

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ГЕОДЕЗИИ И
КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)

На правах рукописи

ВОЛКОВ НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ

МНОГОВОЛНОВАЯ ЛИДАРНАЯ СИСТЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ
ФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ТРОПОСФЕРНОГО АЭРОЗОЛЯ:
МЕТОДИКА РАСЧЁТА ПАРАМЕТРОВ И АНАЛИЗА ДАННЫХ

специальность 05.11.07 – Оптические и оптико-электронные приборы и
комплексы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Москва-2013

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Московский государственный университет геодезии и картографии (МИИГАиК)» на кафедре Оптико-электронных приборов.

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор
Якушенков Юрий Григорьевич

Официальные оппоненты: Белов Михаил Леонидович
доктор технических наук, старший научный
сотрудник, Московский государственный
технический университет имени Н.Э.Баумана,
кафедра лазерных и оптико-электронных
систем, профессор

Троицкий Владимир Иванович
доктор технических наук, профессор,
«Московский государственный университет
геодезии и картографии (МИИГАиК)»,
заведующий кафедрой физики

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
профессионального образования
«Национальный исследовательский Томский
государственный университет»

Защита состоится «30» мая 2013 года в 10-00 часов на заседании
диссертационного совета Д 212.143.03 при Московском Государственном
Университете Геодезии и Картографии по адресу: 105064, Москва,
Гороховский пер.4, МИИГАиК, зал заседаний Ученого совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского
Государственного Университета Геодезии и Картографии.

Автореферат разослан «08» апреля 2013 года.

Ученый секретарь
диссертационного совета

Климков Юрий Михайлович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Проблема изучения последствий воздействия деятельности человека на окружающую среду становится всё более актуальной. Увеличение количества антропогенных аэрозольных выбросов в атмосферу, повышение концентрации CO_2 и других парниковых газов оказывает воздействие на радиационный баланс Земли и, как следствие, на её климат. Следует отметить, что среди перечисленных факторов воздействие аэрозоля на радиационный баланс изучено в наименьшей степени. Для уменьшения погрешностей в климатических моделях необходима глобальная информация об основных физических параметрах аэрозоля. Одними из наиболее перспективных инструментов, способных дистанционно проводить измерения параметров аэрозолей (размер, концентрация, комплексный показатель преломления), являются системы лазерного дистанционного зондирования – лидары. Малая длина волны излучения, сопоставимая с размером аэрозолей, и высокое пространственное разрешение делают лидары уникальным инструментом для исследования аэрозолей и облаков.

Многоволновое лидарное зондирование с использованием каналов рамановского рассеяния является интенсивно развивающимся направлением в лидарной технике. Лидарные системы превращаются из лабораторного оборудования в приборы для проведения долгосрочных метеорологических измерений. Тенденции совершенствования лидаров направлены на создание компактных систем с последующей их установкой на мобильные платформы (автомобильные, самолётные и космические), на проведение долгосрочных измерений в полуавтоматическом режиме с минимальным количеством операторов, на обработку больших массивов данных и получение результатов в режиме реального времени. Компактность систем и достоверность полученных с их помощью результатов при наличии температурных колебаний окружающей среды играет немаловажную роль при проведении регулярных измерений.

Разработка многоволновой лидарной системы для определения физических параметров атмосферного аэрозоля, включающая выбор технического облика системы, расчёт её конструкции и создание математического аппарата для обработки лидарных данных, является актуальной задачей на сегодняшний день. Поэтому данная работа направлена на:

- разработку методики расчета и выбора основных параметров многоволновой лидарной системы для измерения микрофизических параметров тропосферного аэрозоля;
- создание компактной, устойчивой к колебаниям окружающей температуры лидарной системы;
- разработку алгоритма и программы, позволяющих обрабатывать большие объемы лидарных данных и осуществлять мониторинг высотно-временных вариаций параметров аэрозоля в режиме реального времени.

Целями диссертационной работы явились: разработка методики расчета основных параметров многоволновой лидарной системы, позволяющей определять микрофизические параметры аэрозоля в реальном масштабе времени; определение технического облика системы, способной к проведению измерений в условиях подвижных платформ и метеостанций, а также создание алгоритма анализа результатов лидарных измерений.

В процессе выполнения диссертационной работы решались следующие **задачи**:

- разработка методики расчета параметров многоволнового аэрозольного лидара, предназначенного для определения физических параметров тропосферного аэрозоля;
- разработка конструкций стационарной и мобильной многоволновых лидарных систем;
- разработка алгоритма оперативной обработки данных зондирования, позволяющего производить пересчет измеренных коэффициентов

обратного рассеяния и общего ослабления аэрозоля в микрофизические параметры частиц;

- создание образцов систем, проведение измерений, анализ полученных данных.

Объектом исследования является многоволновая рамановская лидарная система для исследования атмосферного аэрозоля.

В работе применялись следующие **методы исследования**:

- расчет основных параметров лидарной системы проводился с учетом общей методики энергетического расчета оптико-электронного прибора;
- алгоритм решения обратной задачи многоволнового лидарного зондирования основан на методах факторного анализа и методе регуляризации Тихонова.

Научная новизна диссертационного исследования заключается в следующем:

- предложена методика расчета параметров многоволновой рамановской лидарной системы, связывающая основные параметры лидара с требуемой точностью определения микрофизических характеристик аэрозоля;
- создан алгоритм вычисления параметров частиц из данных многоволновых лидарных измерений, на основе метода линейных оценок;
- экспериментально продемонстрирована возможность использования разработанной лидарной системы для определения физических параметров вулканического пепла;
- проведены оценки высотно-временных вариаций эффективного радиуса, концентрации, комплексного показателя преломления аэрозоля в пограничном слое атмосферы на основе измерений многоволнового лидара.

Научная ценность работы состоит в разработке методики выбора параметров многоволновой лидарной системы, предназначенной для определения физических параметров тропосферного аэрозоля; в создании

алгоритма вычисления микрофизических параметров частиц на основе данных лидарного зондирования, а также в подтверждении корректности метода путем сравнения результатов лидарных измерений с данными солнечных радиометров.

Практическая ценность работы заключается в разработке семейства лидарных систем, которые будут использоваться в долгосрочных исследованиях аэрозоля в стратосфере и тропосфере в условиях метеостанций и на мобильных платформах. Полученные результаты могут быть использованы в климатических моделях, а также для улучшения точности метеопрогнозов.

Положения, выносимые на защиту:

На защиту выносятся следующие положения и результаты, полученные в диссертационной работе:

- многоволновый рамановский лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники, со средней мощностью лазерного излучения не менее 2 Вт на каждой из длин волн, позволяет оценивать физические параметры частиц внутри пограничного слоя с высотным разрешением не хуже 100 м и временным разрешением менее 30 мин при использовании приёмного телескопа с апертурой 400 мм;
- метод линейных оценок позволяет определять размер, концентрацию и комплексный показатель преломления аэрозоля из данных многоволнового лидарного зондирования; при этом скорость вычисления увеличивается по сравнению с алгоритмами, использующими метод регуляризации Тихонова;
- исключение коэффициента общего ослабления на длине волны 532 нм из полного набора оптических данных: трех коэффициентов обратного рассеяния (355, 532, 1064 нм) и двух коэффициентов общего ослабления (355, 532 нм) не приводит к существенной деградации точности оценки параметров частиц;

– значение эффективного радиуса частиц, определённое методом многоволнового зондирования и измеренное с использованием солнечного радиометра различаются не более чем на 25%. Расхождение между реальными частями комплексного показателя преломления, измеренными этими методами, не превосходит 0,05.

Достоверность результатов диссертационной работы подтверждается совпадением результатов измерений, полученных с помощью разработанной лидарной системы, с результатами математического моделирования, а также с результатами измерений с помощью солнечных радиометров.

Реализация и внедрение результатов исследований

Результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях: ООО «Оптосистемы» г. Троицк, ЭМЗ им. Мясищева совместно с ЦАО г. Долгопрудный, ООО «Лазерные системы» г. Санкт-Петербург, в исследовательском центре «TUBITAK» г. Гебзе (Turkish Scientific and Technological Research Council, Турция).

Апробация результатов работы

Основные положения диссертационной работы докладывались на VII Международном форуме «Оптические приборы и технологии - Optics-Expro-2011» (октябрь 2011 г.), на конференциях студентов и аспирантов МИИГАиК в 2010, 2011 годах, также на 25-ой и 26-ой международных конференциях по лазерным радарам (25, 26th International Laser Radar Conference, г. Санкт-Петербург (июль 2010 г.), и г. Порто Хели, Греция (июнь 2012 г) соответственно).

Публикации

Материалы диссертации и её основные результаты опубликованы в 3 статьях в журналах, входящих в перечень ВАК: «Научно-технический вестник Национального исследовательского университета информационных технологий, механики и оптики», вып. 1(77), 2012; «Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка», вып. 6, 2012 ; «Метеорология и гидрология», вып. 9, 2012.

Структура и объем работы

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав и заключения. Список цитируемых литературных источников включает 98 наименований. Общий объем работы составляет 135 страниц, включая 48 рисунков и 7 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении показана актуальность темы, сформулированы цели и основные задачи исследования, указаны научная новизна, практическая ценность результатов, приведены основные положения, выносимые на защиту.

В первой главе диссертации рассматривается общая проблематика создания многоволновой рамановской лидарной системы для дистанционного зондирования атмосферы. В простейших лидарах, служащих для исследования аэрозольного состава атмосферы, измерения проводятся на одной длине волны. Такие системы относительно просты, недороги и поэтому получили широкое распространение. Возможности лидарного зондирования значительно расширяются при его проведении одновременно на нескольких длинах волн. Одновременное детектирование сигналов, как упругого, так и рамановского рассеяния на молекулах азота или кислорода позволяет независимо вычислять коэффициенты обратного рассеяния (β) и общего ослабления аэрозоля (α) на нескольких длинах волн. На основе этих данных могут быть определены микрофизические параметры частиц (размер, концентрация и комплексный показатель преломления) с погрешностью измерений порядка 10%.

На сегодняшний день широкое распространение получили многоволновые рамановские лидары на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники. Такие системы позволяют измерять три коэффициента обратного рассеяния β (на длинах волн 355, 532, 1064 нм) и два коэффициента общего ослабления α (355, 532 нм). На основе этих данных могут быть определены основные микрофизические параметры аэрозоля. Для

вычисления параметров аэрозоля из измеренных коэффициентов α и β , как правило, используется метод регуляризации Тихонова. Проведённый анализ показал, что для широкого использования данного класса лидаров необходимо:

- обеспечить возможность проведения измерений в полуавтоматическом режиме;
- разработать алгоритм инверсии входных оптических данных α и β в физические параметры аэрозоля, обладающий устойчивостью к погрешности входных оптических данных и позволяющий обрабатывать эти данные в режиме реального времени.

Во второй главе приведена методика расчёта и выбора основных параметров многоволновой лидарной системы. Сформулированы эксплуатационные требования к трём лидарным системам (лабораторной, стационарной, самолётного базирования); тем самым определена исходная информация для проведения расчёта основных параметров систем.

Выбор параметров системы начинается с определения необходимой точности определения микрофизических параметров аэрозоля из лидарных измерений. Погрешность определения параметров аэрозоля при использовании метода линейных оценок (подробное описание этого метода приведено в главе 4) определяется выражением

$$\Delta \mathbf{P} = \mathbf{F}(\mathbf{m}, \mathbf{r}) \Delta \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

где, $\Delta \mathbf{P}$ – вектор погрешности определения микрофизических параметров аэрозоля, таких как объемная и поверхностная концентрация, эффективный радиус; $\Delta \boldsymbol{\varepsilon}$ – вектор погрешности входных данных; \mathbf{F} – матрица, описывающая увеличение погрешности, элементы которой зависят от показателя преломления и размера частиц.

Численный анализ, проведённый в диссертации, показал, что для типичных аэрозолей коэффициент увеличения ошибки составляет порядка трёх. Таким образом, если требуется определить объем или концентрацию частиц с погрешностью 30%, соответствующая погрешность измерений

коэффициентов обратного рассеяния и общего ослабления должна быть на уровне 10%.

При использовании метода Рамана коэффициент обратного рассеяния может быть достаточно просто определён с погрешностью на уровне 5%. В то же время коэффициент общего ослабления характеризуется большими погрешностями. Поэтому при проведении анализа погрешности будут рассматриваться применительно к вычислению коэффициента общего ослабления.

Количество фотонов, зарегистрированных в рамановском канале, определяется уравнением

$$N = \frac{A \cdot \Delta z \cdot \beta_R(z)}{z^2} \cdot e^{-\int_0^z (\alpha_e(z) + \alpha_R(z)) dz}, \quad (2)$$

где A – энергетические параметры системы, не зависящие от высоты; z – дистанция зондирования; α_e – коэффициент общего ослабления для сигнала упругого рассеяния; α_R – коэффициент общего ослабления для сигнала рамановского рассеяния. Пренебрегая разностью между α_e и α_R ($\alpha_e = \alpha_R = \alpha$), получим:

$$\alpha_a(z) dz = -\frac{1}{2} \cdot \frac{\partial}{\partial z} S(z) - \alpha_m, \quad (3)$$

где $\alpha = \alpha_a + \alpha_m$; α_a – коэффициент общего ослабления аэрозоля; α_m – коэффициент общего ослабления молекул; $S = \ln(Nz^2)$. Производная в (3) может быть оценена как приращение, и тогда погрешность определения аэрозольного коэффициента общего ослабления может быть оценена как

$$\Delta \alpha_a \approx \frac{1}{4\Delta z} \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{N}} \right). \quad (4)$$

С уменьшением α_a погрешность его вычисления возрастает, поэтому при рассмотрении величин α_a мы ограничимся минимальной величиной $\alpha_a \approx 0,02 \text{ км}^{-1}$. Типичное значение коэффициента общего ослабления аэрозоля в пограничном слое в средней части России летом составляет порядка

0,2 км⁻¹ на длине волны 355 нм. Таким образом, минимальная величина 0,02 км⁻¹ является допустимой.

При необходимости иметь погрешность определения коэффициента общего ослабления на уровне 10% отклонение этой величины должно быть равно: $\Delta\alpha_a=0,1\alpha_a=2\cdot 10^{-3}\text{ км}^{-1}$. Из (2) следует, что $N\sim\Delta z$, соответственно $\Delta\alpha_a\sim \frac{1}{(\Delta z)^{3/2}}$ - что свидетельствует о быстром уменьшении погрешности измерения α_a с увеличением толщины слоя Δz (с уменьшением высотного разрешения измерений). Соответственно

$$N = \left(\frac{1}{4\Delta z \cdot \Delta\alpha_a} \right)^2. \quad (5)$$

Задавшись $\Delta z=100$ м, для обеспечения статистической погрешности вычисления коэффициента экстинкции на уровне 10% из одного высотного слоя должно регистрироваться порядка $\cdot 10^6$ фотонов.

Количество детектируемых фотонов может быть оценено из лидарного уравнения (2), учитывая, что

$$A = N_L \cdot S \cdot \tau \cdot \eta, \quad (6)$$

где N_L – количество фотонов, излучаемых в атмосферу; S – площадь приемного зеркала телескопа; τ – коэффициент пропускания оптической системы; η – квантовая эффективность фотоприёмника.

Вычисление значения N с помощью уравнения (2) затруднено, поскольку это уравнение содержит произведение неизвестных $N_L \cdot S \cdot \Delta z \cdot \tau \cdot \eta$, а требуемый уровень сигнала (количество фотонов N) может быть обеспечен как за счет увеличения энергии лазера, так и за счет увеличения апертуры телескопа. Увеличение толщины слоя Δz , с которого происходит детектирование сигнала, или времени накопления также может приводить к увеличению требуемого количества фотонов.

Для оценки количества фотонов, детектируемых лидарной системой, необходимо использовать лидарное уравнение и модель атмосферы. Плотность атмосферы бралась из модели стандартной атмосферы США.

Предполагалось, что основная часть аэрозоля содержится в пограничном слое, верхняя граница которого располагается на высоте трёх километров. Коэффициент общего ослабления аэрозоля на длине волны 355 нм брался равным $0,2 \text{ км}^{-1}$. Расчёт коэффициента общего ослабления на другой длине волны производится в соответствии с соотношением вида

$$\left(\frac{\alpha_{\lambda_1}}{\alpha_{\lambda_2}} \right) = \left(\frac{\lambda_2}{\lambda_1} \right)^K, \quad (7)$$

где K – параметр Ангстрема.

В расчетах использовалось значение $K=1,4$. Лидарное отношение (отношение коэффициентов общего ослабления и обратного рассеяния) для всех трёх длин волн выбиралось равным 60 ср.

Энергия лазерного излучения выбиралась равной 100 мДж на каждой длине волны при частоте повторения импульсов 10 Гц (средние параметры общедоступных лазеров). Высотное разрешение $\Delta z=100$ м позволяет профилировать аэрозольный состав атмосферы и является достаточным для большинства климатологических задач. Максимальная высота зондирования предполагалась равной 10 км.

Для выбора предварительной конфигурации системы апертура телескопа принималась равной 400 мм. Определение микрофизических параметров аэрозоля возможно только внутри пограничного слоя, следовательно, высота, на которой проводятся исследования (с использованием рамановских каналов), для нашего случая не превышает трёх километров. В расчётах предполагалось, что коэффициент пропускания системы составляет 30%, квантовая эффективность фотоприемников 10%.

Количество фотонов N связано с частотой счёта ν как

$$N = \nu \frac{2\Delta z}{c} . \quad (8)$$

Результаты расчетов частоты счёта фотонов и их количества приведены в табл. 1. В этой таблице указано количество зарегистрированных фотонов за один лазерный импульс и частоты счёта фотонов на высотах 3 км и 10 км.

Из табл.1 можно заключить, что с высоты 3 км на длине волны 608 нм регистрируются три фотона за один импульс, т.е. для обеспечения требуемой точности измерения должны проводиться в течение примерно 50 минут (при частоте повторения импульсов лазера 10 Гц). Однако временное разрешение порядка 50 мин оказывается недостаточным для отслеживания временной эволюции вертикального распределения аэрозоля. Увеличив частоту повторения лазерных импульсов до 20 Гц, получим временное разрешение порядка 25 мин, которое является приемлемым для большинства практических задач.

Таблица 1. Частота счета фотонов и количества фотонов, принимаемых лидарной системой с высоты 3 и 10 км.

Длина волны приемного канала λ , нм.	Тип рассеяния	Частота счета фотонов, принимаемых системой ν , МГц.		Количество фотонов, принимаемых системой N .	
		3,05 км	10 км	3,05 км	10 км
355	Рэлеевское	$6,3 \cdot 10^3$	174	$12,6 \cdot 10^3$	347
532		$2,7 \cdot 10^3$	113	$5,5 \cdot 10^3$	226
1064		308	13	618	27
387	Рамановское на N_2	7,1	0,2	14	0,42
608		3,02	0,12	6	0,25

Обобщая изложенное выше, можно выделить основные пункты методики определения параметров лидарной системы:

1. Анализ исходных данных, содержащихся в технических требованиях к аппаратуре, а именно:
 - определение максимального высотного диапазона атмосферы, в котором будет проводиться зондирование аэрозоля;
 - выбор высотного и временного разрешения измерений;
 - выбор требуемых микрофизических параметров исследуемых частиц и определение требуемой точности измерений.

2. Формирование эксплуатационных требований к системе - энергопотребления, массогабаритных характеристик, рабочего диапазона температур, стойкости к внешним воздействиям и т.д.
3. Выбор спектрального диапазона измерений, количества измерительных каналов и рабочих длин волн, выбор оптической схемы построения телескопа и первоначальное определение принципиальной схемы системы.
4. Оценка погрешности измерений и определение минимально необходимого количества регистрируемых фотонов из одного высотного слоя на каждой длине волны. Выбор энергетических параметров системы в соответствии с обобщенной методикой энергетического расчета оптико-электронных систем.
5. Расчет оптической схемы фотоприёмного модуля, определение диаметра пучка рассеянного излучения в модуле и необходимых апертур оптических элементов, выбор приёмников излучения для каждой из рабочих длин волн.
6. Выбор параметров отдельных узлов: отсекателя оптического излучения, регистрирующего электронного блока, блока синхронизации процессов в лидарной системе.
7. Выбор метода вычисления микрофизических параметров аэрозоля из лидарных данных.

Третья глава диссертации посвящена описанию лидарных систем, созданных по описанной выше методике, а также результатам измерений, полученных с их помощью.

Многоволновый рамановский лидар лабораторного использования предназначен для исследования временных и высотных вариаций микрофизических параметров тропосферного аэрозоля. Предполагалось, что система будет использоваться внутри лабораторного помещения и не предусматривались специальные меры для обеспечения её температурной стабильности. Система детектирует три сигнала упругого рассеяния ($\lambda=355$,

532, 1064 нм) и два сигнала рамановского рассеяния азота ($\lambda=387, 607$ нм). Это позволяет определить три коэффициента упругого обратного рассеяния (3β) и два коэффициента общего ослабления (экстинкции, 2α) - так называемый набор ($3\beta+2\alpha$). В свою очередь, такой набор оптических данных дает возможность вычислить микрофизические параметры аэрозоля.

Телескоп системы построен по схеме Ньютона. Фокусное расстояние системы составляет 1200 мм, апертура приёмного зеркала - 400 мм. Лидар создан на основе *Nd:YAG* лазера с генератором третьей гармоники (энергия на длинах волн 355, 532 и 1064 нм составляет 200, 200 и 300 мДж соответственно при частоте повторения 10 Гц).

Фотоприёмный модуль системы представляет собой семиканальный анализатор спектра, предназначенный для разделения оптического сигнала обратного рассеяния по спектральным каналам и его детектирования. В его состав входит механический отсекающий излучения, служащий для исключения рассеянного излучения вблизи приёмного телескопа.

Таблица 2. Спектральные каналы регистрации фотоприёмного модуля

Название канала	Длины волн, нм
Каналы упругого рассеяния	355, 532, 1064
Каналы рамановского рассеяния азота	387, 608
Канал рамановского рассеяния водяного пара	408
Деполаризационный канал	355

При проведении измерений в труднодоступных удалённых районах, а также в условиях метеостанций лидарная система должна работать значительное время (до нескольких суток) без участия оператора. Таким образом, система должна быть защищена от влияния изменения температуры внешней среды. Для возможности реализации этой задачи была разработана стационарная рамановская лидарная система. Дополнительным требованием являлось обеспечение защиты от воздействия перепада температуры. Излучатель и приемная система установлены на общей оптической плите

внутри защитного кожуха, что обеспечивает взаимную механическую устойчивость приемного и передающего трактов. Излучение лазерных импульсов в атмосферу и приём излучения происходит через оптические окна. Для одновременной коллимации лазерных пучков с длинами волн 355, 532, 1064 нм и исключения влияния хроматических aberrаций используется внеосевой параболический зеркальный коллиматор.

Лидарная система самолётного базирования создана для использования в самолёте-лаборатории «Атмосфера» на базе самолёта Як-42Д. В системе используется лазер с диодной накачкой, что позволяет снизить энергопотребление, увеличить частоту следования импульсов, увеличить ресурс работы. Система предназначена для исследования как тропосферного, так и стратосферного аэрозоля с высоты порядка 9 км. С этой высоты проводятся измерения или вертикально вверх (зенит), или вертикально вниз (надир) в зависимости от задачи.

В четвёртой главе диссертации приведено описание алгоритма вычисления микрофизических параметров аэрозоля из данных многоволнового лидарного зондирования, основанного на методе линейных оценок. Как правило, для решения соответствующей обратной задачи лидарного зондирования используется метод регуляризации Тихонова, однако этот метод требует значительных временных затрат. Время вычислений становится решающим фактором, когда речь заходит об обработке большого объема данных. Использование метода линейных оценок позволяет увеличивать скорость вычисления параметров частиц; он также более устойчив к погрешностям входных оптических данных.

В методе линейных оценок интегральные свойства частиц представляются в виде линейной комбинации входных оптических данных (α и β). Коэффициент общего ослабления (α) и коэффициент обратного рассеяния (β) связаны с объемным распределением частиц по размерам $\frac{dV}{dr}$ посредством интегрального уравнения

$$g_p = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) \frac{dV}{dr}(r) dr, \quad (9)$$

где $p=(i, l_k)=1, \dots, N_0$. Индекс p обозначает тип оптических данных ($i=\alpha, \beta$) и длину волны l_k , $K_p(m, r)$ - ядро уравнения, зависящее от комплексного показателя преломления $m=m_R-i \cdot m_I$ и радиуса частицы $r \in [r_{\min}, r_{\max}]$.

Распределение по размерам может быть разложено по ядрам интегрального уравнения:

$$\frac{dV}{dr}(r) = \sum_{j=1}^N K_j(m, r) x_j + y(r), \quad (10)$$

где x_j – весовой коэффициент разложения, $y(r)$ - остаточный член (часть распределения ортогональная к ядрам).

Подставив выражение (10) в уравнение (9), получим:

$$g_p = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \sum_{j=1}^N K_p(m, r) K_j(m, r) x_j dr + \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) y(r) dr. \quad (11)$$

Из условия ортогональности остаточного члена $y(r)$ по отношению к ядрам интегральных уравнений $K_p(m, r)$ следует, что

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) y(r) dr = 0. \quad (12)$$

Выражение (11) можно переписать в матрично-векторной форме:

$$\mathbf{g} = \mathbf{C} \mathbf{x}, \quad (13)$$

где \mathbf{C} – это матрица ковариации, элементы которой равны

$$C_{pj} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) K_j(m, r) dr. \quad (14)$$

Уравнение (13) может быть решено, если матрица ковариации определена на всём интервале инверсии параметров частиц:

$$\mathbf{x} = \mathbf{C}^{-1} \mathbf{g}. \quad (15)$$

Распределение по размерам (10) теперь может быть записано в векторно-матричной форме:

$$\mathbf{v} = \mathbf{K}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{g}. \quad (16)$$

Соответственно, любая интегральная характеристика частиц P , например объемная, поверхностная, числовая концентрации, могут быть оценены, как:

$$P = \mathbf{w}^T \mathbf{K}^T \mathbf{C}^{-1} \mathbf{g}. \quad (17)$$

Вектор \mathbf{w} – это вектор набора коэффициентов. Например, для объема $w_q = 1$, поверхностной плотности $w_q = \frac{3}{r_q}$, а для числовой плотности $w_q = \frac{3}{4\pi r_k^3}$. Уравнение (17) представляет параметры аэрозольных частиц в виде линейной комбинации входных оптических данных. Весовые коэффициенты $\mathbf{a} = \mathbf{w}^T \mathbf{K}^T \mathbf{C}^{-1}$ могут быть рассчитаны для различных показателей преломления и храниться в базе данных. Однако тропосферный аэрозоль характеризуется сильными вариациями временных и пространственных параметров, и априорная информация о показателе преломления, как правило, недоступна, поэтому желательно получить эту информацию непосредственно из данных лидарных измерений. В предложенном алгоритме уравнение (9) решается для различных априорных значений комплексного показателя и интервалов инверсии $r_{min} \dots r_{max}$. Таким образом, вместо единственного решения мы получаем семейство решений.

Для выбора решения используется метод минимизации невязки. Для этого из набора входных данных удаляется одно данное g_p , и оно вычисляется на основе оставшихся $(N_0 - 1)$ данных, используя уравнение (17). Процедура эта повторяется для каждого из оптических данных. Невязка определяется разностью между измеренными g_p и рассчитанными g_p^{\square} величинами

$$\rho = \frac{\sum_p^{N_0} \left| g_p - g_p^{\square} \right|}{N_0}, \quad (18)$$

где $p = 1 \dots N_0$, N_0 – количество данных.

Поскольку мы не имеем предварительной информации ни о распределении частиц по размерам, ни о комплексном показателе преломления, то невязка вычисляется для всего предварительного заданного диапазона $r_{min} \dots r_{max}$, лежащего в интервале $[0,075 \dots 10]$ мкм, а также для всего множества значений реальной m_R и мнимой части m_I комплексного показателя преломления. Эти величины обычно рассматриваются в интервалах $[1,35 \dots 1,65]$ и $[0,00 \dots 0,03]$. Обычно общее число найденных решений не превышает $N_T = 3000$. Опыт использования данного подхода показывает, что предпочтительнее выбирать решение, усредненное вблизи минимума невязки. Такая процедура усреднения стабилизирует решение обратной задачи. Для усреднения решения сортируются по величине невязки от r_{min} до r_{max} . Обычно для усреднения выбирается 1% от общего количества полученных решений.

При вычислении микрофизических параметров аэрозоля используется, как правило, пять оптических данных: три коэффициента обратного рассеяния и два коэффициента общего ослабления, так называемый $(3\beta + 2\alpha)$ набор. Однако измерения коэффициента общего ослабления на длине волны 532 нм сопряжено со значительными трудностями, особенно в дневное время, поскольку соответствующий сигнал рамановского рассеяния на молекулах азота достаточно слаб. Поэтому в ряде случаев желательно исключить коэффициент общего ослабления на длине волны 532 нм. Проведённое математическое моделирование продемонстрировало, что вычисление микрофизических параметров аэрозоля может быть проведено из сокращенного набора входных оптических данных $(3\beta + 1\alpha)$, т.е. исключение коэффициента общего ослабления на длине волны 532 нм не приводит к значительной деградации данных. Для проверки этого вывода было проведено сравнение параметров аэрозоля, рассчитанных из полного $(3\beta + 2\alpha)$ и сокращенного набора данных $(3\beta + 1\alpha)$. На рис.2 приведены вертикальные профили объемной концентрации аэрозоля, полученные с использованием

четырёх и пяти входных оптических данных при использовании метода линейных оценок.

Как видно из рис.1, исключение коэффициента общего ослабления на длине волны 532 нм не приводит к существенному изменению профиля, в то время как удаление коэффициента общего ослабления на длине волны 355 приводит к значительным изменениям профиля объемной концентрации. На этом рисунке также показан высотный профиль, полученный с помощью метода регуляризации.

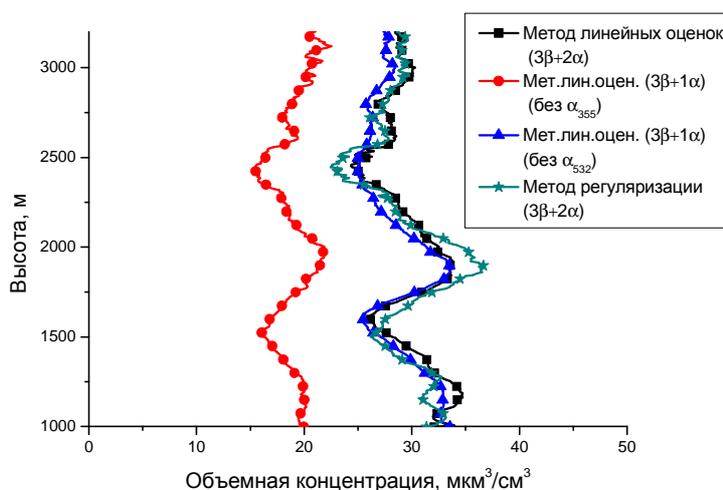


Рис.1. Вертикальные профили объемной концентрации, полученные методом линейной оценки для набора данных $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+1\alpha$, а также методом регуляризации для набора $3\beta+2\alpha$

Как видно из рисунка, результаты, полученные с использованием двух методов, хорошо согласуются между собой.

Для иллюстрации корректности рассмотренного метода были проведены вычисления параметров аэрозоля из лидарных данных, полученных с помощью разработанной системы, и проведено их сравнение с результатами измерений, полученных с помощью солнечных радиометров. На рис.2 приведены вариации значений r_{eff} и m_R , полученные из данных измерений с помощью солнечных радиометров, проводившихся в течение 14-ти часов. Первые лидарные измерения начались примерно через час после окончания измерений с помощью солнечного радиометра.

Сравнивая рис. 2 и 3, можно заключить, что r_{eff} , полученное из лидарных измерений с использованием выше описанного алгоритма, согласуется с результатами измерений с помощью солнечного радиометра.

Так r_{eff} , измеренное солнечным радиометром, не сильно изменяется в течение дня и составляет около 0,25 мкм. Соответствующая величина, полученная с помощью лидара, составляет $0,23 \pm 0,06$ для времени около часа ночи.

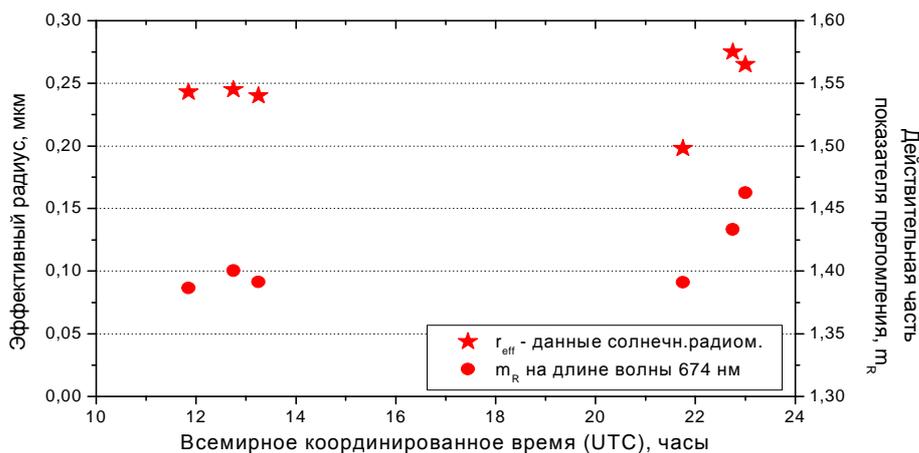


Рис.2. График значений эффективного радиуса и действительной части показателя преломления, полученных из данных AERONET

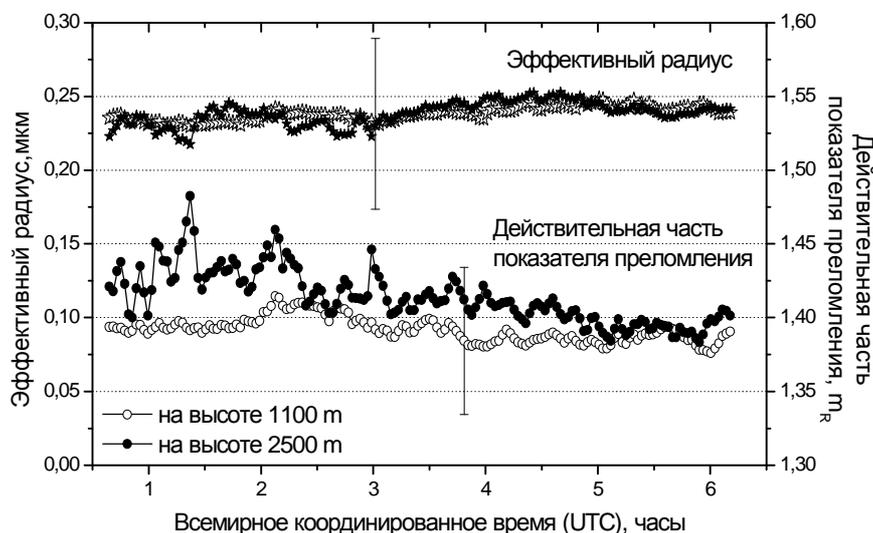


Рис.3. Эффективный радиус частиц (звезды) и действительная часть показателя преломления (круги) вычисленные из лидарных измерений 21 июля 2011 г. Результаты измерений приведены для двух высот 1100 (контурные значки) и 2500 м (закрашенные значки). Высотное разрешение лидарных измерений составляет 200 м

Действительная часть показателя преломления, измеренная солнечным радиометром на длине волны 674 нм, варьирует между величинами 1,39 и 1,46 в течение дня. Соответствующая величина из лидарных измерений варьирует в диапазоне 1,39-1,43, т.е. величины, полученные с помощью лидара и солнечного радиометра, хорошо согласуются между собой.

Исходя из вышесказанного, можно заключить, что параметры частиц, вычисленные из лидарных измерений, могут рассматриваться как достоверные.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

В заключении сформулированы основные результаты, полученные при выполнении диссертационной работы.

1. Сформулирована методика расчета параметров многоволновой рамановской лидарной системы, предназначенной для дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля, связывающая основные параметры лидара с требуемой точностью определения микрофизических характеристик аэрозоля.

2. Расчет мощности рассеянного в атмосфере лазерного излучения на длинах волн, соответствующих упругому рассеянию (355, 532, 1064 нм) и рамановскому рассеянию на молекулах азота (387, 608 нм), показал, что рациональная величина апертуры телескопа лидарной системы для проведения измерений в тропосфере составляет 400 мм при средней мощности лазерного излучения не менее 2 Вт. Лидарная система с такими параметрами обеспечивает вычисление коэффициентов экстинкции и обратного рассеяния аэрозоля в пограничном слое с погрешностью на уровне 10% при высотном разрешении порядка 100 м. При этом временное разрешение измерений составляет не более 25 мин.

3. Определён технический облик трёх лидарных систем: лабораторной, стационарной, системы самолётного базирования. Выбраны технические решения, обеспечивающие долговременную стабильность работы системы.

4. На основе произведенных расчётов были сконструированы и изготовлены три лидарные системы. Лабораторная система была установлена в исследовательском центре TUBITAK (Турция), стационарная система – в Центральной аэрологической обсерватории (г. Долгопрудный). Система самолётного базирования установлена на самолёт-лабораторию «Атмосфера», созданную на базе самолёта Як-42Д. Лабораторная и стационарная системы использовались для исследования вариаций аэрозоля в пограничном слое атмосферы, а также при исследованиях аэрозольных слоёв, содержащих вулканическую пыль. Результаты долговременных измерений и оценка параметров аэрозольных слоёв подтвердили правильность предложенных методик выбора основных параметров многоволновой лидарной системы.

5. Предложен алгоритм определения интегральных параметров аэрозоля из данных многоволнового лидарного зондирования, позволяющий определять эффективный радиус частиц, концентрацию и комплексный показатель преломления из линейной комбинации коэффициентов обратного рассеяния и общего ослабления аэрозоля. Данный метод увеличивает скорость вычисления по сравнению с алгоритмом, использующим метод регуляризации Тихонова. Алгоритм позволяет вычислять эффективный радиус и объемную концентрацию частиц в диапазоне радиусов от 0,075 до 10 мкм с погрешностью порядка 30% при погрешности входных данных на уровне 10%.

6. Сравнение результатов, полученных с использованием полного набора входных оптических данных (3 коэффициента обратного рассеяния и 2 коэффициента общего ослабления) и сокращенного набора (коэффициент общего ослабления на длине волны 532 нм отсутствует), продемонстрировало, что исключение коэффициента общего ослабления на длине волны 532 нм не влияет существенным образом на результат.

7. Результаты лидарных измерений эффективного радиуса и показателя преломления частиц согласуются с величинами, полученными из

измерений с помощью солнечных радиометров. Отличия в величинах r_{eff} , полученных с использованием двух методов, не превосходят 25%, соответственные различия в измерениях m_R составляют менее 0,05.

СПИСОК НАУЧНЫХ РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в центральных журналах из перечня ВАК

1. Волков Н.Н. Выбор параметров многоволнового аэрозольного лидара для дистанционного зондирования атмосферы. // Научно-Технический Вестник ИТМО Санкт-Петербург. – 2012. – Вып. 1(77). – С. 6–9.
2. Волков Н.Н. Многоволновый лидар для измерения параметров атмосферного аэрозоля. // Известия ВУЗов. Геодезия и аэрофотосъемка. – 2012. – Вып. №6. – С. 103-107.
3. Присутствие вулканического пепла над территорией РФ вследствие извержения вулкана в Исландии 14-го апреля 2010 г. по данным модельных расчётов и наблюдений. / Ганьшин А.В., Лукьянов А.Н, Хаттатов В.У, Веселовский И.А., Волков Н.Н. // Метеорология и гидрология. – 2012. – Вып. № 9. С. 35–41.

Статьи в сборниках статей и конференций

4. Retrieval of time-sequences of particle parameters from multi-wavelength lidar measurements using principal component analysis. / I. Veselovskii, A. Kolgotin, M. Korenskiy, V. Griaznov, D.N. Whiteman, K. Allakhverdiev, F. Huseyinoglu, N. Volkov. // Proceedings of the 25th ILRC. – St. –Petersburg, 5–9 July 2010. – Vol.1. – P. 520–523.
5. Two years operation of multiwavelength aerosol lidar in turkey./ K. Allakhverdiev, M. Huseyinoglu¹, Z. Salaeva¹, A. Secgin¹, I. Veselovskii, M. Korenskiy, N. Volkov. // Proceedinds of 26 International Laser Radar Conference, Porto Heli, Greece. – 2012. – 25-29 June. – Vol.1. – P. 167–170.
6. Linear estimation of time series of bulk particle parameters from multiwavelength lidar measurements./ I. Veselovskii, A. Kolgotin, M. Korenskiy, D. Whiteman, O. Dubovik, N. Volkov. // Proceedinds of 26th International Laser Radar Conference, Porto Heli, Greece. – 2012. – 25-29 June. – Vol.1. – P. 525–528.