

БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

УДК 551.501.793(043.3)+551.508.951(043.3)+551.510.42(043.3)

ХОМИЧ

Василий Васильевич

**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОПТИЧЕСКИХ И МИКРОФИЗИЧЕСКИХ
ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ ПО ДАННЫМ
МНОГОЧАСТОТНОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
БЕЗ ВСПОМОГАТЕЛЬНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ**

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук
по специальности 01.04.05 – Оптика

Минск, 2019

Научная работа выполнена в **Белорусском государственном университете**.

НАУЧНЫЙ РУКОВОДИТЕЛЬ –

Лысенко Сергей Александрович,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий Центром климатических
исследований – заместитель директора по научной
работе ГНУ «Институт природопользования НАН
Беларуси».

ОФИЦИАЛЬНЫЕ ОППОНЕНТЫ:

КАТКОВСКИЙ Леонид Владимирович,
доктор физико-математических наук, доцент,
заведующий лабораторией дистанционной
фотометрии НИУ «Институт прикладных
физических проблем им. А.Н. Севченко»
Белорусского государственного университета;

ДИК Сергей Константинович,
кандидат физико-математических наук, доцент,
первый проректор
УО «Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники».

ОППОНИРУЮЩАЯ ОРГАНИЗАЦИЯ –

**ГНУ «Институт физики имени Б. И. Степанова
НАН Беларуси».**

Защита состоится **29 марта 2019 года** в **14:00** часов на заседании совета по защите диссертаций Д 02.01.17 при Белорусском государственном университете по адресу: *Минск, ул. Ленинградская 8 (корпус юридического факультета), ауд. 407.* Телефоны ученого секретаря: 209–57–09; 209–50–73; e-mail: Romanov@bsu.by.

Почтовый адрес: 220030 Минск, пр-т Независимости 4.

С диссертацией можно ознакомиться в Фундаментальной библиотеке Белорусского государственного университета.

Автореферат разослан « ____ » февраля 2019 года.

Ученый секретарь совета
по защите диссертаций
кандидат физ.-мат. наук доцент

О.Г. Романов

ВВЕДЕНИЕ

Загрязнение воздуха аэрозолем является одним из неблагоприятных факторов окружающей среды, влияющих на качество жизни и здоровье людей. Серьезную опасность для здоровья людей представляют мелкодисперсные твердые частицы (PM, Particulate Matter), способные проникать в легкие человека. В связи с этим, при оценке состояния атмосферного воздуха учитываются такие показатели, как $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ и PM_{10} , характеризующие массы частиц диаметрами до 1,0; 2,5 и 10 мкм соответственно в единичном объеме воздуха.

Необходимость регулярного слежения за содержанием мелкодисперсных частиц в различных слоях атмосферы возникает и при климатических исследованиях, поскольку эти частицы эффективно рассеивают солнечное излучение в обратном направлении, оказывая антипарниковый эффект. С другой стороны, аэрозоль влияет на процессы образования облаков и их свойства, задерживающие тепловое излучение Земли. Результирующей радиационный форсинг аэрозоля определяется его оптическими и микрофизическими параметрами.

Эффективным средством мониторинга оптических и микрофизических параметров аэрозоля, и в особенности его мелкодисперсных частиц с размером порядка длины волны видимого света, является лидар, работающий по принципу послылки в атмосферу лазерных импульсов и регистрации сигналов обратного рассеяния. Интерпретация данных лидарного зондирования атмосферы включает два этапа. На первом этапе проводится определение оптических параметров аэрозоля вдоль трассы зондирования. При независимом решении этой задачи для каждой длины волны посылаемого в атмосферу излучения возникает ряд сложностей, связанных с неопределенностью аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния (лидарного отношения) и аппаратурной функции, зависящей как от характеристик приемо-передающего тракта лидара, так и от пропускания атмосферы в пределах его теневой зоны. При многочастотном лидарном зондировании проблема выбора аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния преодолевается за счет использования регрессионных или матричных операторов, позволяющих по известным значениям аэрозольного показателя обратного рассеяния на рабочих длинах волн лидара рассчитывать аналогичные значения показателя ослабления. Однако существенно различающиеся зависимости показателей ослабления и обратного рассеяния от микрофизических параметров аэрозоля делают неоднозначным их взаимное преобразование, что в ряде случаев может нивелировать преимущества соответствующих алгоритмов оценки аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния по сравнению с использованием ее среднего значения для исследуемого типа аэрозоля.

На втором этапе обработки лидарных сигналов решается задача определения параметров микроструктуры аэрозоля при априорно заданной спектральной зависимости его комплексного показателя преломления (КПП) с использовани-

ем различных регуляризирующих алгоритмов. Известный недостаток таких алгоритмов – быстрая потеря устойчивости с увеличением погрешности измерений. При неизвестной систематической погрешности измерений, обусловленной, например, фоном многократного рассеяния, нерегулярной формой частиц, неточным заданием их КПП, возникают проблемы выбора оптимального значения параметра регуляризации и неоднозначность решения. Устранить множество равноприемлемых решений обратной задачи и необходимость ее регуляризации можно за счет использования регрессионных алгоритмов. Однако при этом можно говорить только об оценках интегральных параметров функции распределения аэрозольных частиц по размерам и ее отдельных мод.

Многочастотное лидарное зондирование позволяет, в принципе, ставить задачу по определению концентраций аэрозольных компонент напрямую из лидарных сигналов со стабилизацией гладкости решения по трассе зондирования. Однако для этого необходимы вспомогательные измерения удельных (относящихся к единичной концентрации) показателей ослабления и обратного рассеяния аэрозоля. Кроме того, при любом решении лидарного уравнения остается проблема задания калибровочных (опорных) значений, определяющих выбор единственного решения из множества возможных. Основой для получения калибровочных значений оптических параметров аэрозоля на зондируемой трассе служат результаты их независимых оценок при помощи локальных приборов. При этом для решения лидарного уравнения большое значение имеет положение опорной точки (опорного участка) на трассе зондирования (устойчивость решения возрастает с удалением опорной точки вглубь трассы).

Таким образом, можно выделить следующие актуальные проблемы, стоящие на пути метрологической аттестации лидара: 1) проблема задания калибровочных значений для определяемых профилей оптических параметров аэрозоля и нахождения константы интегрирования лидарного уравнения, зависящей не только от характеристик лидара, но и от состояния среды в пределах его теневой зоны; 2) проблема высокой чувствительности решения обратной задачи лидарного зондирования к положению опорной точки на трассе зондирования; 3) необходимость вспомогательных измерений для построения оптико-микрофизической модели аэрозоля и определения калибровочных констант и коэффициентов связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля, доопределяющих обратную задачу.

Все это обуславливает важность задач, решаемых в диссертационной работе, направленных на создание новых методов обработки данных многочастотного лидарного зондирования аэрозоля вдоль горизонтальных (в целях экологического мониторинга) и вертикальных (для климатических исследований) трассах в атмосфере без привлечения вспомогательных средств измерений для доопределения обратной задачи и задания ее граничных условий.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Связь работы с научными программами (проектами), темами

Тема диссертации соответствует пункту 10 «Экология и природопользование» перечня приоритетных направлений научных исследований Республики Беларусь на 2016–2020 годы, утвержденного Постановлением Совета Министров Республики Беларусь № 190 от 12.03.2015.

Полученные в работе результаты использовались при выполнении следующих научно-исследовательских работ: «Разработка методов и систем лазерной локации, локального контроля неоднородных аэродисперсных сред на основе корреляционной спектрофелометрии» ГКПНИ «Электроника и фотоника» (шифр 2.1.07.1), 2011–2015 гг.; «Разработка методологического и алгоритмического обеспечения проведения видеоспектральных и мультиспектральных измерений и тематического анализа аэрокосмических данных, эксплуатационно-устойчивых методов и систем лазерной локации, локального контроля неоднородных аэродисперсных и газовых сред, а также элементов конструкции датчика звездного неба» ГПНИ «Фотоника, опто- и микроэлектроника», подпрограмма «Фотоника» (шифр 1.4.03.1), 2011–2015 гг. (№ госрег. 20162089); «Разработка комплекса методов оперативного мониторинга загрязненности воздуха респирабельными твердыми частицами с разделением на фракции PM_{10} , PM_2 и PM_{10} », выполняемой по договору с Фондом фундаментальных исследований РБ № Ф15М-044, 2015–2017 гг.; «Оценка влияния урбанизации и мелиорации на климатические, водные, земельные и лесные ресурсы Беларуси» ГПНИ «Природопользование и экология» (шифр 1.06), 2016–2020 гг. (№ госрег. 20160128).

Цель и задачи исследования

Целью настоящей работы является разработка методов определения оптических и микрофизических параметров аэрозоля на горизонтальных и вертикальных трассах в атмосфере по данным многочастотного лидарного зондирования без вспомогательных измерений.

Достижение цели исследования осуществлялось решением следующих **задач**:

- разработать методы определения опорных значений оптических параметров аэрозоля для решения обратной задачи многочастотного лидарного зондирования;
- разработать алгоритм определения пространственных распределений концентраций респирабельных фракций аэрозоля в атмосфере по данным лидарного зондирования, устойчивый к положению опорной точки на трассе зондирования;
- разработать и верифицировать алгоритм определения высотных распределений оптических и микрофизических параметров аэрозоля из лидарных сиг-

налов упругого и комбинационного обратного рассеяния атмосферой без использования вспомогательных измерений.

Объектом исследований являлся многокомпонентный атмосферный аэрозоль.

Предметом исследований являлись оптические и микрофизические параметры аэрозоля, а также их связи с лидарными сигналами.

Научная новизна

Научная новизна результатов диссертационной работы состоит в следующем:

– показано, что учет статистических взаимосвязей между показателями аэрозольного ослабления при решении обратной задачи многочастотного лидарного зондирования позволяет выделять однородные участки на зондируемой трассе, а также участки со схожими пространственными профилями показателя ослабления, которые можно использовать для калибровки лидара;

– показано, что при использовании коэффициентов разложения спектра аэрозольного ослабления по эмпирическим ортогональным функциям в качестве неизвестных в уравнениях для спектрально-временных отсчетов лидарного сигнала достигается устойчивость решения к положению опорной точки на трассе зондирования;

– выделены типы пространственных распределений аэрозоля и разработаны соответствующие им алгоритмы обработки лидарных сигналов, позволяющие определять оптические и микрофизические параметры аэрозоля без вспомогательных измерений.

Основные положения диссертации, выносимые на защиту

1. Установленные соотношения между показателями аэрозольного ослабления в видимом и ближнем ИК диапазонах спектра позволяют обнаруживать однородные участки трассы зондирования, а также участки со схожими пространственными профилями показателя ослабления, необходимые для калибровки лидара, по спектрально-временной структуре его сигнала.

2. Разложение спектра аэрозольного ослабления по эмпирическим ортогональным функциям в системе уравнений для спектрально-временных отсчетов лидарного сигнала обеспечивает устойчивость ее решения к положению опорной точки на трассе зондирования.

3. Разработанный алгоритм обработки лидарных сигналов позволяет определять высотные профили оптических параметров аэрозоля и объемной концентрации его мелкодисперсной фракции без вспомогательных измерений для установления калибровочных констант и коэффициентов связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля.

Личный вклад соискателя ученой степени

Все основные результаты, изложенные в диссертации, получены автором самостоятельно. В публикациях с соавторами вклад соискателя определяется рамками излагаемых в диссертации результатов. Научному руководителю принадлежат предметные постановки задач и выбор направлений исследования. Доктор физ.-мат. наук М.М. Кугейко также принимал активное участие в выборе направлений исследования и обсуждении полученных результатов.

Апробация диссертации и информация об использовании её результатов

Результаты работы докладывались на: VIII Международной научно-технической конференции «Медэлектроника–2014: Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии» (Минск, 2014 г.); XXII Международной научно-технической конференции «Лазерно-информационные технологии в медицине, биологии, геоэкологии и транспорте» (Новороссийск, 2014 г.); Международной конференции «Аэрозоль и оптика атмосферы (к столетию Г.В. Розенберга)» (Москва, 2014 г.); V Конгрессе физиков Беларуси (Минск, 2015 г.); X Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2015 г.); III Международной научно-практической конференции «Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния» (Минск, 2015 г.); VII Международной школе-конференции молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики» (Минск, 2016 г.); XI Международной научно-технической конференции «Квантовая электроника» (Минск, 2017 г.).

По материалам диссертации получен Евразийский патент на изобретение.

Опубликованность результатов диссертации

Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах: из них в научных изданиях в соответствии с п. 18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь – 6 статей (общим объемом 5 авторских листа); 8 статей в сборниках материалов научных конференций; 2 тезиса.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из перечня условных обозначений и сокращений, введения, общей характеристики работы, четырех глав, заключения и библиографического списка. Полный объем диссертации составляет 106 страниц. Диссертация содержит 16 рисунков на 15 страницах, 14 таблиц на 12 страницах. Библиографический список содержит 127 наименований, включая собственные публикации соискателя ученой степени.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Глава 1 содержит аналитический обзор литературы по теме диссертации, на основе которого формулируются цель работы и решаемые задачи. Рассмотрены основные методы и приборы локального контроля загрязнения воздуха твердыми частицами, лидарные методы определения массовых концентраций респирабельных фракций аэрозоля на горизонтальных трассах, а также методы лидарного зондирования аэрозолей на вертикальных трассах.

Связь лидарных эхо-сигналов $P(\lambda_i, r)$ с оптическими параметрами (ОП) атмосферы в приближении однократного рассеяния описывается уравнением лазерной локации:

$$P(\lambda_i, r) = A(\lambda_i) r^{-2} \left[\beta_{\pi, a}(\lambda_i, r) + \beta_{\pi, m}(\lambda_i, r) \right] \exp \left\{ -2 \int_0^r [\varepsilon_a(\lambda_i, x) + \varepsilon_m(\lambda_i, x)] dx \right\}, \quad (1)$$

где r – пространственная координата; A – аппаратная постоянная на рабочих длинах волн лидара λ_i ($i = 1, \dots, N_\lambda$); ε_a и $\beta_{\pi, a}$ – показатели аэрозольного ослабления и обратного рассеяния; ε_m и $\beta_{\pi, m}$ – аналогичные показатели для молекул воздуха.

Нахождение единственного решения лидарного уравнения из множества возможных предполагает задание калибровочного (опорного) значения для профиля аэрозольного показателя ослабления или показателя обратного рассеяния. Для определения концентрации частиц по их показателям ослабления или обратного рассеяния также необходима априорная информация о комплексном показателе преломления (КПП) частиц и их распределении по размерам. С целью получения такой информации проводятся независимые измерения оптических и микрофизических параметров (МФП) аэрозоля в локальном объеме воздуха вблизи трассы распространения луча лидара при помощи нефелометров, оптических счетчиков частиц и др. При лидарном зондировании вертикальных трасс в атмосфере априорную информацию об оптической толщине, МФП в столбе атмосферы и их связи с ОП получают на основе анализа данных сканирующих солнечных фотометров. В последние годы интенсивно развиваются алгоритмы одновременной обработки данных многоволнового лидара и солнечного фотометра, позволяющие определять высотные распределения объемных концентраций мелкодисперсной и грубодисперсной фракций аэрозоля путем их численного подбора под данные комплексных измерений с регуляризацией решения. Однако при этом возникают практические трудности оптимального выбора большого количества параметров регуляризации, существенно влияющих на точность решения обратной задачи и вид искомым профилей.

В главе 2 исследованы информационные возможности современных и перспективных лидарных систем для дистанционного зондирования взвешенных в воздухе частиц. В качестве параметров, характеризующих загрязнение

воздуха, рассматриваются массовые концентрации частиц (PM) с размерами ≤ 1 мкм, $\leq 2,5$ мкм и ≤ 10 мкм. В качестве ОП аэрозоля, получаемого по данным лазерного зондирования, – аэрозольный показатель ослабления $\varepsilon_a(\lambda)$ на длинах волн Nd:YAG³⁺-лазера (0,355; 0,532; 1,064 мкм) и в области $\lambda \geq 1,5$ –2,13 мкм, информативной относительно концентрации крупных частиц. Обратная задача аэрозольного светорассеяния решается на основе множественных регрессий между ОП и интегральными МФП аэрозоля. Регрессии получены в рамках модели городского аэрозоля Всемирной метеорологической организации на основе расчетов $\varepsilon_a(\lambda)$ при широких вариациях КПП, объемных концентраций частиц аэрозольных компонентов и параметров их распределения по размерам. Коэффициенты связей между $\varepsilon_a(\lambda)$ и PM, рассчитанные в рамках оптико-микрофизической модели аэрозоля, хорошо согласуются с экспериментальными данными из литературных источников, полученными как для сельской местности, так и для регионов с высоким содержанием антропогенных частиц.

Проведено сравнение регрессионного метода решения обратной задачи с численным методом, использующим параметризацию распределения частиц по размерам и регуляризацию решения. Показано, что при измерении $\varepsilon_a(\lambda)$ в рабочем диапазоне λ современных лидаров (0,355–1,5 мкм) невозможно с достаточной степенью точности восстанавливать сложные трехмодальные распределения частиц городского аэрозоля, включающего сажевую, водорастворимую и пылевую фракции. Это связано с неоднозначностью решения обратной задачи, которая не может быть уменьшена алгоритмически. В этом случае можно восстанавливать только интегральные параметры распределения частиц по размерам, к которым, в частности, относятся и объемные концентрации респирабельных фракций аэрозоля.

Погрешности определения PM по формулам регрессии оценивались на тестовом ансамбле смоделированных спектральных показателей $\varepsilon_a(\lambda)$ при внесении в них случайных «возмущений» в пределах 1–10 %. Показано, что дополнительное измерение аэрозольного показателя ослабления на длине волны 2,13 мкм из окна прозрачности атмосферы позволяет практически в 2 раза повысить точность определения PM₁₀ в сравнении с трехчастотным зондированием на основе Nd:YAG³⁺-лазера. Средние по ансамблю погрешности восстановления PM: $\delta PM_{1,0} = 7$ –10 %, $\delta PM_{2,5} = 13$ % и $\delta PM_{10} = 7$ –8 %. Численный метод решения обратной задачи уступает по точности регрессионному методу примерно в два раза.

В главе 3 описывается и исследуется разработанный алгоритм определения пространственных распределений PM по данным многочастотного лидарного зондирования, а также методы определения калибровочных значений, основанные исключительно на анализе спектрально-временной структуры регистрируемого сигнала и установленных соотношений между показателями аэро-

зольного ослабления, применимые для городского воздуха.

Для решения системы лидарных уравнений (1), во-первых, предполагается постоянство аэрозольной индикатрисы обратного рассеяния $g_{\pi,a}(\lambda_i) = \beta_{\pi,a}(\lambda_i)/\varepsilon_a(\lambda_i)$ на трассе зондирования. Во-вторых, используется разложение спектра аэрозольного ослабления по эмпирическим ортогональным функциям, в качестве которых был взят собственный базис его ковариационной матрицы:

$$\ln \varepsilon_a(\lambda_i, r) = \overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r) \psi_k(\lambda_i), \quad (2)$$

где $\overline{\ln \varepsilon_a}$ – среднестатистическое значение логарифма аэрозольного показателя ослабления; ψ_k – собственные векторы ковариационной матрицы $\varepsilon_a(\lambda_i)$ из N_λ компонент; K – размерность базиса из векторов ψ_k ; $h_k(r)$ – линейно-независимые компоненты; $k = 1, \dots, K$. Статистические характеристики спектра аэрозольного ослабления $\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)}$ и $\psi_k(\lambda_i)$ можно получить на основе численных расчетов $\varepsilon_a(\lambda_i)$ при большом количестве случайных реализаций МФП.

С учетом сделанных допущений систему уравнений (1) при их спектральной и пространственной дискретизации представим в следующем виде:

$$\begin{aligned} L_{ij} = \ln[P(\lambda_i, r_j) r_j^2] = \ln A(\lambda_i) + \\ + \ln \left[\beta_{\pi,m}(\lambda_i, r_j) + g_{\pi,a}(\lambda_i) \exp \left(\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_j) \psi_k(\lambda_i) \right) \right] - \\ - 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \left[\varepsilon_m(\lambda_i, r_l) + \exp \left(\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \end{aligned} \quad (3)$$

где ω_l – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования. Система уравнений (3) содержит $N_r K + 2N_\lambda$ неизвестных величин: N_λ калибровочных констант $A(\lambda_i)$, N_λ индикатрис обратного рассеяния $g_{\pi,a}(\lambda_i)$ и KN_r параметров $h_k(r_l)$. Поскольку параметры h_k , будучи проекциями спектра $\varepsilon_a(\lambda_i)$ на ортогональный базис, являются линейно независимыми величинами и $K < N_\lambda \ll N_r$, то рассматриваемая обратная задача значительно лучше обусловлена, чем задача определения профилей $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ из сигналов (1). Для нахождения единственного решения системы уравнений (3) ее необходимо доопределить граничными условиями в виде опорных значений $\varepsilon_a(\lambda_i)$ на некотором участке трассы зондирования. С учетом используемой параметризации спектра $\varepsilon_a(\lambda)$ будем искать решение системы уравнений (3), подчиняющееся следующим граничным условиям:

$$\tau_{a,i} = \sum_{l=j_1}^{j_2} \omega_l \left[\exp \left(\overline{\ln \varepsilon_a(\lambda_i)} + \sum_{k=1}^K h_k(r_l) \psi_k(\lambda_i) \right) \right], \quad (4)$$

где $\tau_{a,i}$ – значения аэрозольной оптической толщины участка трассы зондирования $[r_{j_1}, r_{j_2}]$ на длинах волн лидара.

Решение переопределенной системы (количество уравнений превышает количества неизвестных) нелинейных уравнений (3), (4) включает их линеаризацию, приведение системы к нормальному виду (с квадратной матрицей) и уточнение решения по итерационной формуле:

$$\mathbf{x}^{(n+1)} = \mathbf{x}^{(n)} + \left[\mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{K}(\mathbf{x}^{(n)}) \right]^{-1} \mathbf{K}^T(\mathbf{x}^{(n)}) \mathbf{F}(\mathbf{x}^{(n)}), \quad (5)$$

где n – номер итерации,

$$\mathbf{x} = (h_1(r_1), \dots, h_1(r_{N_r}), \dots, h_K(r_1), \dots, h_K(r_{N_r}), g_{\pi,a}(\lambda_1), \dots, g_{\pi,a}(\lambda_{N_\lambda}), \ln A(\lambda_1), \dots, \ln A(\lambda_{N_\lambda}))^T$$

– вектор неизвестных; \mathbf{F} – вектор невязки между левыми и правыми частями уравнений (3) и (4); \mathbf{K} – матрица из частных производных от L_{ij} и $\tau_{a,i}$ по аргументам $h_k(r_l)$, $g_{\pi,a}(\lambda_i)$ и $\ln A(\lambda_i)$. Система линейных уравнений с сильно разреженной матрицей большой размерности решается на каждой итерации методом бисопряженных градиентов. Итерационный процесс завершается, когда невязка выходит на стационарное значение.

Используемый численный алгоритм интерпретации лидарных сигналов основан не на последовательном пересчете определяемых параметра аэрозоля от точки к точке трассы зондирования, а на одновременной обработке всего его пространственного профиля под спектрально-временные отсчеты сигнала. Данное обстоятельство обеспечивает устойчивость решения к положению опорной точки, и, таким образом, исключает последовательное накопление погрешности, присущее аналитическим методам решения лидарного уравнения, особенно в тех случаях, когда опорный участок трассы располагается в ее начале.

Разработаны методы определения калибровочных значений для обратной задачи многочастотного лидарного зондирования, не требующие привлечения дополнительных измерений для тех трасс зондирования, которые включают однородный участок или два неоднородных участка со схожим пространственным ходом $\varepsilon_a(\lambda)$. Поиск таких участков на трассе зондирования основан на анализе спектрально-временной структуры лидарного сигнала и учете установленных статистических соотношений между $\varepsilon(\lambda_i)$, выраженных в форме множественной регрессии. Данные соотношения, позволяют в пределах погрешности измерений представить аэрозольный показатель ослабления на одной длине волны в виде линейной комбинации аналогичных показателей для других длин волн.

Первый метод сводит задачу выделения однородного участка на зондируемой трассе к задаче поиска минимума функционала, в котором первое слагаемое представляет собой среднеквадратичное отклонение логарифмов сигналов на рабочих длинах волн лидара λ_i относительно линейных зависимостей, справедливых для однородного участка трассы, а второе характеризует соответствие показателей $\varepsilon(\lambda_i)$, найденных по скорости убывания соответствующих им сигналов на анализируемом участке, установленным соотношениям.

Второй метод основан на определении оптической толщины протяженного

неоднородного участка трассы, расположенного между двумя участками с близкими ОП. Анализируемой величиной в данном методе является эхо-сигнал от точек трассы $r \in [r_1, r_2]$, нормированный на интегральный сигнал $I(r_1, r_2)$ от всего участка $[r_1, r_2]$, который зависит лишь от профиля показателя ослабления $\varepsilon(r)$ на этом участке. О близости профилей $\varepsilon(r)$ на участках $[r_1, r_2]$ и $[r_3, r_4]$ можно судить по соответствующим им нормированным сигналам, а оптическую толщину участка $[r_1, r_3] - \tau(r_1, r_3)$, необходимую для калибровки лидара, определять на основе отношения сигналов $I(r_1, r_2)$ и $I(r_3, r_4)$. Для повышения достоверности оценок $\tau(r_1, r_3)$ также используются вышеотмеченные соотношения между спектральными показателями аэрозольного ослабления.

Разработанный алгоритм решения лидарного уравнения и методы определения граничных условий исследованы в численных экспериментах. Профили МФП модельной среды задавались в виде гладких функций, медленно изменяющихся вдоль трассы зондирования относительно своих средних значений в пределах $\pm 5\%$ для параметров распределения частиц по размерам (модального радиуса, ширины распределения) и $\pm 50\%$ для объемных концентраций сажевых, водорастворимых и пылевых частиц. Профили ОП среды рассчитывались на $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064$ и $1,5$ мкм по формулам теории Ми. В соответствующие им сигналы (1) искусственно вносились случайные возмущения с эквивалентными им отношениями сигнал/шум в конце трассы зондирования 50, 33, 17 и 12 для $\lambda = 0,355; 0,532; 1,064$ и $1,5$ мкм соответственно. Полученные сигналы анализировались на предмет наличия на трассе зондирования двух участков с одинаковыми ОП и по формулам (3)–(5) обращались в профили параметров h_k , описывающих спектральный ход ε_a . Профили $h_k(r)$ пересчитываются в искомые пространственные распределения РМ по полученным ранее регрессионным соотношениям. Фактические и определенные профили РМ модельной аэродисперсной среды приведены на рисунке 1.

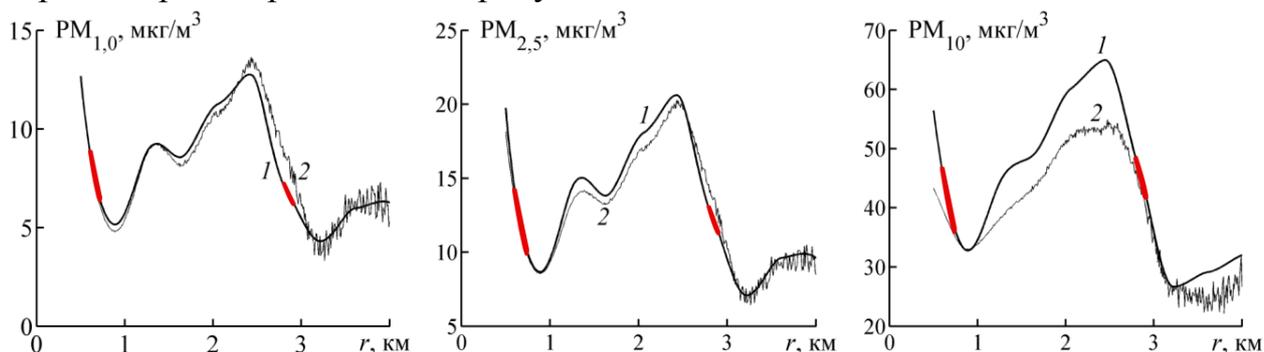
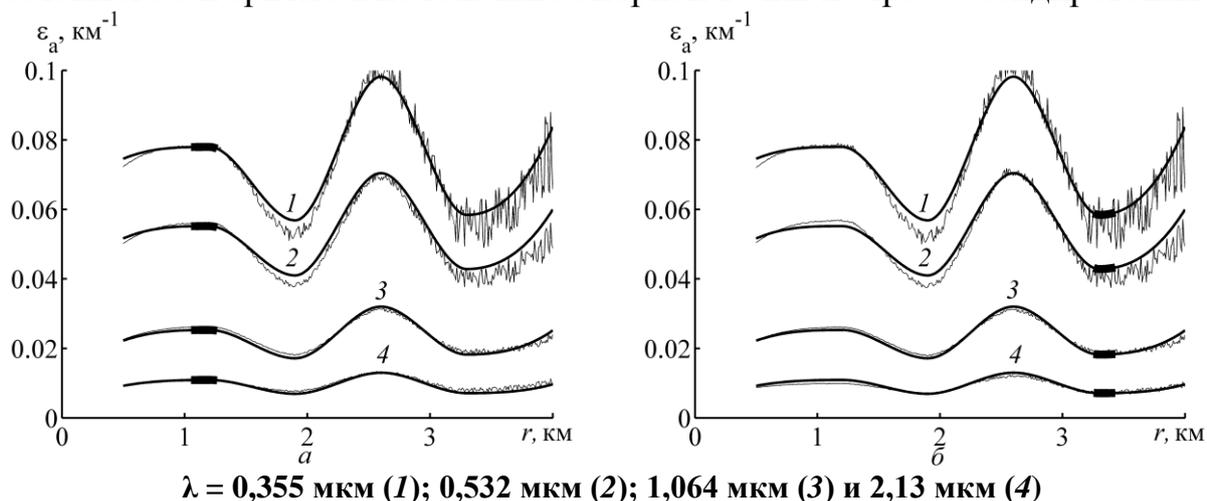


Рисунок 1. – Сопоставление фактических (1) и определенных из лидарных сигналов (2) пространственных распределений концентраций аэрозольных частиц с размерами $\leq 1,0$, $\leq 2,5$ и ≤ 10 мкм

Участки трассы $[r_1, r_2]$ и $[r_3, r_4]$ со схожими ОП выделены на профилях жирными линиями. Для рассматриваемой трассы зондирования средние погрешности определения $PM_{1,0}$, $PM_{2,5}$ и PM_{10} составляют 7 %, 5 % и 10 % соот-

ветственно.

На рисунке 2, *а* приведен пример нахождения однородного участка на трассе зондирования с использованием установленных соотношений между $\varepsilon(\lambda_i)$ на $\lambda = 0,355$; $0,532$; $1,064$ и $2,13$ мкм, а также результат определения пространственных профилей $\varepsilon(\lambda_i)$ разработанным алгоритмом. Результатом поиска участка трассы с наименьшей степенью неоднородности является участок $r = [1,05 \text{ км}; 1,26 \text{ км}]$ (на профилях $\varepsilon_a(\lambda_i, r)$ выделен жирными линиями (см. рисунок 2, *а*)). Погрешности определения средних значений $\varepsilon_a(\lambda_i)$ на этом участке составляют 2,9 %, 7,6 %, 11,4 % и 2,7 % для λ_1 , λ_2 , λ_3 , и λ_4 соответственно. На рисунке 2, *б* приведен результат определения профиля аэрозольного ослабления при априорно задаваемом опорном участке в конце трассы $r = [3,2 \text{ км}; 3,4 \text{ км}]$. Сопоставление результатов определения ОП аэрозоля при задании калибровочных значений в начале и в конце трассы свидетельствует об устойчивости разработанного алгоритма к положению опорной точки на трассе зондирования.



$\lambda = 0,355$ мкм (1); $0,532$ мкм (2); $1,064$ мкм (3) и $2,13$ мкм (4)

Рисунок 2. – Сопоставление фактических (толстые линии) и определенных из лидарных сигналов (тонкие линии) пространственных распределений $\varepsilon_a(\lambda_i)$ при расположении опорного участка в начале (*а*) и в конце (*б*) трассы зондирования

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет с приемлемой для практики точностью определять профили концентраций всех респираторных фракций и ОП аэрозоля без дополнительных измерений на трассе зондирования.

В главе 4 исследуется возможность определения высотных профилей оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля по сигналам упругого и комбинационного обратного рассеяния без использования дополнительных измерительных данных для определения калибровочных констант лидарного уравнения и коэффициентов связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля. Предлагается новый алгоритм обращения лидарных сигналов, позволяющий определять профиль объемной концентрации мелкодисперсных частиц, а также профили аэрозольных показателей ослабления и обратного рассеяния для трасс зондирования, в пределах которых все па-

параметры микроструктуры аэрозоля (КПП – $n - i\chi$, средние радиусы x_v и средне-квадратические отклонения σ_v радиусов частиц мелко- ($v = 1$) и грубодисперсной ($v = 2$) фракций аэрозоля), за исключением объемных концентрации его фракций, постоянны.

Лидарные уравнения для длин волн упругого (λ_0) рассеяния с учетом используемых предположений об исследуемой среде можно представить в следующем виде:

$$L(\lambda_0, r_j) = \ln \left[P(\lambda_0, r_j) r_j^2 \right] =$$

$$= \ln K_0 + \ln \left[\beta_{\pi, m}(\lambda_0, r_j) + \sum_{v=1}^2 C_v(r_j) \Omega_{\pi, v}(\lambda_0, x_v, \sigma_v, n, \chi) \right] -$$

$$- 2 \sum_{l=1}^j \omega_l \varepsilon_m(\lambda_0, r_l) - 2 \sum_{v=1}^2 \Omega_{\text{ext}, v}(\lambda_0, x_v, \sigma_v, n, \chi) \sum_{l=1}^j \omega_l C_v(r_l), \quad (6)$$

где ω_l – коэффициенты квадратурной формулы численного интегрирования, $j = 1, \dots, N_r$, N_r – количество отсчетов сигнала на исследуемом участке трассы, $\Omega_{\text{ext}, v}$ и $\Omega_{\pi, v}$ – полидисперсные коэффициенты ослабления и обратного рассеяния частиц фракции v , приведенные к ее единичной объемной концентрации C_v .

Система уравнений (6) при $N_\lambda \geq 3$ является переопределенной, что позволяет включить калибровочные константы лидара в число параметров, определяемых из решения обратной задачи. Ее решение выполняется путем итерационного подбора модельных параметров, обеспечивающих наилучшее соответствие расчетных лидарных сигналов экспериментальным данным. Для того чтобы избежать расходимости решения и ускорить его сходимость используется численный алгоритм, минимизирующий следующую целевую функцию:

$$J(\mathbf{p}) = (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p}))^T \mathbf{S}_L^{-1} (\mathbf{L}_{\text{exp}} - \mathbf{f}(\mathbf{p})) + \alpha (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0)^T \mathbf{S}_p^{-1} (\mathbf{p} - \mathbf{p}_0), \quad (7)$$

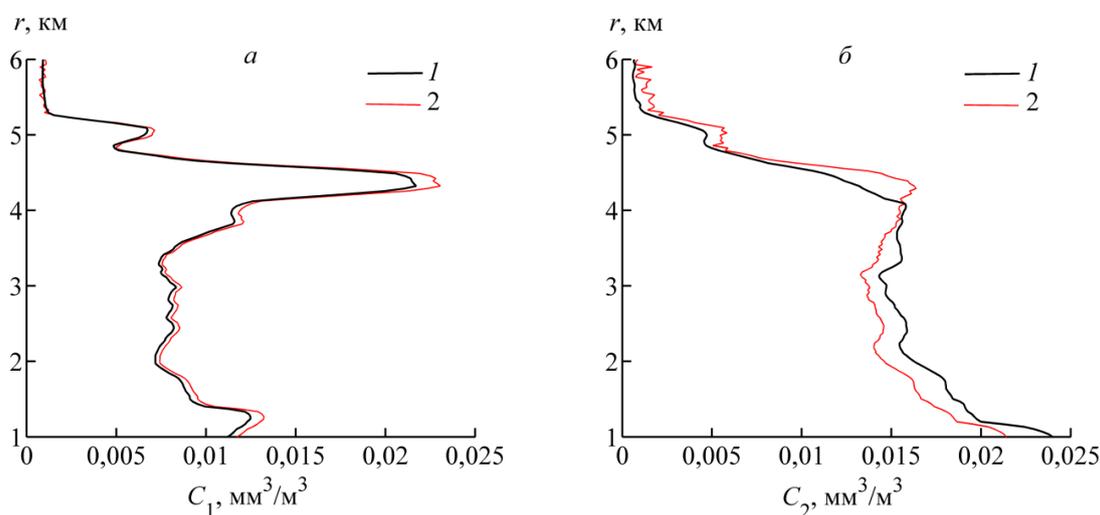
где $\mathbf{p} = (\ln K_0, \ln K_R, C_1(r_1), \dots, C_1(r_{N_r}), C_2(r_1), \dots, C_2(r_{N_r}), x_1, \sigma_1, x_2, \sigma_2, n, \chi)^T$ – вектор искомых параметров, \mathbf{p}_0 – начальное приближение, \mathbf{L}_{exp} – вектор, составленный из спектрально-пространственных отсчетов экспериментальных сигналов, $\mathbf{f}(\mathbf{p})$ – прямая модель задачи, основанная на формуле (6), и интегральных соотношениях для $\Omega_{\text{ext}, v}$ и $\Omega_{\pi, v}$, \mathbf{S}_L – ковариационная матрица погрешностей измерения $L(\lambda_{0(R)}, r_j)$, \mathbf{S}_p – ковариационная матрица вектора \mathbf{p} , α – параметр регуляризации, изменяющийся на итерациях в зависимости от невязки решения.

Рассмотрение особенностей предлагаемого алгоритма проведено на примере лидарной системы с Nd:YAG³⁺-лазером в качестве источника излучения, измеряющей сигналы упругого обратного рассеяния аэрозолем и молекулами воздуха на $\lambda_0 = 0,355; 0,532; 1,064$ мкм.

КПП и параметры спектра размеров (x_v, σ_v) частиц моделируемой среды брались из базы данных AERONET для Минска и полагались неизменными по высоте. Высотные распределения объемных концентраций мелкодисперсной

$C_1(r)$ и грубодисперсной $C_2(r)$ фракций аэрозоля соответствовали результатам их измерений в Европейской лидарной сети EARLINET.

Фактические и определенные профили объемных концентраций мелко- и грубодисперсной фракций аэрозоля для одной из реализаций параметров среды сопоставлены на рисунке 3. Средняя по высоте погрешность определения C_1 из данных трехволнового лидарного зондирования составляет 5,4 %. При любых других МФП аэрозоля, зафиксированных на станции AERONET в Минске, аналогичные погрешности также не превышают единиц процентов. Аналогичные результаты для объемных концентраций грубодисперсных частиц аэрозоля C_2 значительно хуже: в рассматриваемом случае (см. рисунок 3, б) средняя по высоте погрешность определения C_2 из сигналов упругого рассеяния составляет 20,6 %. При других МФП аэрозоля эта погрешность может достигать 70 %, что связано со слабым влиянием грубодисперсных частиц аэрозоля на лидарные сигналы в рассматриваемом диапазоне λ .



1 и 2 – фактические и определенные профили

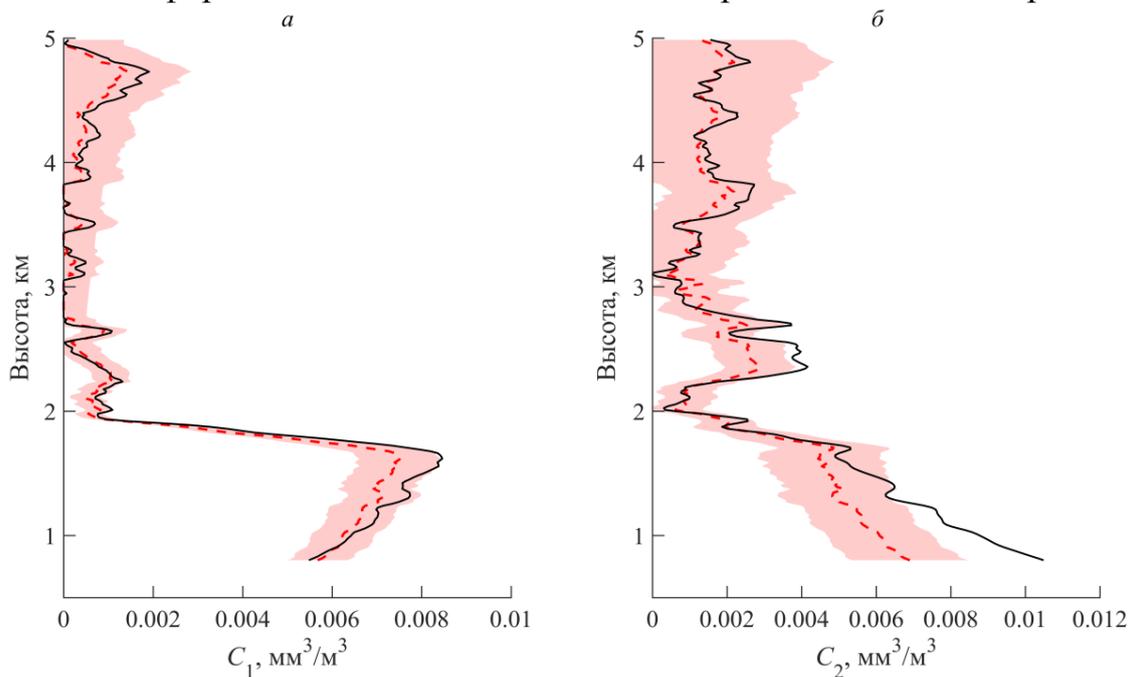
Рисунок 3. – Результаты определения высотных профилей объемных концентраций мелкодисперсной (а) и грубодисперсной (б) фракции аэрозоля из сигналов упругого обратного рассеяния моделируемой среды

Разработанный алгоритм решения обратной задачи многочастотного лидарного зондирования позволяет также получать оценки параметров распределения мелкодисперсных аэрозольных частиц по размерам, а при совместной обработке сигналов упругого и комбинационного обратного рассеяния атмосферным азотом ($\lambda_R = 0,387; 0,607$ мкм) – еще и КПП аэрозольного вещества. При известных МФП аэрозоля на трассе зондирования его оптические параметры могут быть рассчитаны известными методами решения задачи рассеяния света частицами.

Верификация разработанного алгоритма выполнена на данных лидара Института физики НАН Беларуси. Полученные результаты сопоставлены с результатами независимой обработки лидарных сигналов с привлечением дополнительных средств контроля параметров аэрозоля. В качестве опорных данных

использовались результаты комплексного эксперимента по лидарному и радиометрическому зондированию аэрозоля. В дневное время суток при отсутствии облаков на небосводе такие измерения дополняют друг друга в информационном содержании и позволяют получать достаточно надежные оценки оптических и микрофизических параметров аэрозоля, прямые измерения которых требуют локальных заборов проб воздуха и трудно реализуемы во временных масштабах лидарного зондирования.

Профили МФП аэрозоля, определенные из лидарных сигналов разработанным алгоритмом и с привлечением радиометрических данных, сопоставлены на рисунке 4. Видно, что профиль объемной концентрации мелкодисперсных частиц, полученный разработанным алгоритмом, хорошо согласуется с результатами его независимого определения на основе комплексной обработки данных лидара и радиометра: среднеквадратическое отклонение между профилями $C_1(r) \sim 4 \times 10^{-4} \text{ мм}^3/\text{м}^3$ и находится в пределах апостериорной погрешности определения $C_1(r)$. Различия между профилями $C_1(r)$ более существенны, однако согласуются с информационными возможностями предложенного алгоритма.



Закрашенные области соответствуют теоретическим оценкам апостериорной неопределенности определенных профилей

Рисунок 4. – Профили объемных концентраций мелкодисперсной C_1 (а) и грубодисперсной C_2 (б) фракции аэрозоля, определенные из лидарных сигналов с привлечением (сплошные линии) и без привлечения (штриховые) вспомогательных радиометрических данных

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основные научные результаты диссертации

1. Показано, что при учете статистических взаимосвязей между спектральными показателями аэрозольного ослабления на длинах волн лидара, опорные значения, необходимые для калибровки лидара, можно определять только на основе анализа спектрально-временной структуры сигнала обратного рассеяния атмосферы без дополнительных измерений оптических параметров аэрозоля на трассе зондирования. На этой основе разработаны методы выделения однородного участка на трассе зондирования и участков со схожими пространственными профилями показателя аэрозольного ослабления [1, 4, 8, 9, 11, 12, 14].

2. Показано, что при разложении спектра аэрозольного ослабления в системе уравнений для спектрально-временных отсчетов лидарного сигнала по эмпирическим ортогональным функциям обеспечивается устойчивость ее решения к положению опорной точки на трассе зондирования. Разработан алгоритм определения оптических параметров и концентраций респираторных фракций аэрозоля в городском воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования. Разработанный алгоритм основан на решении системы лидарных уравнений относительно линейно-независимых параметров [2, 3, 7, 15, 16] спектра аэрозольного ослабления в точках трассы зондирования и пересчете их в профили искомых оптических и микрофизических параметров [4, 9, 11, 14].

3. Разработан алгоритм определения высотного профиля оптических параметров и объемной концентрации мелкодисперсной фракции аэрозоля из лидарных сигналов, исключающий необходимость дополнительного установления калибровочных констант и коэффициентов связи между оптическими и микрофизическими параметрами аэрозоля.

В численных экспериментах показано, что разработанный алгоритм позволяет с погрешностями в единицы процентов определять высотный профиль объемной концентрации мелкодисперсных частиц аэрозоля и параметры их распределения по размерам из лидарных сигналов на длинах волн Nd:YAG³⁺-лазера, а с привлечением каналов регистрации комбинационного рассеяния атмосферным азотом – еще и КПП аэрозольного вещества. Показано, что получаемой информации достаточно для расчетов оптических параметров аэрозоля, влияющих на перенос солнечного излучения в атмосфере. Апробация разработанного алгоритма на экспериментальных лидарных сигналах и сопоставлении полученных результатов с независимыми оценками микрофизических параметров аэрозоля, полученными по данным комплексного лидарно-радиометрического эксперимента, подтверждают сделанные теоретически выводы [5, 6, 10, 13, 14].

Рекомендации по практическому использованию результатов

Полученные результаты позволяют решать важную практическую задачу – выполнять измерения концентраций всех аэрозольных фракций, используемых в международных стандартах по качеству атмосферного воздуха в качестве индикаторов загрязненности воздуха взвешенными частицами.

Результаты работы могут использоваться санитарно-гигиеническими службами для оперативного дистанционного мониторинга респирабельных фракций аэрозоля в городском воздухе, для получения круговой панорамы распределения аэрозоля в воздушном бассейне населенного пункта, выявления источников аэрозольных загрязнений и отслеживания процессов их переноса в атмосфере.

Разработанный алгоритм определения оптических и микрофизических параметров аэрозоля на вертикальных и наклонных трассах зондирования в атмосфере позволяет существенно упростить процедуру сбора данных и автоматизировать процесс измерений в действующих лидарных сетях.

Практическая значимость результатов диссертации подтверждается Евразийским патентом на изобретение «Способ дистанционного определения массовых концентраций фракций атмосферного аэрозоля».

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ СОИСКАТЕЛЯ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ

Статьи в научных журналах в соответствии с п.18 Положения о присуждении ученых степеней и присвоении ученых званий в Республике Беларусь

1. Лысенко, С. А. Метод определения концентраций аэрозольных фракций в приземном воздухе по данным многочастотного лидарного зондирования / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Оптика атмосферы и океана. – 2015. – Т. 28, № 3. – С. 199–209.

2. Лысенко, С. А. Лазерно-локационные и нефелометрические методы контроля респирабельных частиц аэрозоля в городском воздухе / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Вестн. БГУ. Сер. 1, Физика. Математика. Информатика. – 2015. – № 1. – С. 41–48.

3. Лысенко, С. А. Многочастотное лидарное зондирование микроструктуры многокомпонентных городских аэрозолей / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Журн. приклад. спектроскопии. – 2015. – Т. 82, № 1. – С. 115–123.

4. Лысенко, С. А. Многочастотное лидарное зондирование загрязненности атмосферы твердыми частицами с разделением на респирабельные фракции / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 1. – С. 70–79.

5. Лысенко, С. А. Многочастотное лидарное зондирование атмосферного аэрозоля в условиях информационной неопределенности / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Оптика атмосферы и океана. – 2016. – Т. 29, № 5. – С. 404–413.

6. Лысенко, С. А. Верификация алгоритма обработки данных многочастотного лидарного зондирования аэрозоля / С. А. Лысенко, В. В. Хомич // Журнал прикладной спектроскопии. – 2018. – Т. 85, № 3. – С. 493–500.

Статьи в сборниках материалов конференций

7. Кугейко, М. М. Оптический метод контроля загрязненности воздуха респирабельными твердыми частицами / М. М. Кугейко, С. А. Лысенко, В. В. Хомич // Медэлектроника–2014. Средства медицинской электроники и новые медицинские технологии : сб. науч. ст. VIII Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 10–11 дек. 2014 г. / Белорус. госуд. ун-т информатики и радиоэлектроники [и др.] ; редкол.: В. С. Улащик [и др.]. – Минск, 2014. – С. 401–403.

8. Лысенко, С. А. Многочастотное лидарное зондирование респирабельных фракций городских аэрозолей / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы III Междунар. науч.-практ. конф., Минск, 28–29

апр. 2015 г. / Ин-т приклад. физ. проблем, Беларус. гос. ун-та; редкол.: В. И. Попеич (гл. ред.) [и др.]. – Минск, 2015. – С. 76–78.

9. Лысенко, С. А. Восстановление пространственного распределения микрофизических параметров аэрозоля из сигналов многочастотного лидарного зондирования в условиях информационной неопределенности / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // V Конгресс физиков Беларуси (посвященный Международному году света): сб. науч. тр. Минск, 27–30 октября 2015 г. / редкол.: С. Я. Килин (гл. ред.) [и др.]. – Минск: Ковчег, 2015. – С. 78–79.

10. Лысенко, С. А. Метод определения вертикальных профилей объемных концентраций аэрозольных частиц по данным многоволнового лидарного зондирования / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 нояб. 2015 г. / Беларус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2015. – С. 159.

11. Лысенко, С. А. Метод получения пространственных распределений респирабельных фракций аэрозоля в атмосфере по данным многочастотного лидарного зондирования / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 нояб. 2015 г. / Беларус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2015. – С. 160–161.

12. Лысенко, С. А. Методы калибровки многочастотного лидара / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Квантовая электроника : материалы X Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 9–13 нояб. 2015 г. / Беларус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2015. – С. 162–163.

13. Хомич, В. В. Метод определения оптических и микрофизических характеристик аэрозоля в условиях информационной неопределенности по данным многочастотного лидарного зондирования / В. В. Хомич, С. А. Лысенко // Международная школа-конференция молодых ученых и специалистов «Современные проблемы физики»: сб. науч. трудов, Минск, 8–10 июня 2016 г. / НАН Беларуси, Ин-т физики : под ред. В. В. Машко, Д. В. Новицкого, М. С. Усачева. – Минск, 2016. – С. 229–233.

14. Лысенко, С. А. Многочастотное лидарное зондирование мелкодисперсных фракций атмосферного аэрозоля в условиях информационной неопределенности / С. А. Лысенко, В. В. Хомич // Квантовая электроника : материалы XI Междунар. науч.-техн. конф., Минск, 13–17 нояб. 2017 г. / Беларус. гос. ун-т [и др.] ; редкол.: М. М. Кугейко (отв. ред.) [и др.]. – Минск: РИВШ, 2017. – С. 191–192.

Тезисы докладов на конференциях

15. Лысенко, С. А. Экологический мониторинг городских аэрозолей и их респирабельных фракций на основе многочастотного лидарного зондирования / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Международная конференция «Аэрозоль и оптика атмосферы» (к столетию Г.В. Розенберга) : тез. докл., Москва, 21–24 окт. 2014 г. / Рос. акад. наук [и др.]. – М., 2014. – С. 63.

16. Лысенко, С. А. Оптические измерители микроструктуры городских и промышленных аэрозолей / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич // Международная конференция «Аэрозоль и оптика атмосферы» (к столетию Г.В. Розенберга) : тез. докл., Москва, 21–24 окт. 2014 г. / Рос. акад. наук [и др.]. – М., 2014. – С. 100.

Патенты

17. Способ дистанционного определения массовых концентраций фракций атмосферного аэрозоля: Евраз. патент № 201400865A1 / С. А. Лысенко, М. М. Кугейко, В. В. Хомич, дата публ.: 29.01.2016.

РЕЗЮМЕ

Хомич Василий Васильевич

Определение оптических и микрофизических параметров атмосферного аэрозоля по данным многочастотного лидарного зондирования без вспомогательных измерений

Ключевые слова: аэрозоль, оптические параметры, респирабельные частицы, массовая концентрация, лидар, многочастотное зондирование, обратная задача.

Цель исследования: разработка методов определения оптических и микрофизических параметров аэрозоля на горизонтальных и вертикальных трассах в атмосфере по данным многочастотного лидарного зондирования без вспомогательных измерений.

Методы исследования: методы решения прямых и обратных задач рассеяния света частицами, компьютерное моделирование, регрессионный анализ.

Полученные результаты и их новизна: Установлены соотношения между оптическими параметрами аэрозоля позволяющие определять калибровочные значения для обратной задачи многочастотного лидарного зондирования исключительно по спектрально-временной структуре лидарного сигнала.

Впервые предложены алгоритмы определения профилей оптических параметров и концентраций фракций аэрозоля на горизонтальных и вертикальных трассах в атмосфере из лидарных сигналов без привлечения вспомогательной измерительной информации для доопределения обратной задачи и задания граничных условий.

Область применения: мониторинг загрязненности воздуха взвешенными частицами, исследование регионального и трансграничного переноса аэрозольных загрязнений атмосферы, получение данных для построения и уточнения моделей климата.

РЭЗІЮМЭ

Хоміч Васілій Васільевіч

Вызначэнне аптычных і мікрафізічных параметраў атмасфернага аэразоля па дадзеных шматчастотнага лідарнага зандзіравання без дапаможных вымярэнняў

Ключавыя словы: аэразоль, аптычныя параметры, рэспірабельныя часціцы, масавая канцэнтрацыя, лідар, шматчастотнае зандзіраванне, зваротная задача.

Мэта працы: распрацоўка метадаў вызначэння аптычных і мікрафізічных параметраў аэразоля на гарызантальных і вертыкальных трасах у атмасферы па дадзеных шматчастотнага лідарнага зандзіравання без дапаможных вымярэнняў.

Метады даследавання: метады рашэння прамых і зваротных задач расейвання святла часціцамі, кампутарнае мадэляванне, рэгрэсійны аналіз.

Атрыманыя вынікі і іх навізна: Усталяваны суадносіны паміж аптычнымі параметрамі аэразоля, дазваляючыя вызначаць калібровачныя значэнні для зваротнай задачы шматчастотнага лідарнага зандзіравання выключна па спектральна-часовай структуры лідарнага сігналу.

Упершыню прапанаваны метады вызначэння профілей аптычных параметраў і канцэнтрацый фракцый аэразоля на гарызантальных і вертыкальных трасах у атмасферы з лідарных сігналаў без прыцягнення дапаможнай вымяральной інфармацыі для давызначэння зваротнай задачы і задання гранічных умоў.

Галіна выкарыстання: маніторынг забруджанасці паветра ўзважанымі часціцамі, даследаванне рэгіянальнага і трансгранічнага пераносу аэразольных забруджванняў атмасферы, атрыманне дадзеных для пабудовы і ўдакладнення мадэляў клімату.

SUMMARY

Vasili Khomich

Retrieval of optical and microphysical parameters of atmospheric aerosol from multifrequency lidar sounding data without additional measurements

Key words: aerosol, optical parameters, respirable particles, mass concentration, lidar, multifrequency sounding, inverse problem.

Work objective: development of methods for retrieval the optical and microphysical parameters of aerosol on horizontal and vertical paths in the atmosphere from multifrequency lidar sounding data without additional measurements.

Research approaches: methods of solving direct and inverse problems of light scattering by particles, computer simulation, regression analysis.

Obtained results and their novelty: The relationships between the optical parameters of the aerosol are established. These relationships make it possible to determine the calibration values for the inverse problem of multi-frequency lidar sensing exclusively from the spectral-temporal structure of the lidar signal.

For the first time, methods for retrieval optical parameters of aerosol and concentration fractions on horizontal and vertical paths in the atmosphere directly by lidar signals without using additional measurement information for determining the inverse problem and setting boundary conditions are proposed.

Application areas: air pollution monitoring by suspended particles, study of regional and transboundary transport of aerosol pollution of the atmosphere, obtaining data to build and refine climate models.