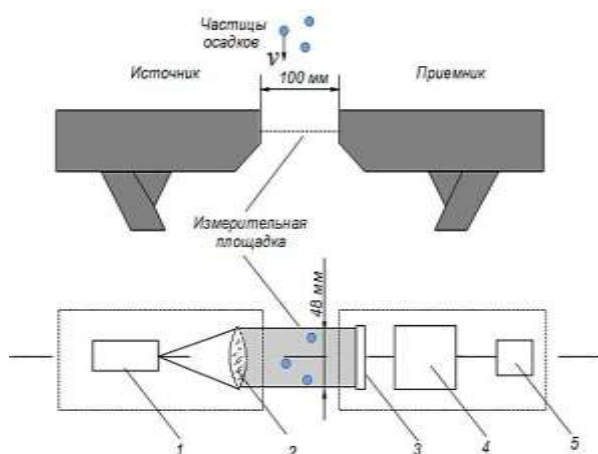


Рис. 5 – Двухканальный оптический измеритель осадков ОДИО: 1 - диодный лазер ($\lambda = 0.69$ мкм), 2 - коллиматор, 3 - защитное стекло, 4 - многоканальный фотоприемник, 5, 6 - микропроцессор [65], 7 - выходной интерфейс



а) Оптическая схема ОПТИОС-2 (ОПТИОС-1): 1 – источник излучения; 2 – линза; 3 – линейный сенсор; 4 – блок формирования измерительной информации [66]; 5 – интерфейсный модуль



б)



в)

Одноканальные оптические измерители осадков: б) ОПТИОС-1, в) ОПТИОС-2

Рис. 6 – Одноканальный оптический измеритель осадков ОПТИОС

Таблица 1. Технические характеристики измерителя осадков ОПТИОС

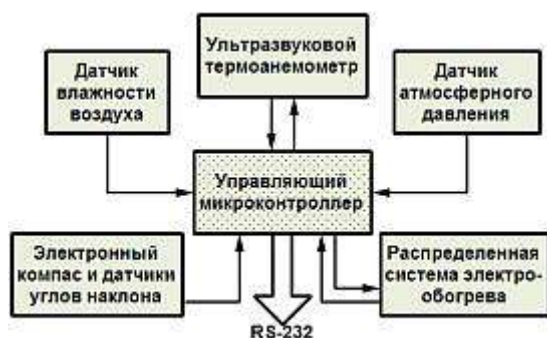
Характеристика	Значение
Диапазон размеров частиц осадков	от 0.3 мм до 10 мм
Погрешность измерения размеров частиц осадков	± 0.1 мм
Чувствительность по количеству выпавших осадков	не хуже 10^{-4} мм
Погрешность измерения количества осадков	не более $\pm 5\%$
Погрешность измерения скорости частиц осадков	не более $\pm 3\%$

Измерительная площадка, через которую проходят анализируемые частицы осадков, является адаптивной – может автоматически менять свои размеры в за-

висимости от интенсивности осадков, что позволяет оптимизировать метрологические параметры осадкомера и снизить требования к пропускной способности канала передачи и обработки данных [22, 62].

В заключение п.2.2 приведено описание выполненных метрологических исследований [24,67] и представлены результаты лабораторных и натурных испытаний экспериментальных образцов оптического измерителя осадков ОПТИОС [32].

В п. 2.3 приведено описание разработанной УАМС АМК-03 и ее модификаций [19]. Метеостанция АМК-03 представляет собой 3D-УТА ДСВ-15 (или УТАМ-75) с интегрированными в него сенсорными датчиками влажности воздуха и атмосферного давления (рис. 7) [7].



а) Структурная схема АМК-03: управляющий контроллер PIC16F88 (Microchip) или 1986BE1 (АО «ПКК «Миландр», Россия), ультразвуковой термоанемометр ДСВ-15 или УТАМ-75, датчик давления МРХА 4115АС6U (Motorola) или РКМА-016 (СКТБ ЭлПА, Россия), датчик влажности ННН-4602 (Honeywell, США)



б) УАМС АМК-03 на метеомачте

Рис. 7 – УАМС АМК-03

Дополнительно, в состав УАМС входят блоки, выполняющие важные сервисные функции: автоматический учет углов наклона (качания) установленного на метеомачте 3D-УТА при вычислении истинного значения вектора скорости ветра, контроль его азимутальной ориентации при определении направления ветра, контроль функционирования и автоматическая градуировка 3D-УТА, устранение обледенения ЭАП, вызванного метеорологическими факторами, цифровую индикацию измеренных метеорологических величин и передачу первичных данных на внешний компьютер для дальнейшей их обработки, обеспечение электропитания метеостанции от различных источников электрического тока (сеть 220В, аккумуляторные батареи, солнечные батареи) и др.

Функциональные возможности метеостанции АМК-03 по получению и представлению дополнительной метеорологической информации определяются высокой частотой измерения мгновенных значений ветровых характеристик и температуры воздуха (10-40 Гц) и специализированным программным обеспечением [63], позволяющем в режиме реального времени вычислять, формировать базы данных и затем представлять информацию в цифровом и графическом видах.

УАМС АМК-03 имеет мобильные (переносные и бортовые) модификации. Они предназначены для выполнения метеорологических измерений на произвольных заранее не оборудованных площадках [13].

Переносной метеорологический комплект 1Б65 (рис.10) является изделием военного назначения и предназначен для выполнения метеорологических измерений в полевых условиях в автономном режиме [11]. В состав метеокомплекта входят 3D-УТА с интегрированными в его конструкцию сенсорными датчиками атмосферного давления и влажности воздуха, специализированный пульт управления, разборная метеомачта (высота 4 метра) с устройством азимутальной ориентации и базовое программное обеспечение «МЕТЕО-3.0». Все элементы метеокомплекта укладываются в герметичный транспортный контейнер-ранец, размером 215×400×715 мм, приспособленный для переноски одним человеком. В транспортном контейнере изделие имеет вес около 18 кг и способно выдерживать вибрационные и ударные нагрузки, предусмотренные требованиями ГОСТ РВ 20.39.304-98.

Бортовые метеокомплексы (рис. 9) могут устанавливаться на различных транспортных средствах [12]. Они дополнительно включают в свой состав метеомачту с электромеханическим приводом подъема/опускания и автоматически открывающийся защитный контейнер, в котором в транспортном положении находится измерительный блок метеокомплекса. Перевод метеокомплекса из транспортного положения в боевое и обратно осуществляется оператором с пульта управления без выхода экипажа из кабины транспортера. Технические характеристики бортовых метеокомплексов соответствуют требованиям ГОСТ РВ 20.39.304-98 (группа исполнения 1.6.5), что позволяет устанавливать их на различные типы гусеничных и колесных машин военного и гражданского назначения (таблица 2).



Рис.8 – Переносной автоматизированный метеокомплект 1Б65



а)



б)

Рис. 9 – Бортовой метеокомплекс 1Б65Б в составе системы метеорологического обеспечения космодрома Байконур (а) и на машине управления артиллерийским огнем (б)

Устойчивость метеокомплекса 1Б65Б к воздействию вибрационных и ударных нагрузок обеспечивается оригинальной конструкцией измерительного блока, а также автоматической системой контроля функционирования и восстановления метрологических характеристик (АСКФ).

Разработаны комплекты метрологической документации УАМС АМК-03 и ее модификаций, на основании которых выполняются все виды испытаний, требуемых при серийном выпуске изделий. УАМС АМК-03, АМК-Б (в составе изделия ГО.1.26.02) и ПАМК 1Б65 внесены в реестр средств измерений РФ гражданского и военного назначения.

Таблица 2. Основные технические характеристики АМК-03

Измеряемая величина	Диапазон	Погрешность
1. Скорость горизонтального ветра (V)	0,1 ÷ 40 м/с	$\pm (0,1 + 0,02 V)$ м/с
2. Скорость вертикального ветра (w)	-15 ÷ +15 м/с	$\pm (0,1 + 0,02 V)$ м/с
3. Направление ветра (D)	0 ÷ 360°	$\pm 2^\circ$
4. Температура воздуха (T)	-50 до +50 °С	$\pm 0,3$ °С
5. Относительная влажность воздуха (r)	15 ÷ 100 %	$\pm 2,5$ % ÷ ± 5 %
6. Атмосферное давление (P)	520 ÷ 800 мм.рт.ст.	$\pm 0,8$ мм.рт.ст.

В п. 2.4 приведено описание разработанных систем и устройств для диагностики функционирования и восстановления метрологических характеристик 3D-УТА УАМС АМК-03 в полевых условиях непосредственно на месте эксплуатации прибора.

Система диагностики АСКФ [54] основана на использовании принципа «камеры нулевого ветра»: при нахождении 3D-УТА в закрытом контейнере регистрируемая им скорость ветра должна быть равна нулю, в противном случае делается вывод о нарушении геометрии конструкции термоанемометра и необходимости переопределения расстояний L_i между ЭАП.

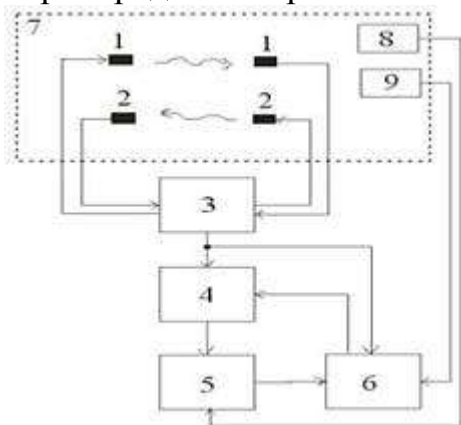


Рис.10 – АСКФ АМК-03Б (1Б65Б): 1, 2 – излучатели и приемники 1-го и 2-го каналов, 3 - измеритель временных интервалов, 4, 6 – основное и дополнительное вычислительные устройства, 5 - устройство сравнения, 7 - бокс-контейнер, 8 - датчик закрытия бокса-контейнера, 9 - дополнительный датчик температуры воздуха

Для этого в микропроцессорном блоке устройства решается «обратная» задача вычисления расстояний L_i по известным величинам времен пролета t_i акустических импульсов между излучателем и приемником (t_i измеряется электронной схемой системы) и температуры воздуха T (измеряется дополнительно

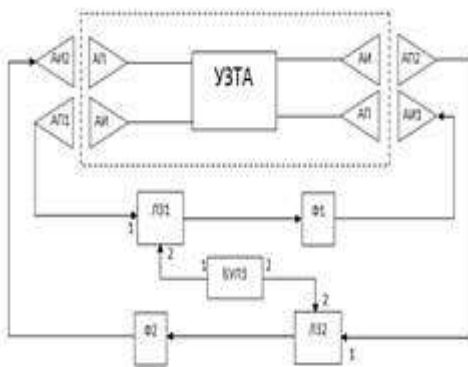
ным датчиком температуры): $L_i = 20.067 t_i T^{1/2}$. Обновленные значения L_i вводятся в оперативную память УТА и используются, в дальнейшем, при вычислении значений скорости ветра и температуры воздуха. Данный алгоритм позволяет автоматически восстанавливать метрологические характеристики УТА после произошедших в процессе эксплуатации или транспортировки механических деформаций его измерительного тракта.

Разработанная АСКФ интегрирована в конструкцию бортовых метеоплексов АМК-03Б и 1Б65Б гражданского и военного назначения (рис. 10).

Для контроля и диагностики 3D-УТА стационарных и переносных метеоплексов типа АМК-03 разработан портативный комплекс ПККУТ (рис. 11), в котором, так же, использован принцип «камеры нулевого ветра» и, кроме того, реализован режим имитации параметров воздушного потока (скорости, направления и температуры) [60]. В этом режиме 3D-УТА коммутируется с устройством, осуществляющим преобразование генерируемых 3D-УТА акустических импульсов в электрические, задержку электрических импульсов на заданные интервалы времени и обратное преобразование задержанных электрических импульсов в акустические, направляемые затем непосредственно на акустические приемники 3D-УТА. Задержка электрических импульсов в каждом канале 3D-УТА осуществляется с помощью регулируемых линий задержек, управляемых оператором. Величина задержек t_i определяется по формулам:

$$t_i = L_i / 20.067 T_{зад}^{1/2} \pm V_{зад} \quad (11)$$

где L_i – расстояние между излучателем и приемником акустических импульсов в i -м канале 3D-УТА, $T_{зад}$ – задаваемое оператором значение температуры воздуха, $\pm V_{зад}$ – задаваемое оператором значение (и направление) скорости ветра.



Управление работой ПККУТ (вычисление величин t_i , введение этих значений в блок управления линиями задержки и пр.) осуществляется специально разработанной компьютерной программой ПККУТ-СОФТ. ПККУТ обеспечивает возможность контроля и корректировки геометрических размеров контрольной зоны УТА, а также проверки работоспособности ультразвуковых каналов измерения

скорости ветра в диапазоне значений от 0,01 до 65 м/с и температуры воздуха в диапазоне значений от минус 70 до плюс 70 °С.

В 3-й главе представлены результаты разработки оптических и акустических комплексов для дистанционного контроля характеристик АПС.

В п. 3.1 рассмотрены методологические основы и технические аспекты реализации технологии дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС. Разработанный метод позволяет выполнять непосредственные измерения метеорологических величин и турбулентных параметров атмосферы с помощью портативных автономных автоматических метеостанций, устанавливаемых на борту БПЛА. С этой целью БПЛА, по командам оператора или в автоматическом режиме, выводятся в заданную точку воздушного пространства и «зависают» в ней на необходимое время. Передача полученных метеостанцией данных в центр обработки осуществляется по радиоканалу в режиме реального времени.

Технология дистанционного контактного измерения метеорологических и турбулентных характеристик АПС реализована с помощью двух видов БПЛА - гексакоптера и привязного аэростата (рис. 12).

Портативная метеостанция ПЭМС устанавливается на платформе гексакоптера типа DJI S900 и позволяет выполнять контактные измерения средних значений температуры воздуха, влажности и атмосферного давления в заданных точках АПС на высотах до 2000 метров при общей дальности полета до 5 000 метров и длительности до 45 минут. Портативная автоматическая ультразвуковая метеостанция ПУМС устанавливается на платформе привязного аэростата гибридного типа К-25М/А.



а) портативная метеостанция ПЭМС на гексакоптере DJI S900

б) привязной аэростат гибридного типа К-25/М (габариты: $3.7 \times 6.8 \times 2.8$ м, объем 25 м^3)

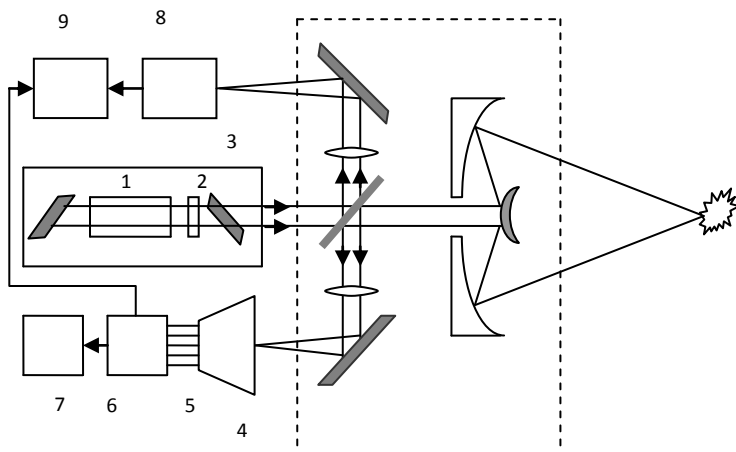
в) ПУМС на подвеске привязного аэростата;

Рис. 12 – Портативные метеостанции ПЭМС и ПУМС на БПЛА

Комплекс ПУМС-БПЛА позволяет выполнять измерения средних значений скорости ветра, температуры воздуха, влажности и атмосферного давления, а также измерения мгновенных значений скорости ветра, температуры воздуха и турбулентных характеристик в заданных точках АПС на высотах до 1000 метров с пространственным разрешением до 10 метров и скоростью подъема (спуска) до 4 м/с, при этом погрешности измерения метеорологических величин составляют: для скорости ветра – $\pm(0,1 + 0,02 V)$ м/с, для температуры воздуха – $\pm 0,5^\circ\text{C}$, для влажности воздуха – $\pm 2,5 \%$, для атмосферного давления – $\pm 0,8$ мм рт. ст.

В п. 3.2 рассмотрены физические основы и технические аспекты реализации двух дистанционных бесконтактных методов контроля экологического и метеорологического состояния АПС – метода, основанного на эффекте оптического пробоа, дистанционно возбуждаемого в атмосфере мощным лазерным излучением, и

трассового метода измерения метеорологических характеристик АПС с использованием БПЛА. Эффект оптического пробоя в воздухе возникает при распространении лазерного излучения, плотность мощности которого превышает некоторое пороговое значение [2]. Это явление сопровождается появлением «лазерной искры» (плазмы оптического пробоя) и распространением ударной волны (акустического импульса). Устройством, инициирующим дистанционный оптический пробой в атмосфере и осуществляющим регистрацию его оптического и акустического излучения, является спектрохимический лидар (СХ-лидар) [43] (рис. 13).



а) блок-схема СХ-лидара



б) «лазерная искра» в атмосфере

Рис. 13 – Спектрохимический лидар а): 1 – импульсный неодимовый лазер (ГОС-1001), 2 – пассивный затвор на кристалле LiF:F_2 , 3 – телескоп Кассегрена ($d = 250$ мм), 4 – спектрометр СТЭ-1, 5 – оптико-волоконный коллектор, 6 – многоканальное фотоприемное устройство [3], 7 – устройство измерения параметров плазмы [40-42], 8 – фотоприемник, 9 – устройство для измерения порога оптического пробоя [46, 53].

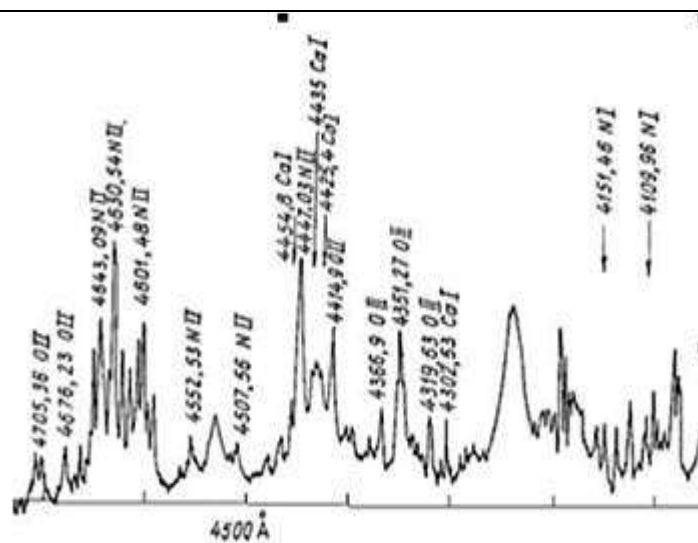


Рис. 14 – Фрагмент спектра эмиссионного излучения плазмы оптического пробоя

Таблица 3. Результаты спектрохимического анализа АПС

Элемент	Эмиссионные линии	Относительное содержание элемента
Fe	3859.9 4271.8	1.0
Al	3944.0 3961.5	1.5
Ca	3933.7 3968.5 4226.7	0.4
Si	3905.5	2.5
Na	5895.9 5889.9	0.1

СХ-лидар позволяет проводить контроль поллютантов (газов и твердых аэрозолей), присутствующих в воздухе [37, 44, 45, 47], на основе анализа спектра эмиссионного излучения образовавшейся плазмы оптического пробоя [38, 39]. На рисунке 14 приведены типичные спектры эмиссионного излучения аэрозольно-газовой смеси, содержащей частицы железа (Fe), алюминия (Al), кальция (Ca), кремния (Si) и натрия (Na), а в таблице 3 – результаты полуколичественного анализа содержания этих элементов в воздухе.

Регистрируя время распространения акустического сигнала от точки локализации оптического пробоя до лазера, вызвавшего пробой, можно определить среднюю по трассе зондирования скорость ветра: компоненту вектора скорости ветра V_x^{emp} можно определить из известного соотношения: $V_{36} \pm V_x^{emp} = L/t$, где L – расстояние от источника акустического импульса (лазерной искры) до приемника (установленного на земле лидара), t – время распространения акустического импульса между ними (рис. 15).

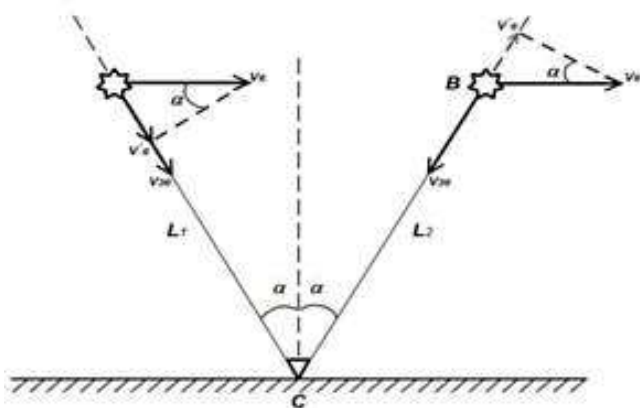


Рис. 15 – Способ определения скорости ветра в АПС с помощью СХ-лидара

Для определения прочих компонент вектора скорости ветра V_y^{emp} и V_z^{emp} требуется повторить эту же процедуру в других точках АПС, перемещая соответствующим образом источник звука в атмосфере путем изменения направления фокусировки лазерного излучения [56].

Формирование в заданной точке атмосферы источника акустических импульсов может быть осуществлено, так же, с помощью БПЛА с установленным на нем генератором звука.

В 4-й главе приведены результаты разработки автоматических оптических газоанализаторов для контроля загрязнений приземной атмосферы.

В п. 4.1 рассмотрены физические основы и технические аспекты реализации метода дифференциальной спектроскопии для контроля загрязнения приземной атмосферы [8], а также представлены результаты разработки одно- и двухкомпонентного газоанализаторов, использующих этот метод в ближней ультрафиолетовой области оптического спектра [9].

На участке оптического спектра 220÷235 нм присутствуют полосы поглощения молекул окиси азота NO и двуокиси серы SO₂ (рис. 16, а). В однокомпонентном газоанализаторе ДОГ-1М для анализа концентрации NO использованы два участка спектра с центрами 227,6 нм и 230 нм. Концентрация молекул NO в газовой смеси вычисляется из соотношения:

$$N_{NO} = c_0 + c_1 \frac{I_2}{I_1} + c_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2 + c_3 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^3 \quad (11)$$

В двухкомпонентном газоанализаторе ДОГ-4 для анализа концентрации NO и SO₂ использованы три участка спектра с центрами 224,0 нм, 227,6 нм и 230,0 нм. В них происходит одновременное поглощение света как окисью азота, так и двуокси-

стью серы, соответственно, отношение интенсивностей света, прошедшего через кювету с дымовым газом при двух различных положениях светофильтра, является нелинейной функцией относительно концентрации молекул NO и SO_2 . Расчет концентраций молекул N_{NO} и N_{SO_2} проводится путем решения системы нелинейных уравнений вида [4]:

$$\begin{aligned} \frac{I_2}{I_1} &= a_0^{(21)} + a_1^{(21)} N_{\text{NO}} + a_2^{(21)} N_{\text{SO}_2} + a_3^{(21)} N_{\text{NO}}^2 + a_4^{(21)} N_{\text{SO}_2}^2 + a_5^{(21)} N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2} \\ \frac{I_3}{I_1} &= a_0^{(31)} + a_1^{(31)} N_{\text{NO}} + a_2^{(31)} N_{\text{SO}_2} + a_3^{(31)} N_{\text{NO}}^2 + a_4^{(31)} N_{\text{SO}_2}^2 + a_5^{(31)} N_{\text{NO}} N_{\text{SO}_2} \end{aligned} \quad (12)$$

Калибровочные константы s_i и $a_k^{(ji)}$ в соотношениях (2) и (3) определяются при градуировке газоанализаторов.

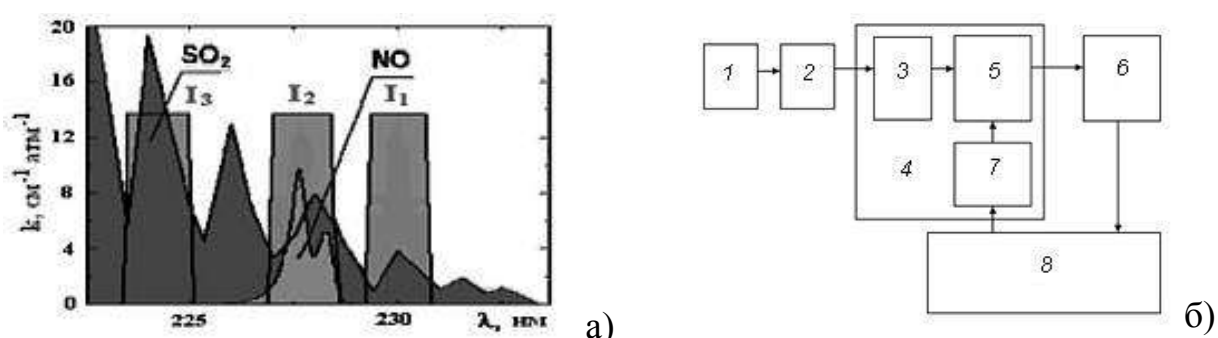


Рис. 16 – Участки спектра для измерения дифференциального поглощения (а) и блок-схема газоанализатора ДОГ-1М (б): 1 – источники излучения, 2 – оптическая система, 3 – газовая кювета, 4 – монохроматор, 5 – диспергирующий элемент, 6 – фотоприемник, 7 – устройство сканирования спектра, 8 – блок управления

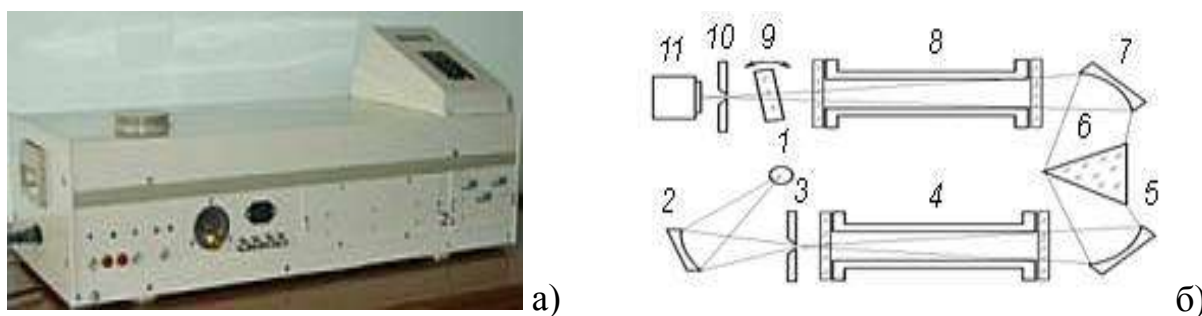


Рис. 17 – Внешний вид (а) и оптическая схема (б) газоанализатора ДОГ-4 [51]: 1–источник излучения (дейтериевая лампа ЛД2(Д)), 2 – зеркало, 3 – входная щель, 4 и 8 – кюветы с контролируемым газом, 5 – коллиматорный объектив, 6 – кварцевая призма, 7 – камерный объектив, 9 – кварцевая пластина, 10 – выходная щель, 11 – фотоприемник (Ф-29)

Газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4 (рис. 17, а) выполнены по схожим функциональным схемам (рис. 16, б) [5]. В газоанализаторе ДОГ-1М метод дифференциального поглощения реализован с помощью источника широкополосного излучения и узкополосного перестраиваемого интерференционного светофильтра, а в ДОГ-4 перестраиваемый спектральный фильтр выполнен на основе кварцевой призмы (рис. 17, б) [48].

Технические характеристики газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4 (табл. 4) позволяют использовать их в составе систем экологического мониторинга в качестве датчика контроля количества выбросов окиси азота и двуокиси серы в атмосферу локализованными источниками, а также в АСУ ТП. Разработаны комплекты метрологической документации газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4, на основании которых выполняются все виды испытаний, требуемых при серийном выпуске изделий. Газоанализаторы внесены в реестр средств измерений РФ.

Таблица 4. Технические характеристики газоанализаторов ДОГ-1М и ДОГ-4

Наименование показателя	Значение	
	ДОГ-1М	ДОГ-4
1. Измеряемые газовые компоненты	NO	NO, SO ₂
2. Диапазон измерений, мг/м ³	0–1000	0–500
3. Масса, кг	25	20
4. Предел относительной погрешности	±10%	
5. Время измерения, не более	10 сек	
6. Время непрерывной работы, не менее	9000 час	

В п. 4.2 рассмотрены физические основы применения эффекта Зеемана в методе дифференциальной атомно-абсорбционной спектроскопии (ДААС) и технические аспекты его реализации для определения содержания паров ртути в воздухе, представлены результаты разработки новых модификаций мобильного оптического ртутного газоанализатора ДОГ-5 и РГА/м [10].

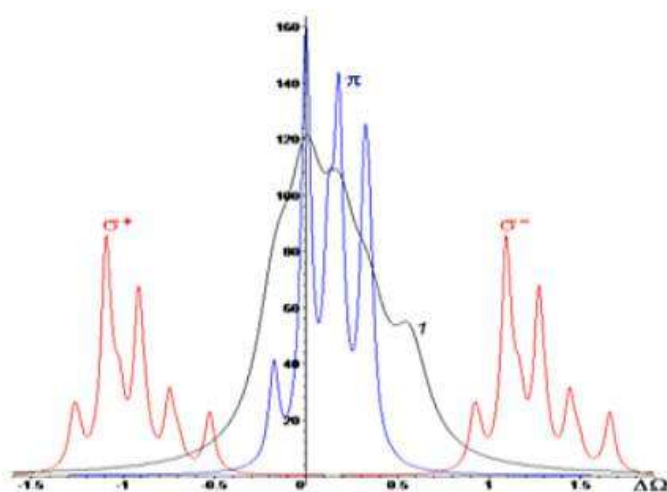


Рис. 18 – Реализация метода дифференциального поглощения с использованием поперечного эффекта Зеемана: 1 - линия поглощения паров ртути, π - несдвинутая π -компонента излучения ртутной лампы, σ^+ и σ^- - сдвинутые σ -компоненты излучения ртутной лампы

Разработка основана на использовании метода ДААС в ближней области ультрафиолетового диапазона. В качестве источника излучения использована ртутная лампа ($\lambda = 253,7$ нм) с естественным (природным) составом изотопов ртути [33]. Сканирование спектра оптического излучения достигается за счет использования эффекта Зеемана в поперечном магнитном поле. На рисунке 18 приведены взаимное спектральное расположение аналитической линии поглощения паров ртути и π - и σ -компонент спектра излучения ртутной лампы, помещенной в поперечное магнитное поле.

Концентрация паров ртути N_{pm} может быть определена из соотношений:

$$N_{pm} = Kx, \quad x = L(k_{\sigma} - k_{\pi}) = \ln \frac{I_1}{I_2} \frac{I_4}{I_3} \quad (13)$$

где L – оптическая длина измерительной кюветы, k_{π} и k_{σ} – коэффициенты поглощения π - и σ -компонент излучения в измерительной кювете газоанализатора, I_1 , I_2 , I_3 и I_4 – последовательно измеряемые фотоприемником оптические сигналы при различных фиксированных положениях поляризатора 5 и зеркал 6 (всего четыре фиксированных положения, соответствующих последовательному прохождению π - и σ -компонент излучения по каналу опорного сигнала и по внешней (измерительной) кювете. Коэффициент K определяется в процессе калибровки газоанализатора с использованием эталонной кюветы, в которой искусственно создается воздушная среда с заданными значениями концентрации паров ртути.

Конструкция и блок-схема анализатора паров ртути РГА/м приведена на рисунке 19.

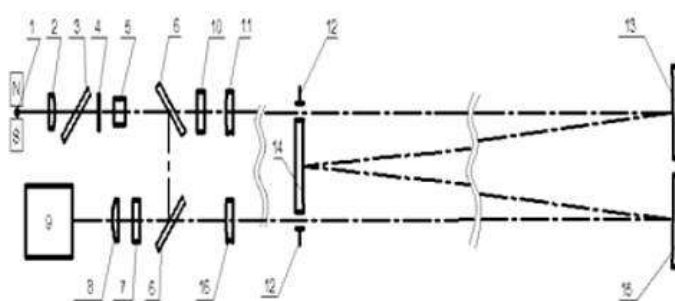


Рис. 19 – Внешний вид конструкции и блок-схема анализатора паров ртути РГА/м: 1 - ртутная лампа, 2 - линза, 3 - поляризационный компенсатор, 4 - полуволновая фазовая пластинка, 5 - призма Глана, 6 - плоские зеркала, 7 - интерференционный фильтр, 8 - линза, 9 - фотодетектор, 10 - эталонная кювета, 11 - линза, 12 - входное и выходное окна измерительной кюветы, 13, 14, 15 - сферические зеркала измерительной кюветы, 16 - линза

Таблица 5. Основные технические характеристики РГА/м (ДОГ-5)

Техническая характеристика	Значение
Предел обнаружения паров ртути	10 нг/м ³
Диапазон измеряемых концентраций паров ртути	от 30 до 20000 нг/м ³
Предел допускаемой основной погрешности:	30 %.
Время одного измерения	от 2 до 600 сек
Время непрерывной работы в автономном режиме	не менее 8 час
Габаритные размеры	674 × 260 × 84 мм
Масса, не более	6.0 кг

В п. 4.3 приведено описание нового способа и реализующего его устройства (термоакустического фотоприемника) для измерения интенсивности оптического излучения инфракрасного диапазона [49] и представлено обоснование возможности использования его при создании абсорбционного газоанализатора, способного работать в режиме мониторинга.

В основе способа лежит метод ультразвуковой термометрии газа, поглощающего проходящее через него оптическое излучение [16]. Детектируемое оптическое излучение направляется в заполненную поглощающим газом кювету, через которую распространяются ультразвуковые импульсы. Нагрев газа в кювете за счет поглощения оптического излучения приводит к изменению скорости звука в нем, что регистрируется специальным измерительным устройством (рис. 20).

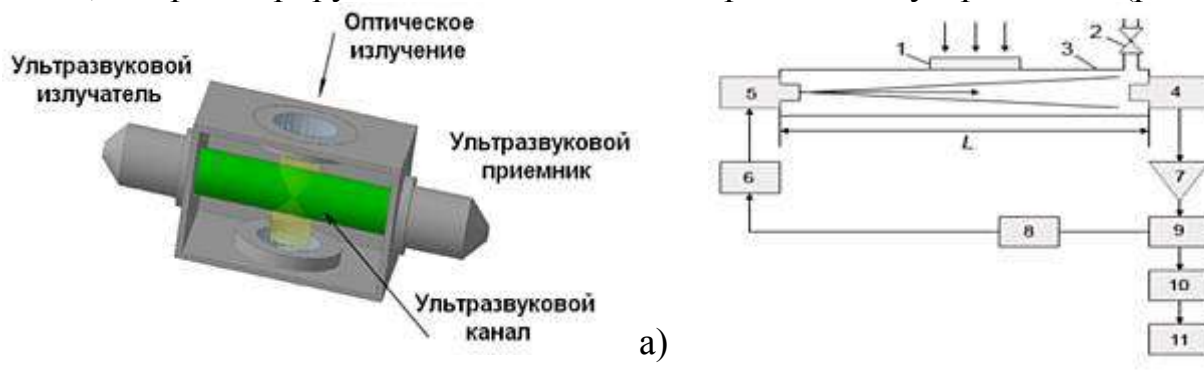


Рис. 20 – Конструкция (а) и блок-схема (б) термоакустического фотоприемника: 1 - входное окно, 2 - кран, 3 - приемная камера, 4 - приемник, 5 - излучатель, 6 - формирователь импульсов, 7 - усилитель, 8 - генератор тактовых импульсов, 9 - измеритель временных интервалов, 10 - интерфейс ПЭВМ, 11 - ПЭВМ.

Поглощенная газом энергия оптического излучения сложного спектрального состава определяется из закона Бугера:

$$\Delta I = I_0 - I^{np} = \int_0^\infty I_0(\omega) d\omega - \int_0^\infty I_0(\omega) e^{-k(\omega) \cdot P \cdot l} d\omega \quad (3)$$

где $I_0(\omega)$ - спектральная плотность излучения до прохождения кюветы $k(\omega)$ - спектральная плотность коэффициента поглощения, P - парциальное давление поглощающего газа, l - длина кюветы. В случае полного поглощения ($I^{np} = 0$) величина нагрева газа ΔT определяется соотношением $E = C_y M \Delta T$ (4).



Рис. 21 – Фототермоакустический газоанализатор: 1, 4 - источники широкополосного инфракрасного излучения, 2, 5 - фильтрационные кюветы, 3 - измерительная кювета [49], 6 - сравнительная кювета, 7 - генератор электрических импульсов, 8, 9, 10, 11 - излучатели и приемники ультразвуковых колебаний

где C_y - удельная теплоемкость газа, M - масса нагреваемого объема газа, ΔT - изменение температуры газа

С учетом известной связи скорости звука в газе c и его температуры T :

$$c = \sqrt{\frac{\chi RT}{\mu}} \quad (5)$$

из соотношений (3) и (4) можно вычислить величину энергии излучения: $E = k(c_2^2 - c_1^2)$ (5), а также определить оптимальные параметры газовой кюветы l и P (k - коэффициент пропорцио-

нальности, который может быть рассчитан аналитически, либо определен эмпирически путем калибровочных измерений).

В заключение приведены результаты экспериментальной апробации предложенного способа регистрации излучения CO_2 -лазера ($\lambda=10,6$ мкм). На основе термоакустического фотоприемника предложена схема абсорбционного газоанализатора для контроля загрязнений воздуха (рис. 21) [50].

В п. 4.4 рассмотрены физические основы метода спонтанного комбинационного рассеяния и технические аспекты его реализации в многокомпонентных СКР-газоанализаторах [20].

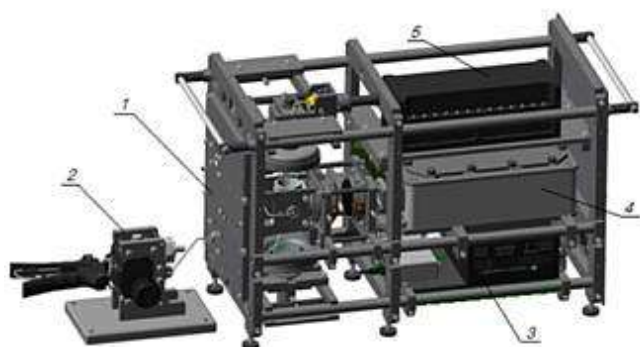
Эффект спонтанного комбинационного рассеяния заключается в способности молекулы газа рассеивать падающее на нее монохроматическое оптическое излучение с некоторым сдвигом частоты, причем если частота падающего излучения равна Ω_0 , частота рассеянного излучения равна Ω_i , то разность частот ($\Omega_0 - \Omega_i$) строго индивидуальна для каждого сорта молекул. На этом эффекте базируется метод СКР-газоанализа, основным достоинством которого является возможность одновременного детектирования всех молекулярных компонентов газовой среды с помощью одного лазера с фиксированной длиной волны излучения, при этом сигнал СКР любого молекулярного компонента строго индивидуален, пропорционален его концентрации, практически безынерционен и не зависит от состава газовой среды.

Для решения основной проблемы метода – увеличения интенсивности сигнала СКР – использовались следующие технические решения:

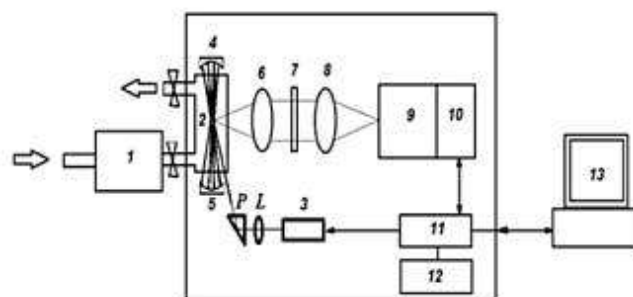
- применение твердотельных непрерывных лазеров с мощностью до 10 Вт;
- концентрирование газовой пробы за счет сжатия газа в измерительной кювете до давлений $50 \div 70$ атм.
- использование специально разработанной многопроходной оптической системы, обеспечивающей многократное прохождение лазерного луча через область фокусировки [55];
- использование специально разработанной оптической системы, обеспечивающей широкий угол сбора рассеянного излучения [58].

На рисунке 22 представлена конструкция и функциональная схема разработанного СКР-газоанализатора, а на рисунке 23 – некоторые результаты испытаний экспериментального образца [57].

Оценка метрологических характеристик СКР-газоанализатора выполнялась на основе программы и методики испытаний, разработанной совместно с ФГУП «ВНИИМ им. Д.И.Менделеева». На основании проведенных испытаний получено заключение о том, что метод СКР, реализованный в представленном на испытаниях экспериментальном образце газоанализатора СКР/м, может быть использован для анализа природного газа [29], а также газовых смесей аналогичного состава (биогазы, попутные нефтяные газы, газы нефтепереработки и пр.) при содержании компонентов не менее 0,01-0,05 % молярной доли.

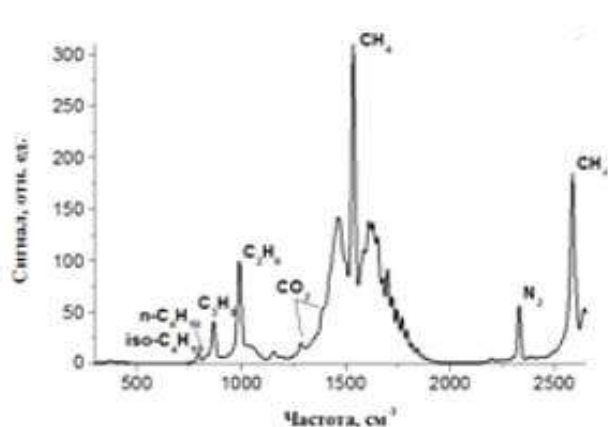


а) конструкция: 1 – газовая кювета с оптической системой фокусировки и сбора излучения; 2 – устройство пробоподготовки (помпа высокого давления); 3 – электронные блоки (блок питания и блок управления), 4 – анализатор спектра, 5 – лазер

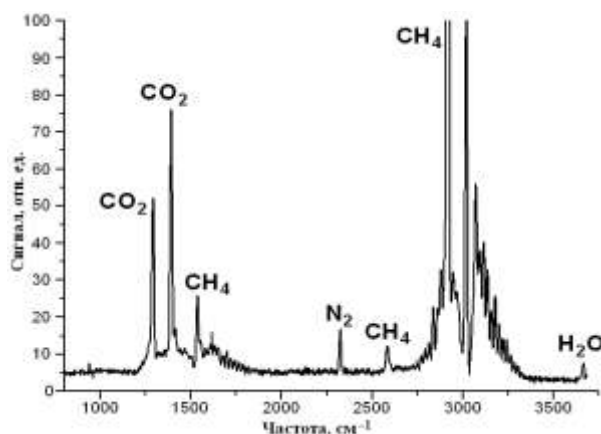


б) функциональная схема: 1 – устройство пробоподготовки; 2 – газовая кювета; 3 – лазер; 4, 5 – сферические зеркала; 6, 8 – объективы; 7 – светофильтр; 9 – монохроматор; 10 – ПЗС-матрица; 11 – блок управления; 12 – блок питания; 13 – компьютер

Рис. 22 – СКР-газоанализатор



а



б

Рис.23 – Результаты испытаний СКР-газоанализатора:

а) – спектр биогаза, б) – спектр природного газа

В 5-й главе представлены результаты разработки методического, технического, приборного и информационного обеспечения для мезомасштабной автоматизированной системы ЭО ИВС, созданной на основе разработанных измерительных комплексов и приборов.

В п. 5.1 исследованы методы и алгоритмы получения информации о состоянии АПС на основе данных мезомасштабной измерительно-вычислительной системы [17], а именно:

- алгоритмы статистической пространственно-временной экстраполяции метеорологических данных,
- алгоритмы определения типа стратификации в приземном слое атмосферы,
- алгоритмы определения уровня корреляции данных сети приземных автоматических метеорологических станций,
- методы восстановления высотных профилей метеорологических величин в приземном слое атмосферы.

В п. 5.2 приведено описание первой экспериментальной измерительно-вычислительной системы ИМС-МЕТЕО-3 для метеорологического контроля состояния АПС, созданной под руководством автора в период 2010 – 2013 гг. [21].

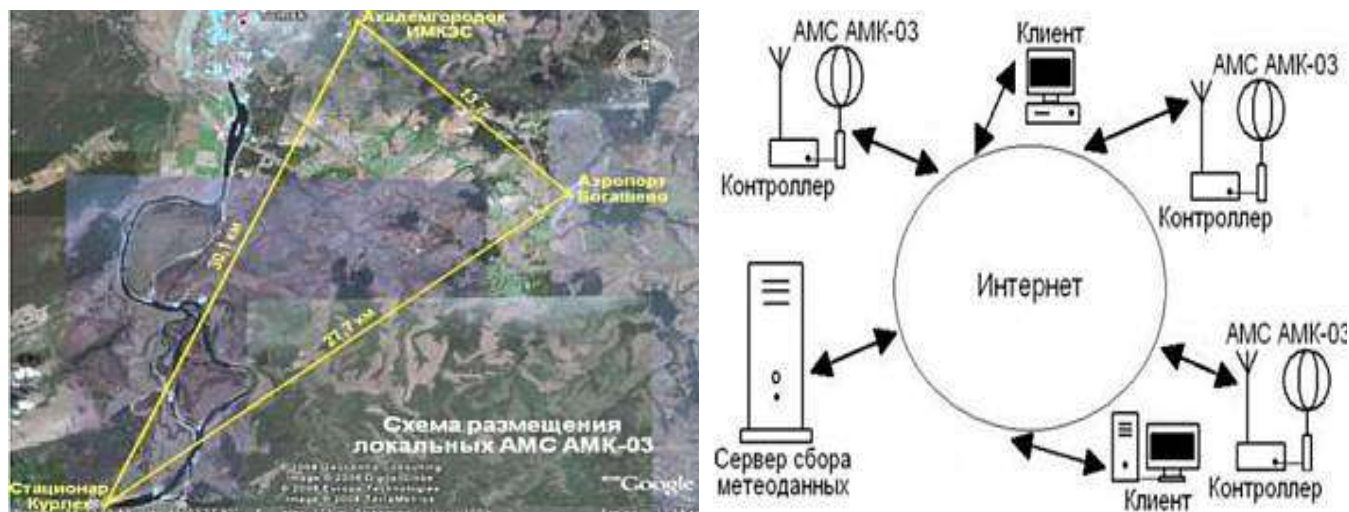


Рис. 24 – Размещение постов ИМС-МЕТЕО-3 и структурная схема системы

В ее состав входили три поста УАМС АМК-03, снабженные контроллерами передачи данных [15], и центр обработки данных (ЦОД) (рис. 24). Передача данных от УАМС на сервер сбора метеоданных осуществлялась через сеть ИНТЕРНЕТ по кабельному каналу Ethernet или GSM-GPRS-модему. Специально разработанная компьютерная программа позволяла пользователю запрашивать и получать через ИНТЕРНЕТ результаты измерений, поступающие на сервер с постов УАМС [64].

На рисунке 25 приведены результаты синхронных измерений температуры и скорости ветра, выполненные на разных постах УАМС, а также приведены значения коэффициентов их корреляции [26, 30]. Эти данные учитывались, в частности, при определении оптимальной плотности размещения измерительных постов с учётом орографии территории.

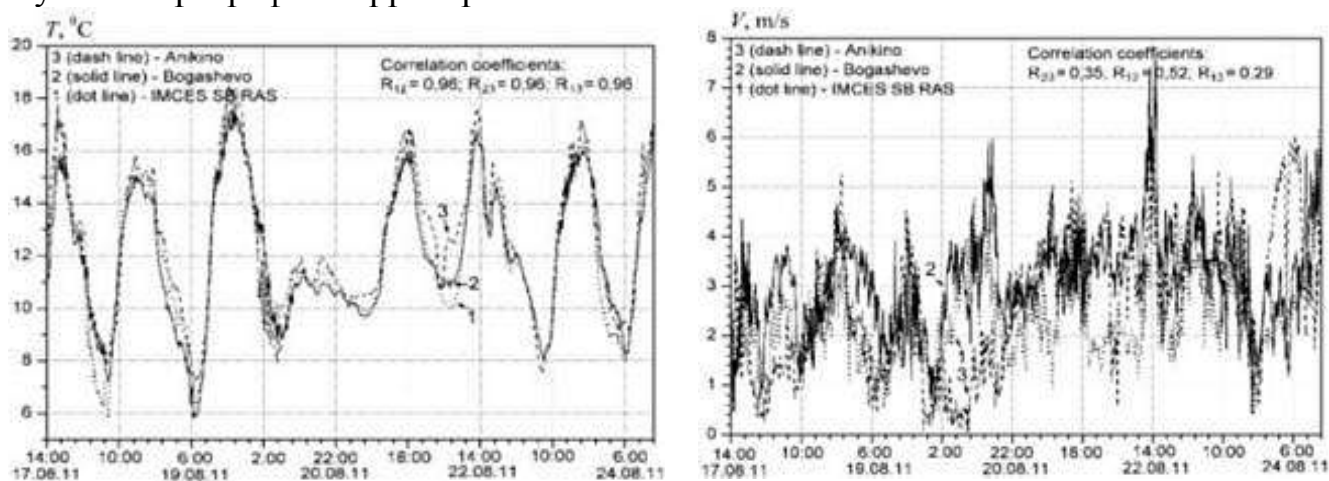


Рис. 25 – Результаты синхронных измерений температуры ($T, ^\circ\text{C}$) и скорости ветра ($V, \text{m/s}$); значения коэффициентов корреляции метеорологических величин.

В п. 5.3 приведено описание автоматизированной системы ЭО ИВС, созданной на основе ИМС-МЕТЕО-3 [3С]. Система ЭО ИВС (рис. 26), практически, полностью сконфигурирована на основе описанных выше измерительных приборов и комплексов и предназначена для экспериментальных исследований и натурной апробации новых алгоритмов, методов и технологий в области метеорологического и экологического мониторинга окружающей среды. В ее состав входят 4 стационарных автоматических метеорологических станции СТИК-1, ... СТИК-4, размещенных в 30-километровой зоне окрестности г. Томска, мобильный измерительный комплекс МИК, центр обработки данных (ЦОД), подсистема сбора и передачи данных ПСПД и автоматизированные рабочие места пользователей [34].

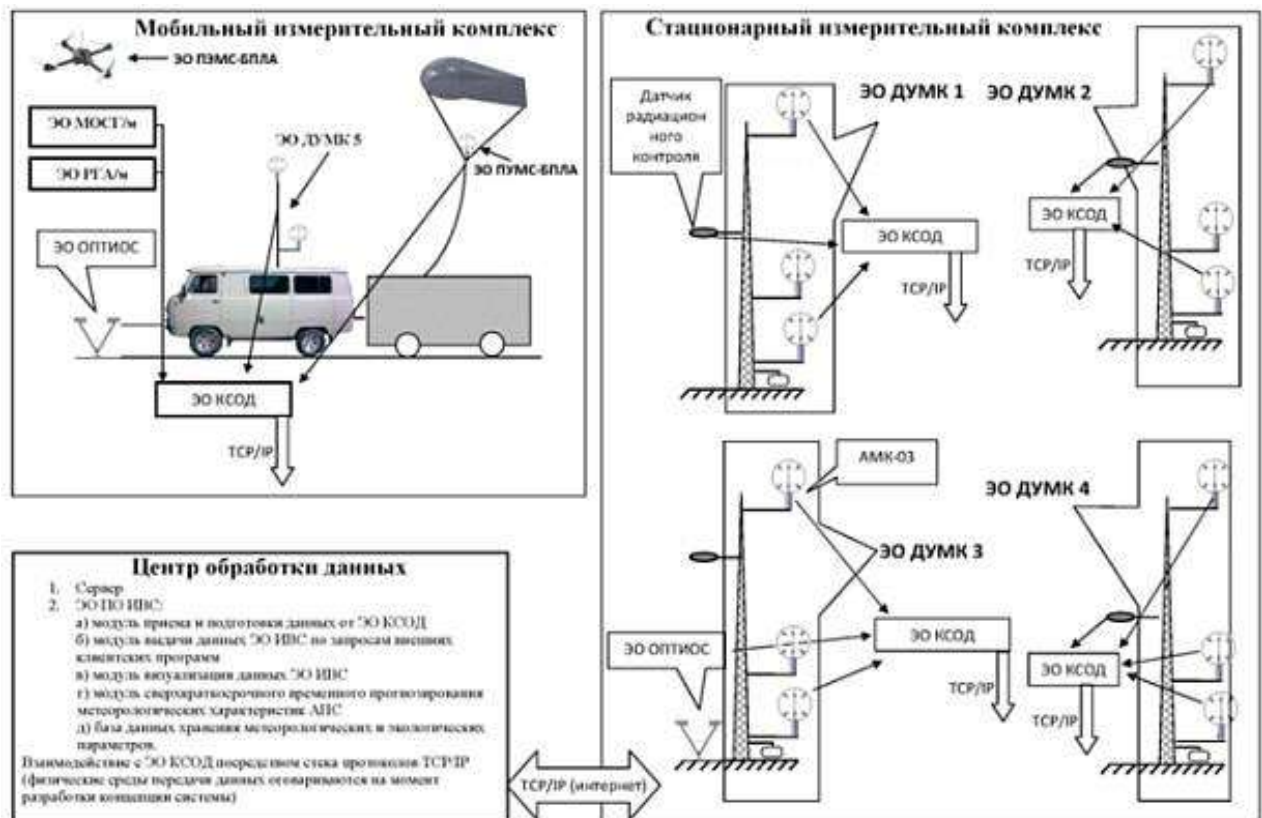


Рис. 26 – Комплексная измерительно-вычислительная система ЭО ИВС

В состав метеорологических станций СТИК (рис. 27) входят трехуровневая УАМС АМК-03Зу [34, 35], датчик приповерхностной температуры ДПТ, оптический измеритель осадков ОПТИОС, датчик γ -фона, контроллер сбора и первичной обработки данных КСОД (промышленный компьютер NISE-2200), а также модуль передачи данных.

В состав мобильного измерительного комплекса МИК (рис. 28) входят бортовой и переносной метеорологические комплексы АМК-03Б и АМК-03П, оптический измеритель осадков ОПТИОС, газоаналитический комплекс, состоящий из ртутного газоанализатора и многокомпонентного СКР-газоанализатора, модуль радиационного контроля МРК, контроллер сбора и первичной обработки данных КСОД, модуль передачи данных. Кроме того, в состав МИК входят два дистанционных метеоконкомплекса на платформе БПЛА – ПЭМС-БПЛА и ПУМС-БПЛА для

контактных измерений вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС.

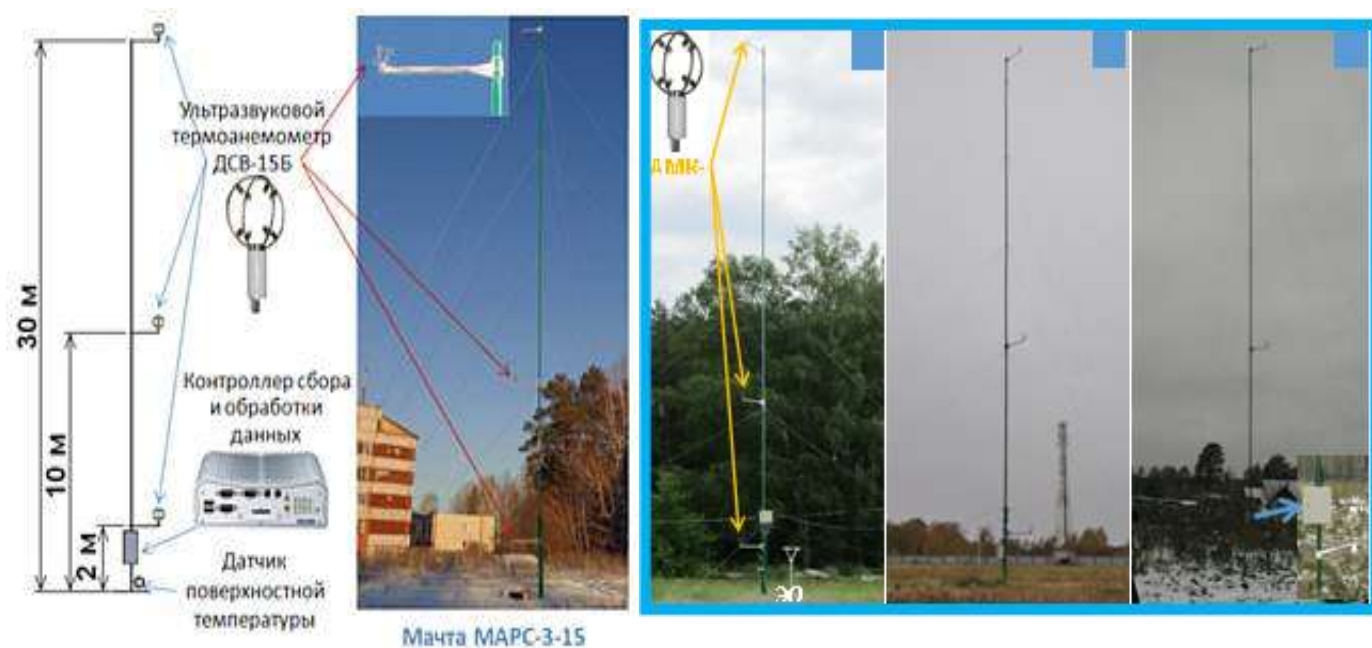


Рис. 27 – Стационарные метеорологические станции СТИК (4 поста)



Рис. 28 – Мобильный измерительный комплекс МИК в составе: а) ртутный газоанализатор, б) многокомпонентный СКР-газоанализатор, в) привязной аэростат К-25М/А с метеостанцией ПУМС, г) автомобиль ГАЗ («Соболь») с бортовой УАМС АМК-03Б, д) гексакоптер DJI S900 с метеостанцией ПЭМС, е) переносная УАМС АМК-03П, ж) измеритель осадков ОПТИОС-01.

ЦОД состоит из сервера HP ProLiant DL585 G7 на базе четырех процессоров Opteron 6386SE и программного обеспечения, включающего в себя модуль приема и подготовка данных, модуль выдачи данных по запросам внешних клиентских программ, модуль визуализации данных, модуль сверхкраткосрочного (на 4 часа вперед) прогнозирования метеорологических характеристик (метод Калмана) и базу данных измеренных метеорологических и экологических параметров АПС.

ЭО ИВС позволяет выполнять:

- синхронные измерения мгновенных и средних значений метеорологических и турбулентных параметров приземного слоя атмосферы в 4-х точках контролируемой территории на 3-х высотных уровнях и непосредственно над подстилающей поверхностью (СТИК-1, ... СТИК-4);
- синхронные измерения мгновенных и средних значений метеорологических и турбулентных параметров приземного слоя атмосферы дополнительно в 2-х произвольных точках контролируемой территории (МИК);
- измерение интенсивности, количества и структурных характеристик осадков в 2-х точках контролируемой территории (СТИК-1, МИК);
- прямые контактные измерения вертикальных профилей и градиентов метеорологических характеристик и турбулентности АПС в 2-х произвольных точках контролируемой территории (МИК);
- измерение концентрации в воздухе паров ртути и других загрязняющих газов (окиси и двуокиси углерода, окиси и двуокиси азота, двуокиси серы, аммиака, сероводорода, фенола, метана, бензола, бенз(а)пирена, метанола, хлорида водорода и пр.) в произвольной точке контролируемой территории (МИК);
- контроль γ -фона в 4-х точках (СТИК-1, ..., СТИК-4) и дополнительный контроль радиационного загрязнения воздуха в произвольной точке контролируемой территории (МИК).

В заключении представлены основные результаты работы.

1. На основе метода акустической термоанемометрии с использованием новых технических решений разработана линейка модификаций стационарных, переносных и бортовых отечественных ультразвуковых АМС типа АМК-03 гражданского (АМК-03, АМК-03/3у, АМК-03П, ЭКСМЕТЕО, АМК-03Б) и военного (1Б65Б, АМК-Б, БМК-01) назначений. УАМС обеспечивают измерение мгновенных значений основных метеорологических величин – 3D-вектора скорости ветра (в диапазоне от 0 до 50 м/с) и температуры воздуха (в диапазоне от минус 70 до плюс 55 °С) с постоянной времени до 1.25×10^{-2} с, а также атмосферного давления и влажности воздуха.
2. Созданные УАМС представляют собой программно-аппаратные комплексы и способны в режиме реального времени, без участия оператора, в условиях арктического, умеренно-холодного и тропического климата осуществлять метеорологический мониторинг приземного слоя атмосферы, а также решать специальные задачи метеорологического обеспечения военных действий. Базовые модификации УАМС внесены в Государственный реестр средств измерения РФ гражданского и военного назначения, метеокомплексы 1Б65, 1Б65Б и АМК-Б приняты на снабжение ВС РФ. Разработаны и введены технические условия, в соответствии с

которыми организовано промышленное производство УАМС. Разработанные УАМС используются в силовых структурах, на специальных государственных объектах и в научных учреждениях страны (МО РФ, МВД РФ, МЧС РФ, космодромы «Восточный» и «Байконур», Российская академия наук и др.), а также за рубежом (Северо-западный институт ядерных исследований (NINT) (Китайская народная республика), ЗАО «Завод им. Кирова» (республика Казахстан) и др.)

3. Разработаны новые автоматизированные технические средства диагностики УАМС, позволяющие проводить поверку и калибровку 3D-УТА в полевых условиях. Автоматизированная система диагностики АСКФ внедрена в состав бортового метеокомплекса военного назначения 1Б65Б.

4. На основе теневого метода с использованием новых технических решений разработаны двухканальная (ОДИО) и одноканальная (ОПТИОС) модификации оптических осадкомеров, которые обеспечивают измерение интегральных (сумма и интенсивность осадков с чувствительностью до 2×10^{-4} мм) и структурных (размеры частиц и скорость падения частиц) характеристик атмосферных осадков (дождя, снега и града). Разработана и экспериментально апробирована методика калибровки осадкомеров, опытный образец ОПТИОС подготовлен к сертификации в Росстандарте.

5. На основе использования созданных портативных АМС (электронных и ультразвуковых) и БПЛА (дронов и привязных аэростатов) разработаны новые технологии и реализующие их устройства для дистанционных контактных и бесконтактных измерений вертикальных профилей метеорологических и турбулентных характеристик АПС (до высоты 2 км с пространственным разрешением до 10 м).

6. На основе использования эффекта дистанционного оптического пробоя атмосферного воздуха, возникающего при распространении мощного лазерного излучения, разработаны новые способы и реализующее их устройство (спектроскопический лидар) для дистанционного бесконтактного определения химического состава атмосферных поллютантов и метеорологических характеристик АПС. Лидар использовался при полигонных испытаниях силовых лазерных установок специального назначения.

7. На основе метода ультразвуковой термометрии разработан и экспериментально апробирован новый способ и реализующее его устройство для детектирования излучения инфракрасного и терагерцового диапазонов, обоснована возможность применения такого фотоприемника в оптических газоанализаторах. Экспериментально определенная чувствительность измерения энергии CO_2 -лазера составляет $7 \cdot 10^{-3}$ Дж.

8. На основе метода дифференциального поглощения в УФ диапазоне с использованием новых технических решений разработаны газоанализаторы ДОГ-1М и ДОГ-4 для измерения концентрации окиси азота NO и двуокиси серы SO_2 в дымовых выбросах ТЭС. Газоанализаторы ДОГ-1М внедрены в системах АСУ ТП тепловых электростанций АО «Тюменьэнерго».

9. На основе метода СКР с использованием новых технических решений создан экспериментальный образец газоанализатора для контроля состава многокомпонентных молекулярных газовых смесей на уровне ПДК – СКР/м. Одна из модификаций СКР-газоанализатора рекомендована ФГУП «ВНИИМ им. Д.И. Менделеева».

леева к использованию для анализа компонентного состава природного газа, продуктов его технологической переработки и газовых смесей аналогичного состава.

10. На основе поперечного эффекта Зеемана созданы экспериментальные образцы анализатора концентрации паров ртути в атмосферном воздухе на уровне 30 нг/м^3 (0,1 ПДК): ДОГ-05 (в качестве источника излучения использована ртутная капиллярная изотопная лампа) и РГА/м (в качестве источника излучения – ртутная капиллярная лампа с естественным изотопным составом).

11. Разработана и введена в опытную эксплуатацию автоматизированная измерительно-вычислительная система ЭО ИВС, позволяющая осуществлять в режиме реального времени мониторинг экологических, метеорологических и турбулентных параметров АПС, а также выполнять экспериментальные исследования и натурную апробацию новых методов контроля характеристик атмосферы.

12. Разработанные измерительные приборы и комплексы, составившие инструментальную основу ЭО ИВС (АМК-03, АМК-03/3у(О), «ЭКСМЕТЕО», АМК-03Б, ОПТИОС, ПУМС-БПЛА, ПЭМС-БПЛА, РГА/м, СКР/м), обладают более высокими техническими и эксплуатационными характеристиками по сравнению с большинством зарубежных аналогов и могут заместить их в различных отраслях хозяйства и оборонного комплекса страны.

Список цитируемой литературы:

- 1С. О проведении в Российской Федерации Года экологии [Электронный ресурс] : указ Президента Рос. Федерации №7 от 5 янв. 2016 г. : (ред. от 3 сент. 2016 г.) // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2016. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=EXP;n=666371#0> (дата обращения: 01.08.2016).
- 2С. Прогноз научно-технологического развития Российской Федерации на период до 2030 года [Электронный ресурс] от 3 янв. 2014 г. № ДМ-П8-5 // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2014. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc&base=LAW&n=157978&rnd=228224.2937512341#0> (дата обращения: 01.08.2016).
- 3С. Федеральная целевая программа «Исследования и разработки по приоритетным направлениям развития научно-технологического комплекса России на 2014 – 2020 годы». (Направление «Рациональное природопользование», мероприятие 1.3. Проект «Разработка и создание измерительно-вычислительной системы для реализации технологии мезомасштабного мониторинга и прогнозирования состояния атмосферного пограничного слоя») [Электронный ресурс] от 2 мая 2013 г. № 736-р // КонсультантПлюс – надежная правовая поддержка : официальный сайт компании. – Электрон. дан. – М., 2013. – URL: <http://www.consultant.ru/cons/cgi/online.cgi?req=doc;base=LAW;n=146286#0> (дата обращения: 01.08.2016).
- 4С. Кобзев, А.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / А.А. Кобзев // Автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук.- Томск.- 2013.
- 5С. Государственный экологический мониторинг в Москве. URL: <http://www.mosecom.ru/about/mosecom> (дата обращения 10.03.2015). ГПБУ «Мосэкомониторинг» [Электронный ресурс] / Правительство Москвы, Департамент

- природопользования и охраны окружающей среды. – Электрон. дан. – М., 2001. – URL: <http://www.mosecom.ru> (дата обращения 04.09.2016 г.).
- 6С. Ипполитов, И.И. Концепция сетевого мониторинга природно-климатических процессов в Сибири / И.И. Ипполитов, М. Кабанов, С.В. Смирнов // Оптика атмосферы и океана.- 2011.- Т. 24.- № 1.- С. 7-14.
- 7С. Афиногенов, Л. П. Аппаратура для исследований приземного слоя атмосферы / Л. П. Афиногенов, С. И. Грушин, Е. И. Романов. – Л. : Гидрометеиздат, 1977. – 320 с.
- 8С. Тихомиров А. А. Ультразвуковые анемометры и термометры для измерения пульсаций скорости и температуры воздушных потоков: обзор // Оптика атмосферы и океана. – 2010. – Т. 23, № 7. – С. 585-600.
- 9С. Булдаков, М. А. Современное состояние и тенденции развития газоаналитического приборостроения для контроля промышленных выбросов в атмосферу / М. А. Булдаков, И. И. Матросов, А. А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. – 2009. – Т. 22, № 1. – С. 52-57.
- 10С. Стерлядкин, В.В. Обзор методов и средств ветрового зондирования атмосферы / В.В. Стерлядкин, А.Г. Горелик, Г.Г. Щукин // В книге: Проблемы дистанционного зондирования, распространения и дифракции радиоволн. Сер. "III Всероссийские Арmandовские чтения: молодежная школа".- Муром; 2013.- С. 24-42.

Список основных публикаций по теме диссертации в рецензируемых журналах, входящих в перечень ВАК и международные базы данных (МБД):

а) Монография:

1. Региональный мониторинг атмосферы: кол. монография / под общ. ред. М. В. Кабанова. – Томск : Спектр, 1997. – Ч. 2 : Новые приборы и методики измерений. – 295 с.
- б) Статьи в отечественных журналах из перечня ВАК:
2. Корольков, В. А. Спектрохимический лидар для анализа элементного состава атмосферного аэрозоля / А. П. Годлевский, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, Ю. В. Иванов // Журн. прикл. спектроскопии. – 1983. – Т. 39. – С. 734-740
3. Корольков, В. А. Широкополосный фотоприемник на основе фотоэлектронного умножителя / В. Н. Климов, В. А. Корольков // Приборы и техника эксперимента. – 1988. – № 2. – С. 202-203.
4. Корольков, В. А. Газоанализатор окислов азота и серы в дымовых газах теплоэлектростанций / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов // Теплофизика и аэромеханика. – 2000. – Т. 7, № 4. – С. 613-616.
5. Корольков, В. А. Оптические газоанализаторы серии "ДОГ" / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов // Оптика атмосферы и океана. – 2002. – Т. 15, № 1. – С. 87-90
6. Корольков, В.А. Автоматизированный ультразвуковой метеорологический комплекс АМК-03 / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.С. Ильичевский, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Метеорология и гидрология.-2006.-№11.-С. 89-97.
7. Корольков, В.А. Ультразвуковой комплекс АМК-03 для измерения метеорологических и турбулентных характеристик атмосферы / А.А. Азбукин, А.Я. Богушевич, В.С. Ильичевский, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Приборы и техника эксперимента.- 2006.- № 4.- С. 162-163.
8. Корольков, В.А. Оптимизация оптических параметров ИК газоанализатора окиси углерода на основе интерферометра Фабри-Перо / Азбукин А.А., Булдаков М.А. Королев Б.В. Корольков В.А., Матросов И.И. Тихомиров А.А. // Оптика атмосферы и океана.- 2006.-Т. 19.- № 11.- С. 986-990.

9. Корольков, В.А. Стационарный газоанализатор оксидов азота и серы / А.А. Азбукин, М.А. Булдаков, Б.В. Королев, В.А. Корольков, И.И. Матросов, А.А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента.- 2006.- № 6.- С. 105-109.
10. Корольков, В. А. Портативный оптический анализатор концентрации паров ртути ДОГ-05 / А.А. Азбукин, М.А. Булдаков, Б.В. Королев, В.А. Корольков, И.И. Матросов, А. А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента. – 2006. – № 6. – С. 142-143
11. Корольков, В.А. Экспедиционный метеорологический комплекс «ЭКСМЕТЕО-01» / А.А. Азбукин, А.Я. Богусевич, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Приборы и техника эксперимента.- 2008.- №3.- С. 181-182.
12. Корольков, В.А. Бортовой метеорологический комплекс на базе многоцелевых гусеничных и колесных машин / А.А. Азбукин, А.Я. Богусевич, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Вестник академии военных наук.- 2008.- № 3 (24).- С. 144-148.
13. Корольков, В.А. Полевой вариант метеорологического комплекса АМК-03 // Метеорология и гидрология / А.А. Азбукин, А.Я. Богусевич, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // 2009.- № 2.- С. 101-105.
14. Корольков, В.А. Приборное обеспечение измерения параметров атмосферных осадков. Современное состояние / Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А. // Деп. в ВИНТИ. Рег. № 802-В2009 от 16.12.09. (Аннотация в Изв.ВУЗов. Физика). 2009.- № 12.- С. 98.
15. Корольков, В.А. Коммутационный контроллер передачи метеорологических данных / Азбукин А.А., Кальчихин В.В., Кобзев А.А., Корольков В.А., Тихомиров А.А // Приборы и техника эксперимента.- 2010.- № 4.- С. 166.
16. Корольков, В.А. Термоакустический фотоприемник для дальнего ИК-диапазона / В.А. Корольков, Д.В. Петров // Изв.ВУЗов. Физика.- 2010.- № 9/3.- С. 153-154.
17. Корольков, В.А. Информационно-измерительная система для регионального мониторинга и прогноза опасных метеорологических явлений / В.Ю. Богомолов, А.Я. Богусевич, Е.П. Гордов, В.А. Корольков, В.Н. Крупчатников, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана.- 2011.- Т. 24.- № 1.- С. 52-59.
18. Корольков, В.А. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана.- 2011.- Т. 24.- № 11.- С. 990-996.
19. Корольков, В.А. Автоматические метеостанции АМК-03 и их модификации / А.А. Азбукин, А.Я. Богусевич, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров, В.Д. Шелевой // Датчики и системы. - 2012.- № 3.- С. 47-52.
20. Корольков, В.А. Газоанализатор на основе спонтанного комбинационного рассеяния света: возможности и перспективы / М.А. Булдаков, В.А. Корольков, И.И. Матросов, Д.В. Петров, А.А. Тихомиров // Датчики и системы.- 2012.- № 4.- С. 10-13.
21. Корольков В. А. Региональная информационно-измерительная система для мониторинга атмосферного приземного слоя и прогноза опасных метеорологических явлений / А.Я. Богусевич, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Геология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геоэкология.- 2012.- № 5.- С. 412-419.
22. Корольков, В.А. К выбору размеров измерительной площади двухканального оптического осадкомера / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана.- 2013.- Т. 26.- № 2.- С. 124-128.
23. Корольков, В.А. Оптико-электронный блок измерения параметров осадков / А.А. Азбукин, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Приборы и техника эксперимента.- 2013.- № 4.- С.140-141.

24. Корольков, В.А. Определение калибровочных характеристик оптико-электронного измерителя атмосферных осадков / А.А. Азбукин, В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана.- 2014.- Т. 27.- № 5.- С. 449-455.
25. Корольков, В.А. Определение микроструктурных характеристик жидких атмосферных осадков с помощью оптического осадкомера / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. - 2015.- Т. 28. -№ 7.- С. 669-672.
26. Корольков, В.А. Некоторые результаты работы территориально-распределенной измерительной метеорологической системы на основе сети постов ультразвуковых АМС / А.Я. Богушевич, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Метеорология и гидрология.- 2015.- № 10.- С. 85-95.
27. Корольков, В.А. Особенности применения оптического метода для измерения параметров атмосферных осадков / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Изв. ВУЗов. Физика.- 2015.- №8/2.- С. 169-172.
28. Корольков, В.А. Определение вида атмосферных осадков по результатам оптических измерений их микроструктурных характеристик / В.В. Кальчихин, А.А. Кобзев, В.А. Корольков, А.А. Тихомиров // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29. № 8. С. 654-657.

в) Статьи в зарубежных журналах:

29. Korolkov, V. A. Analyzing natural gas by spontaneous Raman scattering spectroscopy / M. A. Buldakov, I. I. Matrosov, V. A. Korolkov, D. V. Petrov, A. A. Tikhomirov // Journal of optical technology. – 2013. – Vol. 80, № 7. – P. 426-430
30. Korolkov, V. A. Correlation features for rows averaged values of meteorological parameters obtained from measurements in regional network of the automated ultrasonic weather stations / A. Ya. Bogushevich, A. A. Tikhomirov, V. A. Korolkov // SPIE Proceedings. – 2014. – Vol. 9292.
31. Korolkov, V. A. Calibration and preliminary tests of the optoelectronic dual channel precipitation gauge / A. A. Azbukin, V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2014. – Vol. 9292.
32. Korolkov, V. A. Specifics of the hail parameter measurements using the optical precipitation gauge / V. V. Kalchikhin, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.
33. Korolkov, V. A. Portable mercury gas analyzer with a lamp filled with natural mercury isotope mixture / A. I. Abramochkin, V. A. Korolkov, N. G. Mutnitsky, V. V. Tatur, A. A. Tikhomirov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.
34. Korolkov, V. A. Pilot project of measuring and computing system for mesoscale monitoring of atmospheric boundary layer / A. A. Tikhomirov, A. E. Telminov, A. I. Komarov, A. A. Kobzev, V. A. Korolkov // SPIE Proceedings. – 2015. – Vol. 9680.
35. Korolkov, V.A. Metrological Support of Ultrasonic Thermo-anemometers for Measurement of Pulsation Properties of Meteorological Parameters / Korolkov V.A., Telminov A.E., Tikhomirov A.A // Atmospheric and Oceanic Optics.–2016.–V.29.–No 1.– P. 96-103.

г) Статьи в сборниках:

36. Корольков, В. А. Спектрохимический лидар на неодимовом лазере / В. В. Занин, В. Н. Климов, Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, В. В. Панкратов // Аппаратура дистанционного зондирования параметров атмосферы : сб. ст. – Томск, 1987. – С. 11-17.

д) Авторские свидетельства СССР и патенты РФ, свидетельства о государственной регистрации программ для ЭВМ:

37. А. с. 960549 СССР. Устройство для дистанционного спектрохимического анализа / В. А. Корольков, В. П. Перовский, Н. П. Солдаткин. – № 3218222/18-25 ; заявл. 15.12.80 ; опубл. 23.09.82, Бюл. № 35.
38. А.с. 980518 СССР. Способ зондирования плазмы по спектрам коллективного рассеивания / Ю.Д. Копытин, В.А. Корольков.– №3270993; заявл.10.04.81;(без публикации).
39. А. с. 1294095 СССР. Способ определения параметров при лазерной диагностике плазмы / В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин. – №3715112; заявл. 23.03.84; (без публикации).
40. А. с. 1285893 СССР. Устройство для диагностики плазмы по рассеянному лазерному излучению / В. А. Корольков. – №3837008; заявл. 30.12.84 (без публикации).
41. А. с. 1382122 СССР. Устройство для регистрации спектра рассеянного плазмой зондирующего излучения при лазерной диагностике плазмы / В.А. Корольков - №4030811; заявл. 13.12.85; (без публикации).
42. А. с. 1507031 СССР. Устройство для диагностики плазмы по рассеянному лазерному излучению / В.А. Корольков. - №4331980; заявл. 25.11.87; (без публикации).
43. А. с. 1596905 СССР. Спектрохимический лидар / С. Д. Бураков, В. А. Корольков. – № 4656887; заявл. 28.02.89; (без публикации).
44. А. с. 1593397 СССР. Дифференциальный лазерный газоанализатор / А. А. Абрамовский, С. Д. Бураков, В. В. Зуев, В. А. Корольков, Н. П. Солдаткин. – №4469224; заявл. 26.07.88; (без публикации).
45. А. с. 1429706 СССР. Устройство для дистанционного спектрохимического анализа / С. Д. Бураков, В.А. Корольков.– №4128492;16.06.86; (без публикации).
46. А. с. 1427978 СССР. Устройство для измерения порога оптического пробоя / С. Д. Бураков, В. А. Корольков. – №4175101; заявл. 2.12.86; (без публикации).
47. А. с. 1434950 СССР. Устройство для спектрохимического анализа аэрозолей / Ю. Д. Копытин, В. А. Корольков, Ю. Г. Рубежный (без публикации). – №4198115; заявл. 23.02.87.
48. Свидетельство № 19169 Российская Федерация. Двухкомпонентный оптический газоанализатор : свидетельство на полезную модель / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, Б. В. Королев, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; зарегистрировано в Госреестре полезных моделей Рос. Федерации. 2001.
49. Пат. 2208224 Российская Федерация, МПК G01J 5/58. Способ измерения энергии оптического и СВЧ-излучения / В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем; Сибаналитприбор.– №2001106932/28; заявл. 14.03.2001 ; опубл. 10.07.2003, Бюл. № 19.
50. Пат. 2207546. Российская Федерация, МПК G01N 21/61. Фототермоакустический газоанализатор / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Бурков, В. В. Занин, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2001120473/28 ; заявл. 23.07.2001 ; опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18
51. Пат. 2460990 Российская Федерация, МПК G01N 21/03. Регистрирующая кювета для фототермоакустического газоанализатора / В. А. Корольков, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011113619/28 ; заявл. 07.04.2001 ; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25.

52. Пат. 2244291 Российская Федерация, МПК G01N 21/61. Двухкомпонентный оптический газоанализатор / А. А. Азбукин, М. А. Булдаков, В. В. Бурков, В. В. Занин, В. А. Корольков, И. И. Матросов ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2002133432/28 ; заявл. 10.12.2002 ; опубл. 10.01.2005, Бюл. № 1.
53. Пат. 2251096 Российская Федерация, МПК G01N 21/47. Устройство для измерения порога оптического пробоя/ В.А. Корольков; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем.– № 2003128363/28; заявл. 19.09.2003; опубл. 27.04.2005, Бюл. № 12.
54. Пат. 2319987 Российская Федерация, МПК G01W/02. Ультразвуковой термоанемометр с устройством автоматического восстановления точностных характеристик измерений / А. А. Азбукин, А. Я. Богушевич, В. С. Ильичевский, В. А. Корольков, В. Д. Шелевой ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2006119583/28 ; заявл. 05.06.2006 ; опубл. 20.03.2008, Бюл. № 8.
55. Пат. 2469281 Российская Федерация, МПК G01N 21/65 G01J 3/44. Многопроходная оптическая система возбуждения спектров КР / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011126860/28 ; заявл. 29.06.2001 ; опубл. 10.12.20012, Бюл. № 34.
56. Пат. 2469361 Российская Федерация, МПК G01W 1/04. Способ дистанционного измерения скорости ветра / В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011128469/28 ; заявл. 08.07.2011 ; опубл. 10.12.2012, Бюл. № 34.
57. Пат. 126136 Российская Федерация, МПК G01N 21/00. Анализатор состава природного газа / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Академприбор. – № 2012146674/28 ; заявл. 01.11.2012 ; опубл. 20.03.2013, Бюл. № 8.
58. Пат. 2474796 Российская Федерация, МПК G01J 3/44. Эффективная оптическая система сбора рассеянного излучения для раман-спектрометра / М. А. Булдаков, В. А. Корольков, И. И. Матросов, Д. В. Петров ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2011134129/28 ; заявл. 12.08.2011 ; опубл. 10.02.2013, Бюл. № 4.
59. Пат. 147970 Российская Федерация, МПК G01W/02. Конструкция несущей арматуры электроакустических преобразователей ультразвукового 3D-анемометра / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов ; заявитель и патентообладатель Сибаналитприбор. – № 2014133224/28 ; заявл. 12.08.2014 ; опубл. 20.11.2014, Бюл. № 32.
60. Пат. 2568993 Российская Федерация, МПК G01W 1/18. Способ поверки ультразвуковых анемометров и портативные устройства для его осуществления / В. А. Корольков, А. Е. Тельминов, В. А. Чурсин ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – № 2014134598/28 ; заявл. 22.08.2014 ; опубл. 20.11.2015, Бюл. № 32.
61. Пат. 119898 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Оптико-электронный двухканальный измеритель осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2012100082/28 ; заявл. 10.01.2012 ; опубл. 27.08.2012, Бюл. № 24.
62. Пат. 2575181 Российская Федерация, МПК G01W 1/14. Оптический способ измерения атмосферных осадков / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Ко-

рольков ; заявитель и патентообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; Сибаналитприбор. – № 2014129127/28 ; заявл. 15.07.2014 ; опубл. 20.02.2016, Бюл. № 5.

63. Свидетельство № 2010614244 Российская Федерация. Программа АМК-СОФТ-4 : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков, О. Г. Пономарев ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем. – №2010611591; заявл. 29.03.2010; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 30.06.2010.
64. Свидетельство № 2010617521 Российская федерация. Программа для коммутационного контроллера передачи метеоданных : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2010616160; заявл. 13.09.2010; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 13.11.2010.
65. Свидетельство № 2013614576 Российская Федерация. Программа первичной обработки сигналов для блока измерений оптико-электронного осадкомера : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2013612239; заявл. 21.03.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 16.05.2013.
66. Свидетельство № 2015662919 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «OPTIOScore» : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2015619986; заявл. 21.10.2015; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 07.12.2015.
67. Свидетельство № 2013660835 Российская Федерация. Программа для ЭВМ «RCScore» : свидетельство об офиц. регистрации программы для ЭВМ / А. А. Азбукин, В. В. Кальчихин, А. А. Кобзев, В. А. Корольков ; заявитель и правообладатель Ин-т мониторинга климатических и экологических систем ; №2013617501, заявл. 19.08.2013; зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 20.11.2013.