

ОАО «Военно-промышленная корпорация
«Научно-производственное объединение машиностроения»

На правах рукописи

Колготин Алексей Викторович

МЕТОДИКА РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ МНОГОВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ГЛОБАЛЬНОМУ МОНИТОРИНГУ
ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология и агрометеорология

Диссертация на соискание учёной степени
доктора физико-математических наук

2013

Оглавление

Перечень основных сокращений	5
Введение	6
<i>Глава 1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ МНГОВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ГЛОБАЛЬНОМУ МОНИТОРИНГУ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ</i>	14
1.1. Многоволновой аэрозольный лидар. Данные, измеряемые при многоволновом лидарном зондировании	14
1.2. Основное лидарное уравнение. Оптические свойства аэрозолей, определяемые по данным многоволнового лидарного зондирования	17
1.3. Целевые параметры аэрозолей, восстанавливаемые на основе оптических данных. Общая постановка задач многоволнового лидарного зондирования	21
1.4 Выводы к первой главе.....	24
<i>Глава 2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СФЕР И СЛУЧАЙНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ СФЕРОИДОВ</i>	26
2.1. Концептуальная модель.....	26
2.2. Математическая модель	31
2.3. Прямая задача. Анализ её ядра и пространства решений	33
2.4. Постановка обратной задачи. Её анализ, выбор метода решения	44
2.5. Алгоритм решения обратной задачи.....	47
2.6. Численная реализация регуляризирующего алгоритма	48
2.7. Численный эксперимент.....	52
2.8. Оценка погрешности восстановления коэффициентов рассеяния, поглощения и альбедо однократного рассеяния.....	60
2.9. Выводы ко второй главе.....	68
<i>Глава 3. ДВУМЕРНЫЙ РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ</i>	71

3.1. Концептуальная модель.....	71
3.2. Математическая модель	75
3.3. Постановка двумерной обратной задачи. Построение её решения	76
3.4. Двумерный регуляризирующий алгоритм решения обратной задачи	82
3.5. Численная реализация двумерного регуляризирующего алгоритма...	85
3.6. Численный эксперимент.....	88
3.7. Семейство методов на базе двумерной концепции математической модели	102
3.8. Выводы к третьей главе.....	106
<i>Глава 4. БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ОЦЕНКИ ПОЛЯ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ.....</i>	<i>109</i>
4.1. Концептуальная модель.....	109
4.2. Построение устойчивого решения обратной задачи. Его обоснование и оценка точности	111
4.3. Быстрый алгоритм решения обратной задачи	121
4.4. Численная реализация быстрого алгоритма.....	122
4.5. Численный эксперимент.....	125
4.6. Семейство методов на базе метода линейной оценки.....	129
4.7. Выводы к четвертой главе.....	132
<i>Глава 5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ.....</i>	<i>134</i>
5.1. Эксперимент по измерению минеральной пыли в Африке.....	134
5.2. Эксперимент по измерению продуктов горения биомассы в Европе	162
5.3. Эксперимент по измерению урбанистического аэрозоля в Северной Америке и в Европе	171
5.4. Деятельность по разработке, внедрению и применению методики ...	176
5.5. Выводы к пятой главе.....	178
Заключение.....	181
Библиографический список используемой литературы.....	184

Приложение	202
------------------	-----

Перечень основных сокращений

АНТУ – Афинский Научно-Технологический Университет, Греция

АОР – альbedo однократного рассеяния

БА – быстрый алгоритм

ГИНТ – Институт Науки и Технологий в Гвангджу, Ю. Корея

ИТИ – Институт Тропосферных Исследований, г. Лейпциг, ФРГ

КПП – комплексный показатель преломления

ЛЗП – локальный забор проб

ЛО – линейная оценка

НАСА [от англ. NASA] – национальное аэрокосмическое агентство США

ОДСФ – объёмная доля сфероидной фракции

РАР – распределение аэрозолей по размерам

ЦКП – центр космических полетов

ЦФП ИОФ РАН – Центр Физического Приборостроения Института Общей Физики Российской Академии Наук

$3\beta+2\alpha$ – обозначение набора трех коэффициентов общего обратного рассеяния, двух коэффициентов ослабления аэрозолей на длинах волн 355, 532, 1064 нм и 355, 532 нм соответственно (если не указано иное)

$3\beta+2\alpha+1\delta$ – обозначение набора $3\beta+2\alpha$, дополненного деполяризацией излучения на длине волны 355 нм (если не указано иное)

AERONET [от англ. AEROSol RObotic NETwork] – аэрозольная автоматизированная сеть солнечных радиометров

EARLINET [от англ. European Aerosol Research LIdar NETwork] – Европейская лидарная сеть по исследованию аэрозолей

SAMUM [от англ. SAharan Mineral dUst experiMents] – эксперимент по измерениям минеральной пыли в пустыне Сахара

SAMUM-1 – SAMUM, проходивший в Марокко в мае-июне 2006 г.

SAMUM-2 – SAMUM, проходивший в Кабо Верде в январе-феврале 2008 г.

TUBITAK [от англ. Turkish Scientific and Technological Research Council] – Турецкий Научно-Технологический Центр

Введение

Актуальность темы. Аэрозоли являются важной составляющей атмосферы, влияющие на климат, радиационный бюджет Земли, а также на точность дистанционных измерений, проводимых при исследованиях с Земли или из космоса. Влияние атмосферных аэрозолей может быть прямым, обусловленным рассеиванием и поглощением ими падающего излучения, и косвенным как результат модификации свойств облаков и изменения содержания газовых примесей вследствие химических реакций. Аэрозоли существуют естественного и антропогенного происхождения. К первым относятся вулканический пепел, пыль, морская соль, продукты горения биомассы. Вторые возникают при сгорании угля, нефти и др. продуктов жизнедеятельности человека. Они характеризуются различными геометрической формой частиц, показателем преломления, распределением по размеру и пр.

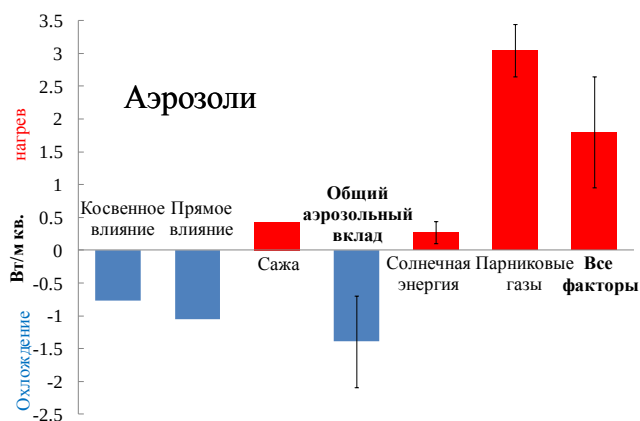


Рис. 1. Изменение энергетического потока на поверхности Земли вследствие различных факторов

Рис. 1 иллюстрирует различные факторы и их вклад в изменение энергетического потока на поверхности Земли за последнее время [92]. Как из него видно, воздействие аэрозолей на радиационный баланс Земли противоположно воздействию парникового эффекта. В то время как парниковые газы уменьшают радиационную эмиссию Земли, вызывая общее потепление, аэрозольное рассеяние наоборот ведёт к охлаждению поверхности. Кроме того аэрозоли, содержащие сажу, сильно поглощают солнечное излучение. Как следствие, охлаждение на поверхности земли сопровождается нагреванием верхних слоёв атмосферы. Этот эффект сокращает температурный градиент атмосферы, влияя на процесс испарения и формирования облаков.

Еще одной важной особенностью является погрешность, с которой вы-

полнены представленные оценки. Степень научного понимания парникового эффекта достаточно высокая, поэтому погрешность оценки его влияния на радиационный баланс относительно небольшая. В случае с аэрозолями их общий вклад с учетом погрешности оценок в балансе сопоставим с уровнем, который достигается при рассмотрении всех климатических факторов. Существующие на сегодняшний день климатологические модели характеризуются значительной неопределенностью предсказаний, что связано, в том числе, с отсутствием надежной информации о вертикальном распределении микрофизических параметров аэрозолей и о процессах модификации облаков под воздействием внешней среды. Отчёт Межправительственной Комиссии по Изменению Климата [71] определяет воздействия аэрозолей на радиационный баланс планеты как наиболее серьезный источник погрешностей при моделировании изменений климата. Для уменьшения этой неопределённости необходима долговременная достоверная количественная информация о временных и пространственных вариациях параметров аэрозолей.

Решение этой задачи возможно благодаря применению дистанционных методов зондирования. Дистанционные методы дают возможность получать глобальную информацию о параметрах аэрозолей и облаков. Подобные измерения могут проводиться как с земли, так и из космоса. Хотя системы наземного базирования являются более простыми в обслуживании и способны поставлять достоверные данные о параметрах аэрозолей в выбранном районе, они уступают спутниковым системам по глобальности предоставляемой информации. В связи с этим в настоящее время реализуются различные космические миссии по выявлению влияния аэрозолей и солнечной радиации на климат Земли. Наиболее крупная из них – это система спутников A-Train, среди которых в эксплуатации уже находятся спутники Glory, CALIPSO, в стадии разработки – Aqua, OCO-2, ACE и др. [92]. Подробный обзор спутниковых систем мониторинга аэрозолей можно найти в недавней публикации [11].

Одним из перспективных инструментов дистанционного зондирования является лидар. Преимущество использования лидара состоит в том, что он по-

звolyет проводить измерения с высоким разрешением по высоте, работать как в дневное, так и ночное время суток. В зависимости от конфигурации лидара решаются задачи различного уровня сложности. Для выявления высотного распределения аэрозольных слоев достаточно применения одноволновой системы. С помощью системы, работающей на нескольких длинах волн, возможна классификация аэрозолей, измерение коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации. Многоволновые системы, основанные на рамановских лидарах и лидарах высокого спектрального разрешения, позволяют делать оценки микрофизических параметров аэрозолей, их пространственно-временного распределения, и, как следствие, исследовать динамику протекающих в атмосфере процессов.

В России лидарные исследования проводятся в ряде научных центров, таких как Институт Оптики Атмосферы (Томск), Институт Общей Физики, Центральное Аэрологическое Управление, НПО «Тайфун», Институт Космического Приборостроения, Центр Физического Приборостроения ИОФРАН и др. [8,7,9,10,16,11]. Европейская аэрозольная исследовательская лидарная сеть (EARLINET) включает 27 станций [36], распределенных по всей Европе, из которых 14 – это рамановские лидары. Новые многоволновые рамановские лидары вошли в строй в Восточной Азии [108, 110] и на Шпицбергене [121]. В настоящее время ведется летная отработка систем самолетного базирования [64], которые в дальнейшем планируется использовать для дистанционного зондирования с космических платформ.

В последнее десятилетие был достигнут значительный прогресс как в создании усовершенствованных лидарных систем, так и в разработке алгоритмов обработки данных лидарного зондирования для оценки параметров аэрозолей. Однако на сегодняшний день существует ряд проблем, которые сдерживают дальнейшее развитие дистанционных методов зондирования в целом и применение уже разработанных алгоритмов обработки данных лидарного зондирования в частности. Наиболее существенные из них связаны со следующими особенностями:

– данные многоволнового зондирования аэрозолей в зависимости от конфигурации лидара включают набор из 3-6 коэффициентов обратного рассеяния, 1-2 коэффициентов ослабления, 1-3 значений деполяризации излучения в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм, который является очень ограниченным для оценки важнейших характеристик аэрозолей, присутствующих в атмосфере;

– лидарные данные имеют высокую измерительную погрешность, особенно в случае зондирования системами космического базирования, вследствие чего необходимы дополнительная стабилизация, повышение устойчивости и надежности работы алгоритмов для обработки этих данных;

– обработка большого объема данных многоволнового лидарного зондирования в реальном времени при глобальном мониторинге параметров аэрозолей предъявляет повышенные требования к скорости расчетов, выполняемых используемыми алгоритмами;

– отсутствует априорная информация о распределении аэрозолей по размерам, комплексном показателе преломления, при этом их размеры могут варьироваться в широком диапазоне от 0.05 до 20 мкм, а показатель преломления в реальной части от 1.3 до 1.7 и в мнимой части от 0 до 0.05;

– разработанные ранее алгоритмы применимы для оценки параметров сферических аэрозолей, имеющих фиксированный показатель преломления, однако в общем случае атмосферные аэрозоли представлены частицами нерегулярной формы, а их показатель преломления зависит от длины волны падающего излучения.

Создание комплексного аппарата для решения указанных проблем позволит сделать важный шаг в дальнейшем развитии дистанционных методов лидарного зондирования.

Целью настоящего исследования является разработка методов оценки параметров атмосферных аэрозолей по лидарным измерениям коэффициентов обратного рассеяния, ослабления и деполяризации в условиях ограниченного числа длин волн, высокой измерительной погрешности, отсутствия априорной ин-

формации о форме, показателе преломления и распределении аэрозолей по размерам.

Методы исследования. При проведении научного исследования были реализованы теоретические и эмпирические методы исследования. Решения задач базируются на экспериментальных данных и теоретических положениях теории рассеяния света на малых частицах, численных методов и математического моделирования. В работе были использованы дистанционное измерение оптических коэффициентов атмосферных аэрозолей с помощью многоволнового рамановского лидара, результаты обработки данных солнечного радиометра и локального забора проб на борту самолёта для контроля точности восстановления параметров аэрозолей дистанционным методом.

На защиту выносятся:

1) алгоритм восстановления параметров атмосферных аэрозолей сферической и нерегулярной формы на основе обработки данных многоволнового лидарного зондирования, которые включают, кроме коэффициентов обратного рассеяния и ослабления, деполяризацию на нескольких длинах волн как дополнительную информацию для решения обратной задачи;

2) двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей по всей дистанции зондирования, обеспечивающий более высокую устойчивость и надежность при использовании в условиях ограниченного набора оптических данных и значительной погрешности их измерения (до 20 %);

3) быстрый алгоритм для линейной оценки поля физических параметров аэрозолей, основанный на разложении неизвестного распределения аэрозолей по размерам в ряд по ядрам интегрального уравнения, применимый для обработки большого объема данных лидарного зондирования;

4) результаты математического моделирования применения разработанной методики в реальных условиях, обеспечивающих точность оценки эффективного размера и общего объема аэрозолей до 30 %, реальной части показате-

ля преломления и альбеда однократного рассеяния до 0.05 при погрешности оптических данных до 10 %;

5) сравнение результатов восстановления параметров аэрозолей, полученных лидарным методом, методом с использованием солнечного радиометра и путем локальных измерений с борта самолёта, которое демонстрирует, что разработанные алгоритмы могут быть использованы в глобальном мониторинге атмосферы.

Научная новизна диссертационного исследования.

1) Построена математическая модель задачи многоволнового лидарного зондирования, основанная на описании ансамбля аэрозолей в виде смеси из двух компонент, одна из которых представлена частицами сферической формы, а другая – случайно ориентированными сфероидами; продемонстрирована её адекватность путем сравнения решения прямой задачи и результатов многоволнового лидарного зондирования пылевых аэрозолей.

2) Построен двумерный стабилизатор, применение которого в методе Тихонова позволяет повысить устойчивость и точность восстановления профиля параметров аэрозолей в результате регуляризации решения обратной задачи одновременно по размеру частиц и по дистанции зондирования.

3) Получено поле микрофизических параметров аэрозолей, описывающее пространственно-временное поведение частиц и их динамику, в результате применения быстрого алгоритма обработки временного ряда данных лидарного зондирования.

4) Определен оптимальный набор оптических данных для распознавания смеси аэрозолей, состоящей из сферических и нерегулярных частиц, который включает коэффициенты обратного рассеяния, ослабления и деполяризацию на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, измеряемых с погрешностью до 10 %.

5) Определена минимальная конфигурация лидара, измеряющего коэффициенты обратного рассеяния на длинах волн 355, 532, 1064 нм и ослабления на длине волны 355 нм, которая позволяет проводить оценку микрофизических

параметров аэрозолей с точностью, достаточной для климатологических исследований.

6) Проведено моделирование использования разработанной методики для восстановления различных типов атмосферных аэрозолей, характеризующихся одно- и бимодальным распределением частиц по размерам сферической и нерегулярной формы и показателем преломления, зависящим от длины волны падающего излучения.

7) Разработан подход для коррекции решения обратной задачи многоволнового лидарного зондирования, учитывающий спектральную зависимость комплексного показателя преломления аэрозолей.

8) Выполнено сравнение результатов обработки лидарных данных, полученных с помощью разработанной методики, результатов обработки данных пассивного зондирования на основе солнечного радиометра, а также результатов локального забора проб с борта самолёта; продемонстрирована сходимость полученных результатов.

Практическая значимость исследования. Разработанная методика реализована в программном комплексе, который обеспечивает автоматизированную обработку большого объёма лидарных данных в реальном времени. Программный комплекс позволяет моделировать различные факторы, влияющие на оптические свойства аэрозолей и точность восстановления их микрофизических параметров. Возможны экспертный режим работы, допускающий углубленный анализ пространства решений, и оптимизированный режим, служащий для быстрой обработки большого массива данных. В разработке, внедрении и применении программно-математического обеспечения принимает участие группа молодых ученых и аспирантов, способствуя созданию и становлению новой научной школы.

Реализация результатов. Разработанный программный комплекс в настоящее время используется в отечественных и зарубежных научных центрах (см. приложение), таких как ЦФП ИОФРАН (Троицк, акт выполненных работ № 1-11 от 11.01.2011), Институт лазерной техники и технологий (С.-Петербург,

акт выполненных работ № 1505-12 от 15.05.2012 г.), Мармарский Исследовательский Центр (Турция, акт выполненных работ №1-10 от 11.05.2010), ИТИ (Германия), ГИНТ (Ю. Корея), АНТУ (Греция) и пр.

Апробация работы. Результаты по теме диссертации получены в ходе выполнения хоздоговорных и инновационных работ в рамках международного сотрудничества при поддержке Германской Службы Академических Обменов (DAAD, 2005 г.), Европейского Космического Агентства (проект ICARONS, контракт № 22169/NL/СТ), НАСА/ГЦКП (фонд внутренних исследований и разработок), Корейской Метеорологической Администрацией (грант CATER 2009-3112), Министерства культуры и науки Саксонии (гранты №4-7531.50-04-842-02/2, №4-7531.50-04-842-03/4, и №4-7531.50-04-842-06/4) и др. Материалы исследования докладывались и получили положительную оценку на 11 научных международных конференциях и симпозиумах по лазерным радарам (№20-26), тропосферным измерениям (№6-8) и радиации (№8). Ведущими научными организациями как отечественными, так и зарубежными, представлены положительные отзывы, подтверждающие эффективность предлагаемого программного комплекса.

Личный вклад автора. В диссертацию вошли исследования, проведенные автором за время его научной работы в ЦФП ИОФАН, ГИНТ, ИТИ. Лично автором поставлены научные задачи, предложены и разработаны методы их решения. В проведении расчетов и экспериментов участвовали И. Веселовский, Д. Мюллер, Д. Вайтман, В. Грязнов, В. Алехнович, М. Коренский, Э. Чемякин, Н. Волков и др.

Публикации. Основное содержание диссертации и выносимые на защиту результаты отражены в ведущих международных научных журналах в 18 научных работах.

Структура и объём диссертации. Работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы из 155 наименований и ??? приложений; изложена на 201 стр., включая 11 табл. и 1499 рис.

Глава 1. ОБЩАЯ ПОСТАНОВКА ЗАДАЧ МНГОВОЛНОВОГО ЛИДАРНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ В ПРИМЕНЕНИИ К ГЛОБАЛЬНОМУ МОНИТОРИНГУ ПАРАМЕТРОВ АТМОСФЕРНЫХ АЭРОЗОЛЕЙ

В настоящей главе мы сформулируем общую постановку задач, решению которых посвящена настоящая работа. В связи с этим представляется лидар – инструмент, используемый для проведения измерений атмосферных аэрозолей, его основные технические характеристики, обеспечивающие зондирование с необходимой точностью, и измеряемая им информация. Получаемая информация удовлетворяет основному лидарному уравнению, связывающему лидарный сигнал и оптические свойства аэрозолей. Их извлечение в результате решения основного лидарного уравнения позволяет сформировать исходные данные для рассматриваемых здесь задач.

1.1. Многоволновой аэрозольный лидар. Данные, измеряемые при многоволновом лидарном зондировании

Термин LIDAR происходит от английского выражения: Light Identification, Detecting And Ranging. Обзор существующих типов лидаров и подробное рассмотрение области их применения приведены в монографии Межериса [17]. В последние два десятилетия их применение динамично развивалось и в области дистанционного зондирования атмосферы в целях мониторинга пространственно-временных свойств аэрозолей. Настоящим прорывом стало создание лидаров высокого спектрального разрешения [125,64,48] и лидаров комбинационного рассеяния, или рамановских лидаров [21,51,137,4]. Конструктивно они являются относительно простыми, дешевыми, надежными при эксплуатации в различных условиях и позволяют получать информацию одновременно на нескольких длинах волн.

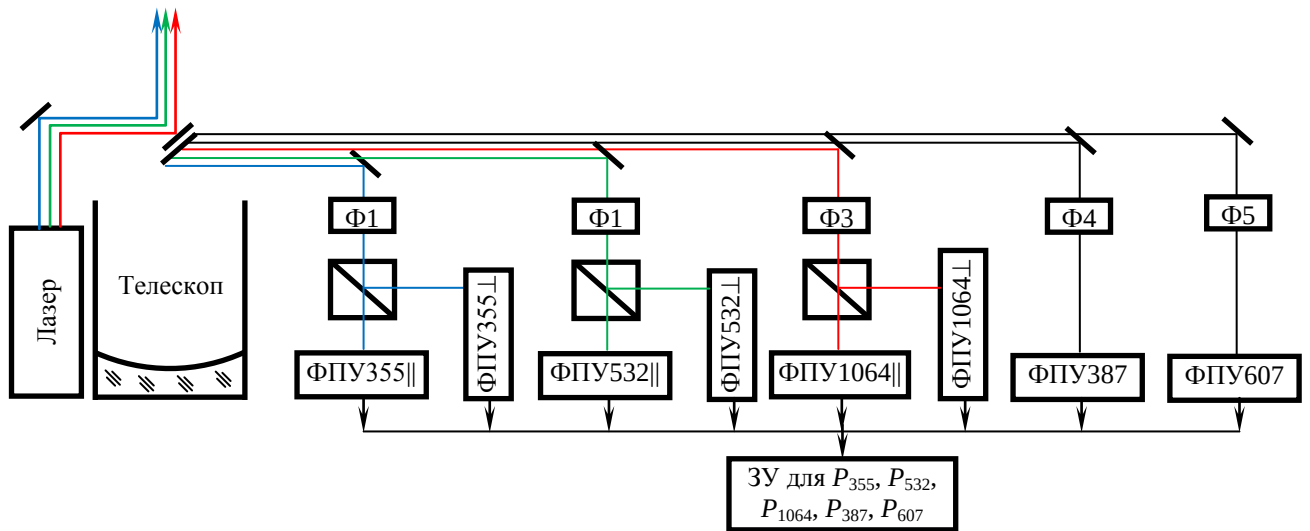


Рис. 2. Упрощенная схема лидара

Упрощенная схема, описывающая конструкцию многоволнового рамановского лидара, приведена на рис. 2. Его основными функциональными элементами являются источник сигнала, излучаемого лазером и представляющего собой плоскую линейно поляризованную электромагнитную волну с заданным направлением поляризации, и устройство приема сигнала, рассеянного в обратном направлении при осуществлении зондирования. Рамановские лидары используют стандартные Nd:YAG лазеры с генератором третьей гармоники, которые излучают сигнал на трех длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм, т.н. волны накачки. Рассеянный в обратном направлении сигнал собирается в телескопе и распределяется по каналам, соответствующим различным длинам волн, посредством системы волноводов, распределителей, вспомогательных зеркал и фильтров (Ф). Наряду с упруго рассеянным сигналом на указанных длинах волн, рамановский лидар детектирует сигнал, рассеянный неупруго на длинах волн $\lambda_R=387$ и 607 нм, т.н. опорные волны, не равные волнам накачки, от молекул азота, содержащихся в атмосфере. Кроме того, для каждой из трех базовых длин волн лидар оснащен парой поляризационных каналов, регистрирующих сигналы, поляризованные параллельно (||) и перпендикулярно (⊥) исходному излучению. На выходе каждого из каналов располагается фотоприемное устройство (ФПУ), осуществляющее подсчет фотонов, оцифровку и усреднение сигнала с последующим его сохранением на запоминающее устройство (ЗУ).

На выходе мы получаем лидарные данные в виде перпендикулярно $P_{\perp}(\lambda, z)$ и параллельно $P_{\parallel}(\lambda, z)$ поляризованных сигналов, общих сигналов

$$P(\lambda, z) = P_{\perp}(\lambda, z) + P_{\parallel}(\lambda, z), \quad (1)$$

соответствующих упругому рассеянию на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, неупругому сигналу $P(\lambda_R, z)$ на опорных длинах волн 387 и 607 нм.

Таблица 1.

Основные характеристики лидара

Наименование	Значение
Энергия импульса на 355 нм	100 мДж
Энергия импульса на 532 нм	160 мДж
Энергия импульса на 1064 нм	420 мДж
Частота импульсов	20 Гц
Расходимость лазерного пучка	до 0.4 мрад
Апертура телескопа	от 400 мм
Угловое поле телескопа	до 1 мрад

Для обеспечения измерениями, пригодными для дальнейшей обработки и получения достоверных результатов, технические характеристики элементов лидарной системы должны удовлетворять ряду требований. Энергия импульса лазерного излучения составляет от 100, 160 и 420 мДж на длинах волн 355, 532 и 1064 нм соответственно при частоте импульсов от 20 Гц, угловое поле телескопа до 1 мрад, но не менее угла, определяющего расходимость лазерного пучка. Более мощный рамановский сигнал и сигнал от наименее удаленных участков трассы зондирования, принимаются телескопом, обладающим большей апертурой и меньшим эквивалентным фокусным расстоянием. Рациональная величина апертуры телескопа лидарной системы для проведения измерений в тропосфере составляет 400 мм при средней мощности лазерного излучения не менее 2 Вт. Диапазон приемлемых значений основных характеристик лидара представлен в таблице 1. Лидарная система, отвечающая представленным характеристикам, позволяет проводить зондирование с высоким отношением сиг-

нал/шум дальностью до 10 км, шагом по трассе зондирования около 100 м и по времени 20 мин. В этом случае лидарные данные измеряются с погрешностью, при которой возможно решение рассматриваемых здесь задач. Методика проектирования лидарных систем, их оптимизация и определение технических характеристик в зависимости от решаемых задач подробно изложена в [6]. Виды и методы оценок измерительных погрешностей, возникающих при лидарном зондировании, можно найти в [84].

1.2. Основное лидарное уравнение. Оптические свойства аэрозолей, определяемые по данным многоволнового лидарного зондирования

Лазерный сигнал, упруго рассеянный при зондировании обычной двухкомпонентной атмосферы, состоящей из молекул воздуха и аэрозолей, и детектируемый лидаром, подчиняется основному уравнению лазерной локации, или основному лидарному уравнению

$$P(\lambda, z) = \frac{1}{z^2} P_0 F(\lambda) [\beta(\lambda, z) + \beta^m(\lambda, z)] \exp\left\{-2 \int_0^z [\alpha(\lambda, z') + \alpha^m(\lambda, z')] dz'\right\} \quad (2)$$

на каждой из длин волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм. Оно связывает в каждой точке трассы зондирования z общий рассеянный сигнал $P(\lambda, z)$ и оптические свойства атмосферы, описываемые с помощью коэффициентов общего обратного рассеяния и ослабления. В наших задачах они определяются суммой коэффициентов общего обратного рассеяния аэрозолей $\beta(\lambda, z)$ и молекул воздуха $\beta^m(\lambda, z)$ и коэффициентов ослабления аэрозолей $\alpha(\lambda, z)$ и молекул воздуха $\alpha^m(\lambda, z)$ соответственно. В уравнении (2) присутствует также аппаратная константа, которая зависит от технических характеристик лидарной системы: мощности излучаемого лазерного импульса P_0 и эффективности устройства приема сигнала $F(\lambda)$. $F(\lambda)$ также характеризует функцию перекрытия между полем телескопа и лазерного пучка. Аппаратная константа может быть оценена при калибровке лидарной системы. Кроме того, от неё можно избавиться в результате рассмотрения дифференциального аналога уравнения (2).

Лазерный сигнал, неупруго рассеянный при зондировании двухкомпонентной атмосферы, удовлетворяет следующей модификации основного лидарного уравнения на каждой из опорных длин волн $\lambda_R=387$ и 607 нм:

$$P(\lambda_R, z) = \frac{1}{z^2} P_0 F(\lambda) N_R(z) \Sigma^m(\lambda_R) \exp \left\{ - \int_0^z [\alpha(\lambda, z') + \alpha(\lambda_R, z') + \alpha^m(\lambda, z') + \alpha^m(\lambda_R, z')] dz' \right\} \quad (3)$$

Здесь функции $\Sigma^m(\lambda_R)$ и $N_R(z)$ описывают соответственно сечение обратного рассеяния и концентрацию молекул опорного газа, который в данном случае представлен азотом. Эти функции вместе с $\beta^m(\lambda, z)$ и $\alpha^m(\lambda, z)$ являются табличными и известны с достаточной точностью для обычной атмосферы.

Как видно, при наличии лидарных данных уравнения (2) и (3) формируют замкнутую систему, которая разрешима относительно неизвестных оптических свойств аэрозолей: коэффициента обратного рассеяния $\beta(\lambda, z)$ и ослабления $\alpha(\lambda, z)$ на длинах волн 355 и 532 нм. Мы не останавливаемся в нашей работе на методах решения полученных уравнений, поскольку они, во-первых, не представляют сложности, а во-вторых, хорошо изучены. Их описание, оценка точности и применение опубликованы во многих источниках [21,29,77,76,24,52,82]. Эти методы позволяют извлекать из данных многоволнового рамановского лидара три коэффициента общего обратного рассеяния аэрозолей на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, два коэффициента ослабления аэрозолей на длинах волн 355 и 532 нм. В дальнейшем исследовании мы будем называть этот традиционный набор оптических данных как $3\beta+2\alpha$. При использовании лидара с техническими характеристиками, удовлетворяющими таблице 1, погрешность оценок находится в пределах 20 % для каждого из каналов.

Отметим, что ввиду исключительной важности вопроса о точности, с которой оптические коэффициенты извлекаются из лидарных данных, мы проводили соответствующие оценки для различных методов, которые основаны как на применении итерационных процессов и численном дифференцировании уравнения (3), так и на рассмотрении его интегрального аналога – уравнения Вальтерра I рода [15]. Мы нашли, что при выборе оптимальных параметров,

используемых в этих методах, получаемые при их применении оптические коэффициенты сходятся [83].

В случае, когда зондируется атмосфера, содержащая аэрозоли нерегулярной формы, в поляризационном канале, соответствующем перпендикулярной поляризации рассеянного излучения, возникает сигнал, отличный от нуля, и как следствие, линейная деполяризация излучения $\delta(\lambda, z)$. Она определяется соотношением [123,124,21]

$$\delta(\lambda, z) = P_{\parallel}(\lambda, z) / P_{\perp}(\lambda, z) \times 100\% \quad (4)$$

и служит индикатором того, что в атмосфере присутствуют несферические рассеиватели. Как будет показано в работе, её учет в расчетах является важным в ряде случаев, поэтому для краткости мы будем называть набор традиционных оптических данных, дополненных деполяризацией излучения на трех длинах волн, как $3\beta + 2\alpha + 3\delta$.

Набор коэффициентов $3\beta + 2\alpha$, получаемых с помощью многоволнового рамановского лидара, позволяет находить другие оптических данные об аэрозолях. Нами будет привлекаться для анализа экспонента Ангстрема

$$\zeta(z) = \frac{\ln[\alpha(\lambda_1, z) / \alpha(\lambda_2, z)]}{\ln[\lambda_2 / \lambda_1]}, \quad (5)$$

которая хорошо коррелирована с размерами аэрозолей: чем она меньше, тем больше частицы, и наоборот. Так, значения экспоненты около 0 и меньше соответствуют крупным частицам размером 1 мкм и больше, а значения выше 1 – частицам около 0.25 мкм и меньше в зависимости от происхождения аэрозолей. Эта априорная информация является полезной в решении задач многоволнового лидарного зондирования. Также очень часто используемым показателем при сравнении аэрозолей различного происхождения служит лидарное отношение

$$R(\lambda, z) = \frac{\alpha(\lambda, z)}{\beta(\lambda, z)} \quad (6)$$

Его значения от 20 до 35 ср характерны для морского аэрозоля, 50-80 ср – для сахарской пыли, 70-100 ср – для сильно поглощающих частиц, возникших в результате горения продуктов биомассы [23]. К сожалению, при зондировании

рамановским лидаром лидарное отношение может быть найдено только на двух длинах волн и одна экспонента Ангстрема на паре длин волн.

Таблица 2.

Оптические свойства аэрозолей,
определяемые по данным многоволнового лидарного зондирования

Наименование	Обозначение	Размерность	$\lambda_1=355$ нм	$\lambda_2=532$ нм	$\lambda_3=1064$ нм
Коэффициент общего обратного рассеяния	β	$(\text{м}\times\text{ср})^{-1}$	×	×	×
Коэффициент ослабления	α	м^{-1}	×	×	
Линейная деполяризация излучения	δ	%	×	×	×
Лидарное отношение	R	ср	×	×	
Экспонента Ангстрема	ζ	-	×		

В таблице 2 мы приводим оптические данные, определяемые в результате зондирования рамановским лидаром. Необходимо подчеркнуть, что лидар предоставляет данные со всей трассы зондирования, начиная с некоторой минимальной высоты $z_{\min}=0.5-1.5$ км до максимальной $z_{\max}=7-10$ км с высоким пространственным разрешением, и позволяет определять профили высотного распределения оптических коэффициентов. Кроме того, измерения могут проводиться в течение продолжительного периода, обеспечивая данными, которые имеют высокое разрешение не только по высоте, но и по времени τ . В случае с лидаром самолетного или космического базирования вместо временной характеристики возникает еще одна пространственная переменная. И в том и в другом случае, мы имеем возможность получать данные, распределенные как в вертикальном, так и горизонтальном направлении. В зависимости от «глобальности» решаемой задачи в дальнейшем мы будем привлекать аргументы z и/или τ в описании

используемых функций, чтобы подчеркнуть, какая именно задача рассматривается. Если оба аргумента отсутствуют в описании, подразумевается, что мы имеем дело с показателями в фиксированный момент времени τ_0 на некоторой дальности, или высоте z_0 .

1.3. Целевые параметры аэрозолей, восстанавливаемые на основе оптических данных. Общая постановка задач многоволнового лидарного зондирования

Аэрозольные частицы в атмосфере изменяются по размеру, количеству и пространственному распределению. Закономерность, по которой аэрозоли распространяются в зависимости от размера, определяется функцией распределения аэрозолей по размеру (РАР). Она может описывать количество (т.н. распределение нулевого порядка), площадь поверхности (распределение второго порядка), объём (распределение третьего порядка) и т.д. частиц на единицу радиусного интервала r в некотором диапазоне изменения размеров от $r_{\min}$ до $r_{\max}$. В дальнейших исследованиях мы будем работать с распределением четвертого порядка – $\nu(r)$. В атмосфере встречаются, как правило, РАР, которые представляются в виде логнормального закона или суперпозиции нескольких таких законов [68]. В результате можно выделить одну или две характерные моды в интервале $(r_{\min}; r_{\max})$, при этом субмикронную моду называют ярко выраженной, а моду с размером частиц большим 1 мкм – грубой.

На основе РАР находятся интегральные, или микрофизические, параметры аэрозолей, такие как эффективный размер r_{eff} , общая концентрация n_o , площадь поверхности s_o и объём v_o по формулам

$$v_o = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\nu(r)}{r} dr, \quad s_o = 3 \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\nu(r)}{r^2} dr, \quad n_o = \frac{3}{4\pi} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{\nu(r)}{r^4} dr, \quad r_{\text{eff}} = \frac{3v_o}{s_o} \quad (7)$$

К важнейшим параметрам аэрозолей также относятся комплексный показатель преломления m , коэффициенты рассеяния и поглощения, альбеда однократного рассеяния [см. формулу (27)]. Эти характеристики являются ключевыми при

выполнении исследований, связанных с оценками влияния аэрозолей на радиационный баланс Земли и изменение климата.

В таблице 3 сведены параметры аэрозолей, которые рассматриваются как целевые при решении задач многоволнового лидарного зондирования в применении к их глобальному мониторингу. Как и в случае с оптическими свойствами, глобальная цель – получение пространственно-временного распределения параметров аэрозолей с высоким разрешением по высоте z и времени τ . В отдельных случаях нас будут интересовать целевые параметры аэрозолей в фиксированный момент времени τ_0 , на некоторой высоте z_0 с целью проведения углубленного исследования и сравнения с результатами других методов.

Таблица 3.

Целевые параметры аэрозолей

Наименование	Обозначение	Размерность
Распределение аэрозолей по размерам	$\nu(r)$	$\text{мкм}^4 \times \text{мкм}^{-1} \times \text{см}^{-3}$
Эффективный размер	r_{eff}	мкм
Общая концентрация	n_0	см^{-3}
Общая площадь поверхности	S_0	$\text{мкм}^2 \times \text{см}^{-3}$
Общий объём	V_0	$\text{мкм}^3 \times \text{см}^{-3}$
Комплексный показатель преломления	$m = m_R - im_I$	-
Коэффициент рассеяния	sca	м^{-1}
Коэффициент поглощения	abs	м^{-1}
Альбедо однократного рассеяния	ω	-

Параметры аэрозолей зависят от множества факторов: природы возникновения, источников, географического происхождения и пр. В табл. 4 приводятся основные типы аэрозолей, которые представляют обычную атмосферу, и их некоторые параметры. Более полную классификацию можно найти в [23].

Наконец, сформулируем общую постановку задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей. Их решение осуществляется в три этапа:

1. Проведение зондирования атмосферы с помощью многоволнового лидара с целью измерения рассеянных сигналов P на нескольких длинах волн. Для обеспечения надежности результатов измерений технические характеристики лидара должны удовлетворять требованиям, приведенным в табл. 1. Этот этап связан с созданием аппаратных средств и не входит в область настоящих исследований [6].

2. Вычисление оптических данных аэрозолей в виде коэффициентов ослабления α , обратного рассеяния β , деполяризации излучения δ на имеющихся длинах волн (см. табл. 2) из результатов многоволновых лидарных измерений рассеянных сигналов P . На настоящий момент методы, применяемые на этом этапе, хорошо проработаны и подтверждены полученными результатами за многие годы. Он также не входит в сферу настоящих исследований.

Таблица 4.

Типы атмосферных аэрозолей и их некоторые параметры [23]

Тип	n_0 , см ⁻³	r_{eff} , мкм	ω	ζ (350-550 нм)
Чистый континентальный	2600	0.247	0.972	1.1
Смешанный континентальный	15 300	0.204	0.925	1.11
Загрязненный континентальный	50 000	0.15	0.892	1.13
Урбанистический	158 000	0.139	0.817	1.14
Пылевой	2300	1.488	0.888	0.2
Чистый морской	1520	0.445	0.997	0.12
Загрязненный морской з	9000	0.252	0.975	0.41
Тропический морской	600	0.479	0.998	0.07
Арктический	6600	0.12	0.887	0.85
Антарктический	43	0.26	1	0.34
Стратосферный	3	0.243	1	0.74

3. Определение целевых параметров аэрозолей, представленных в табл. 3, по оптическим коэффициентам, вычисленным на этапе 2. Предлагаемая работа посвящена исследованию решения задач, возникающих на данном этапе. Их

строгая постановка, анализ, выбор и обоснование методов решения представлены в трех следующих главах.

1.4 Выводы к первой главе

Представлен многоволновой рамановский лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники, способный генерировать лазерное излучение и принимать сигналы, упруго рассеянные на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, поляризованные параллельно и перпендикулярно падающему излучению, а также неупруго рассеянные на длинах волн 387 и 607 нм. Для обеспечения измерений с высоким пространственно-временным разрешением и дальностью до 10 км, приемлемых для дальнейшей обработки, энергия импульсов должна составлять 100/160/420 мДж на волнах 355/532/1064 нм при частоте 20 Гц, апертура телескопа – от 400 мм, поле зрения до 1 мрад.

Рассеянный сигнал удовлетворяет основному уравнению лазерной локации, которое связывает этот сигнал с оптическими свойствами зондируемых частиц. Существующие лидарные системы, аналогичные той, которая представлена нами, и методы решения основного уравнения лазерной локации позволяют находить такие оптические свойства аэрозолей, как коэффициенты общего обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, ослабления на длинах волн 355 и 532 нм и линейную деполяризацию излучения частиц на длинах волн 355, 532 и 1064 нм (т.н. набор $3\beta+2\alpha+3\delta$) с точностью до 20 %.

Введены целевые параметры аэрозолей, которые требуется определять при глобальном мониторинге атмосферы, выполнении исследований, связанных с изучением атмосферных процессов, с оценками влияния аэрозолей на радиационный баланс Земли и изменение климата. К ним относятся эффективный размер, общие концентрация, площадь поверхности и объём, комплексный показатель преломления, коэффициенты рассеяния и поглощения, альbedo однократного рассеяния аэрозолей.

Сформулирована общая постановка задач многоволнового лидарного зондирования атмосферы. Их решение осуществляется в три этапа, включающих:

1. Измерение лидарных данных.
2. Проведение их первичной обработки с целью извлечения оптических коэффициентов.
3. Оценку целевых параметров аэрозолей на основе последних.

Настоящая работа посвящена исследованию решения задач, возникающих на этапе 3.

Глава 2. АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ, СОСТОЯЩИХ ИЗ СФЕР И СЛУЧАЙНО ОРИЕНТИРОВАННЫХ СФЕРОИДОВ

Применение многоволновых рамановских лидаров продемонстрировало их потенциал в оценке параметров атмосферных аэрозолей. Однако разработанные до сих пор алгоритмы по обработке данных многоволнового лидарного зондирования преимущественно используют математические модели, основанные на теории рассеяния Ми. Этот подход применим только в тех случаях, когда рассеяние лидарного сигнала происходит на сферически симметричных частицах, и не позволяет адекватно воспроизвести рассеяние на частицах, в общем случае несферических. В данной главе строится математическая модель, основанная на рассеянии падающего излучения частицами, представляющими собой смесь сфер и случайно ориентированных сфероидов. В рамках построенной математической модели исследуется решение прямой задачи, анализируется адекватность модели путем сравнения полученного решения прямой задачи с экспериментальными данными, формулируется обратная задача, выбирается метод её решения, проводится его обоснование и оценка точности.

2.1. Концептуальная модель

При решении обратных задач многоволнового лидарного зондирования известными методами аэрозоли моделируются частицами сферической формы [105, 142, 141, 32, 60]. В случае, например, с морским аэрозолем, продуктами горения биомассы или антропогенным загрязнением, когда частицы либо идеально описываются сферами, либо достаточно малы, и эффектами асферичности при рассеянии можно пренебречь, такой подход оправдан. Однако частицы минеральной пыли одновременно обладают нерегулярной

формой и характеризуются большими размерами. В этом случае хорошо известно, что рассеяние в обратном направлении гораздо слабее, чем обратное рассеяние, предсказываемое теорией Ми для сфер эквивалентного объема. Кроме того, обратное рассеяние пыли, измеряемое при лидарном зондировании, является сильно деполяризованным. В ходе кампании SAMUM деполяризация излучения достигала 30 % [55]. Спектральная зависимость данного показателя содержит информацию о параметрах частиц, однако в рамках теории Ми она не может быть использована при решении обратных задач многоволнового лидарного зондирования. Необходимость учитывать несферическую форму частиц в рассматриваемых задачах является очевидной, однако до сих пор в существующих методах их решения этот эффект остается неучтенным.

Важно отметить, что аналогичная проблема возникает не только в лидарных методах. Учет влияния формы частиц на рассеяние света является сложной фундаментальной задачей, которая накладывает значительные ограничения на точность оценки свойств пылевых аэрозолей в большинстве методов дистанционного зондирования [45, 95, 153]. Разработка модели рассеяния света для задач по восстановлению свойств пылевых аэрозолей связана с объективными трудностями, возникающими при решении сложных уравнений математической физики, описывающих рассеяние света. Проблемы возникают и с отбором невозмущенных аэрозолей при локальном заборе проб и лабораторных измерениях, что усложняет экспериментальное определение характеристик частиц [35, 65, 118, 118, 120, 130]. Оптические свойства частиц произвольной геометрической формы исследовались с начала прошлого века различными авторами, но точное решение, описывающее взаимодействие электромагнитного поля с единственной частицей, существует только для специальных случаев [33, 72, 95, 96]. Среди численных подходов можно выделить дискретную дипольную аппроксимацию [41] и метод конечных элементов [152], однако они требуют значительных временных ресурсов и на практике применимы только для частиц, соизмеримых с длиной волны падающего излучения.

Необходимо также подчеркнуть, что точное решение дифракционной проблемы для единственной частицы произвольной формы не обеспечивает решение рассматриваемых здесь задач многоволнового лидарного зондирования. Дело в том, что в случае классической сферической модели достаточно, по крайней мере, трех характеристик для описания ансамбля аэрозолей: радиус частиц, их распределение по размеру и КПП. Произвольная форма потребует введения дополнительных параметров, описывающих геометрию частиц, которые в свою очередь порождают соответствующее распределение. Вообще говоря, таких параметров может быть сколь угодно большое множество, что значительно увеличивает размерность задачи. В то же время при многоволновом лидарном зондировании набор измеряемых данных весьма ограничен.

Для решения этих проблем Мищенко с группой соавторов предложили моделировать природный несферический аэрозоль с помощью ансамбля полидисперсных случайно ориентированных сфероидов [93, 97]. Несмотря на то, что сфероиды образуются в результате вращения эллипсов, обладающих абсолютно гладкой геометрической формой, и как следствие, далекой от формы аэрозолей, встречающихся в природе, такая аппроксимация является очень привлекательной концепцией, которая позволяет учесть асферичность аэрозольных частиц в лидарных приложениях.

Прежде всего, сфероиды представляют собой простейшую несферическую форму, обобщающую идеальную сферу. Предполагая независимость формы частиц от их размера (т.н. аппроксимация 1-ого порядка), модель случайно ориентированных сфероидов, в которой добавляется только одна характеристика – распределение отношения осей, строго обобщает традиционные сферические модели атмосферных аэрозолей [45, 97]. В этом случае рассеяние электромагнитного излучения может быть точно описано с помощью метода T -матрицы [94], обеспечивающего согласованность угловых и спектральных рассеивающих свойств между моделируемыми и реальными аэрозолями.

Кроме того, многочисленные исследования [151, 34, 73, 91, 97] показывают, что ансамбль упрощенных частиц, таких как сфероиды, может успешно

воспроизводить свойства реальных несферических аэрозолей, т.к. точная форма, используемая при моделировании, не является до некоторой степени определяющей вследствие усреднения вкладов от всех индивидуальных частиц различной формы, ориентации и состава.

Эта концепция получила широкое применение во многих приложениях, в которых необходимо учитывать влияние эффектов, обусловленных отклонением геометрии частиц от сферической формы. Действующий алгоритм восстановления свойств аэрозолей, находящийся на вооружении в аэрозольной автоматизированной сети солнечных радиометров наземного базирования (AERONET) является одним из ярких примеров применения модели сфероидов для интерпретации наблюдений, полученных при дистанционном зондировании. Так, Дубовик с группой соавторов сначала использовали предложенную модель для оценки погрешности, вызванной пренебрежением эффектов асферичности частиц в работе алгоритма AERONETa [46, 42]. Затем они разработали подход [43, 45], позволяющий проводить быстрые и точные вычисления характеристик рассеяния на ансамбле сфероидов, основанный на привлечении предварительно созданного банка данных, и включили сфероидную модель в алгоритм AERONETa [44], созданного ранее, с тем, чтобы учитывать асферические эффекты.

Более чем 5 летний опыт работы алгоритма, разработанного для AERONETa, продемонстрировал важные преимущества в восстановлении свойств пыли. Во-первых, привлечение сфероидной модели привело к подавлению ложной ярко выраженной моды в PAR и ложной спектральной зависимости реальной части показателя преломления, отмечавшейся ранее [42]. Во-вторых, это повысило точность наблюдений в AERONETe за пустынной пылью. В частности, сфероидная модель позволила довести невязку по угловой и спектральной интенсивности в наблюдениях до уровня измерительной погрешности, т.е. до 5 % для солнечной яркости и до 1 % для оптической толщины аэрозолей. В случае со сферической моделью аналогичный показатель для солнечной яркости составлял в два раза больше. Детальное обсуждение примене-

ния сфероидной модели при восстановлении азиатской пыли можно найти в исследовании Эка и др. [47]. При анализе новых типов данных, которые включают измерения поляризации в AERONETe, чувствительность к асферичности частиц еще выше. Результаты, представленные Дубовиком [45], иллюстрируют рассогласование в поляризации до 5 % при использовании сферической модели, тогда как при использовании сфероидной модели оно составляет менее 1 %. Более глубокий сравнительный анализ наблюдений в рамках AERONETa с привлечением поляриметрических данных проводился Ли и др. [86], в котором продемонстрирована адекватность сфероидной модели при измерениях несферической пыли. Наконец, сфероидная модель пустынной пыли, эксплуатируемая в AERONETe, успешно применялась при анализе спутниковых наблюдений, включая MODIS [85], AVHRR [154], POLDER [56], MSG/SEVIRI [59].

На основе проведенного анализа существующих исследований в настоящей работе предлагается использование концепции, обобщающей ранее разработанную сферическую модель [12] в результате добавления сфероидной модели, для решения обратных задач многоволнового лидарного зондирования по восстановлению физических свойств аэрозолей. В соответствии с этой концепцией аэрозоли представляют собой двухкомпонентную смесь, одна из компонент которой состоит только из сферических частиц, $\nu^s(r)$, а вторая компонента – из несферических, $\nu^{ns}(r)$. Для описания последней компоненты рассмотрим ансамбль случайно ориентированных сфероидов. Он в свою очередь может быть задан с помощью некоторого распределения характеристического отношения (отношение наибольшего размера к наименьшему) сфероидов $\mu(\varepsilon)$. В предлагаемой модели предполагается следующее:

- сфероиды формируются путем вращения эллипса вокруг большой оси (продолговатый сфероид) и малой оси (сплюснутый сфероид), при этом количество продолговатых и сплюснутых сфероидов, имеющих эквивалентное характеристическое отношение, равно [45, 97];

- распределение $\mu(\varepsilon)$ не зависит от размера сфероидов и фиксировано так, чтобы обеспечить наилучшее согласование с экспериментальными данными;

ми, полученными для образцов пыли в лабораторных условиях [146, <http://www.astro.uva.nl/scatter/>];

– характеристическое отношение ε варьируется от $\varepsilon_{\min}=1.44$ до $\varepsilon_{\max}=3.00$.

Когда речь идет о сфероидной частице, под её размером понимается радиус сферической частицы аналогичного объёма. Пусть также фракция сфероидов составляет некоторую долю η в общем объёме и не зависит от размера частиц r

$$\nu^{ns}(r) = \eta \nu(r) \quad (8)$$

Распределение по размерам сферической фракции аэрозолей определяется автоматически как

$$\nu^s(r) = (1-\eta) \nu(r) \quad (9)$$

2.2. Математическая модель

Оптические свойства аэрозолей $g_i(\lambda)$ характеризуются такими коэффициентами, как ослабления ($i=\alpha$), обратного рассеяния, поляризованного параллельно ($i=\beta_{\parallel}$) и перпендикулярно ($i=\beta_{\perp}$) падающему излучению на длине волны λ . Они связаны с РАР интегральным преобразованием с ядром $K_i(\lambda, m, r)$ следующим образом

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_i(\lambda, m, r) \nu(r) dr = g_i(\lambda), \quad i=\alpha, \beta_{\parallel}, \beta_{\perp} \quad (10)$$

Здесь параметр $m=m_R - im_I$ характеризует комплексный показатель преломления (КПП) аэрозолей. Принимая во внимание, что аэрозоли являются смесью сфер и случайно ориентированных сфероидов, данное интегральное преобразование примет вид

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [(1-\eta)K_i^s(\lambda, m, r) + \eta K_i^{ns}(\lambda, m, r)] \nu(r) dr = g_i(\lambda) \quad (11)$$

с ядром

$$K_i(\lambda, m, r) = (1-\eta)K_i^s(\lambda, m, r) + \eta K_i^{ns}(\lambda, m, r) \quad (12)$$

Как видно из этого выражения, ядро интегрального преобразования есть совокупность взвешенных функций $K_i^s(\lambda, m, r)$ и $K_i^{ns}(\lambda, m, r)$, которые зависят от формы частиц.

В случае, если форма частиц сферическая, соответствующая функция $K_i^s(\lambda, m, r)$ выражается через сечение обратного рассеяния ($i=\beta_{||}$) и ослабления ($i=\alpha$) электромагнитного излучения индивидуальной частицей $\Sigma_i(\lambda, m, r)$, рассчитываемое на основе теории рассеяния Ми [3,72]:

$$K_i^s(\lambda, m, r) = \frac{3}{4\pi r^4} \Sigma_i(\lambda, m, r) \quad (13)$$

В случае сфероидной формы частиц соответствующая функция $K_i^{ns}(\lambda, m, r)$ выражается через сечение обратного рассеяния ($i=\beta_{||}, \beta_{\perp}$) и ослабления ($i=\alpha$) электромагнитного излучения индивидуальными частицами $C_i(\lambda, m, r, \varepsilon)$, которое получено Мищенко и Трависом с использованием метода T -матрицы [94]:

$$K_i^{ns}(\lambda, m, r) = \int_{\varepsilon_{\min}}^{\varepsilon_{\max}} \frac{3}{4\pi r^4} C_i(\lambda, m, r, \varepsilon) \mu(\varepsilon) d\varepsilon, \quad (14)$$

Расчет ядер (13) и (14) требует значительных вычислительных ресурсов, поэтому для построенной модели создан банк данных [45]. Используемая версия банка данных содержит т.н. усредненные ядра, определяемые выражением

$$\langle K_{il}^{s,ns}(\lambda_0, m_{ts}) \rangle = \int_{R_{\min}}^{R_{\max}} K_i^{s,ns}(\lambda_0, m_{ts}, r) b_l(r) dr, \quad l=1, \dots, N_b=34 \quad (15)$$

Здесь $\lambda_0=355$ нм – базовая длина волны, $m_{ts}=m_{Rt} - im_{Is}$ – КПП, заданный в диапазоне от $m_{R1}=1.3$ до $m_{Rt_{\max}}=1.7$ с шагом 0.018 для реальной части и от $m_{I1}=0.0005$ до $m_{Is_{\max}}=0.5$ в 15 логарифмически эквидистантных узлах для мнимой части, $b_l(r)$ – полиномы 1-ого порядка или треугольные функции с основаниями на полуинтервалах $(r_{l-1}, r_{l+1}]$ и вершинами в узлах r_l , распределенных логарифмически эквидистантно от $r_0=R_{\min}=0.003$ мкм до $r_{N_b+1}=R_{\max}=25$ мкм:

$$b_l(r) = \begin{cases} 0 & ; r_{l-1} > r > r_{l+1} \\ 1 - \frac{r_l - r}{r_l - r_{l-1}} & ; r_{l-1} < r \leq r_l \\ 1 - \frac{r - r_l}{r_{l+1} - r_l} & ; r_l < r \leq r_{l+1} \end{cases} \quad l = 1, 2, \dots, N_b \quad (16)$$

Пересчет усредненных ядер на произвольной длине волны λ осуществляется с помощью безразмерного параметра $x = 2\pi r / \lambda$, при этом

$$\langle K_{il'}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle = (\lambda_0 / \lambda) \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda_0, m_{ts}) \rangle, \quad (17)$$

где l' : $r_{l'} = (\lambda / \lambda_0) r_l$. В промежуточных узлах $r_{l'} \in [r_l, r_{l+1}]$ усредненные ядра находятся с помощью линейной интерполяции на логарифмической шкале:

$$\langle K_{il'}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle \approx \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle + \frac{\langle K_{il+1}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle - \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle}{\ln r_{l+1} - \ln r_l} (\ln r_{l'} - \ln r_l) \quad (18)$$

Кроме того, при численной реализации методов удобно оперировать с произвольным значением КПП $m_{t's'}$. Для расчета усредненных ядер в промежуточных точках $m_{Rt'} \in [m_{Rt}, m_{Rt+1}]$, $m_{Is'} \in [m_{Is}, m_{Is+1}]$ мы также используем линейную интерполяцию типа

$$\begin{aligned} \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{t's'}) \rangle \approx & \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle + \frac{\langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{t+1,s}) \rangle - \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle}{m_{t+1,s} - m_{ts}} (m_{t's'} - m_{ts}) \\ & + \frac{\langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{t,s+1}) \rangle - \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda, m_{ts}) \rangle}{m_{t,s+1} - m_{ts}} (m_{ts'} - m_{ts}) \end{aligned} \quad (19)$$

Таким образом, нами полностью определена связь между введенными параметрами и функциями в виде преобразования (11), которое формализует математическую модель для задач многоволнового лидарного зондирования аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов.

2.3. Прямая задача. Анализ её ядра и пространства решений

Прежде чем рассмотреть обратную задачу необходимо исследовать прямую задачу с тем, чтобы выявить свойства используемых функций и операторов. В связи с этим в рамках построенной математической модели (11) произведем сравнение ядер интегрального уравнения (12), соответствующих сфери-

ческим частицам, свойства которого хорошо изучены, и сфероидам. Кроме того, исследуем решение прямой задачи, а именно пространство оптических свойств частиц в зависимости от их формы, физических параметров, характеристик бимодального распределения по размерам. В качестве тестируемого бимодального распределения используется комбинация двух распределений 4-ого порядка

$$\nu_i(r) = \sum_{i=1,2} \frac{4\sqrt{\pi}r^3 n_i}{\sqrt{18 \ln \sigma_i}} \exp\left(-\frac{(\ln r - \ln r_i)^2}{2 \ln^2 \sigma_i}\right), \quad (20)$$

где параметры r_i , σ_i и n_i являются соответственно модальным радиусом, дисперсией и общей концентрацией для ярко выраженной ($i=1$) и грубой ($i=2$) мод. В нашем исследовании мы тестируем четыре типа РАР с параметрами, приведенными в таблице 5. У всех типов РАР модальный радиус ярко выраженной моды равен $r_1 = 0.1$ мкм, дисперсия $\ln \sigma_1 = 0.4$. Для оценки влияния размеров частиц на пространство решений рассматривается грубая мода с модальным радиусом $r_2 = 0.5, 0.85$ и 1.5 мкм. Дисперсия грубой моды для одной пары случаев принята на уровне $\ln \sigma_2 = 0.6$ и $\ln \sigma_2 = 0.4$ для другой пары. Максимальный радиус у РАР достигает 10 или 20 мкм, поэтому удобно для них ввести обозначения РАР_{10a} , РАР_{10b} , РАР_{20a} и РАР_{20b} . РАР_{10a} и РАР_{10b} позволяют моделировать случаи, когда грубая и ярко выраженные моды создают сопоставимый вклад в обратное рассеяние. Семейство РАР_{20} представляет случай, в котором грубая мода является доминирующей. Это характерно для пылевых частиц, возникающих вблизи источников. КПП в моделировании изменяется в диапазоне $m_R \in [1.35; 1.65]$ и $m_I \in [0.0005; 0.01]$. Несмотря на то, что накопленные в AERONETe наблюдения за продолжительный период времени демонстрируют значительную вариабельность параметров пыли [43], выбранные значения КПП, модального радиуса и дисперсии являются вполне типичными и могут быть использованы для изучения основных свойств как прямой, так и обратной задач.

Оптические свойства сферических частиц и случайно ориентированных сфероидов определяются особенностями соответствующих ядер (13) и (14). На рис. 3 показаны усредненные ядра обратного рассеяния $\langle K_{\beta_l}^{ns}(\lambda, m) \rangle$ и

$\langle K_{\beta \perp l}^{ns}(\lambda, m) \rangle$, соответствующие сфероидам и рассчитанные по формуле (15) при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$ в узлах r_j [см. также интерполяционные формулы (17)- (19)]. Для малых частиц ($r<0.05$ мкм) сфероидные ядра совпадают со сферическими, показанными на рис. 4, тогда как для больших радиусов сферические ядра в несколько раз больше. Различия между сферическими и сфероидными ядрами иллюстрируются на рис. 5, показывающем на длине волны $\lambda=355$ нм при реальной части показателя преломления $m_R=1.5$ и различных значениях мнимой части показателя преломления $m_I=0.0005, 0.005, 0.015$ отношение $\frac{\langle K_{\beta l}^s(\lambda, m) \rangle}{\langle K_{\beta l}^{ns}(\lambda, m) \rangle}$, где усредненное ядро общего обратного рассеяния представляется как

$$\langle K_{\beta l}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle = \langle K_{\beta \parallel l}^{s,ns}(\lambda, m) \rangle + \langle K_{\beta \perp l}^{ns}(\lambda, m) \rangle \quad (21)$$

До 0.1 мкм отношение близко к 1, но с ростом размера частиц оно увеличивается. Для больших частиц с размером, превышающим 1 мкм, отношение существенно зависит от величины мнимой части: оно уменьшается с увеличением m_I и для значений, больших 0.015, сферические и сфероидные ядра приближаются друг к другу.

Таблица 5.

Параметры бимодальных РАР, используемых в моделировании

Обозначение РАР	r_1 , мкм	$\ln \sigma_1$	r_2 , мкм	$\ln \sigma_2$	n_1/n_2
РАР _{10a}	0.1	0.4	0.50	0.6	100
РАР _{10б}	0.1	0.4	1.50	0.4	1000
РАР _{20a}	0.1	0.4	0.85	0.6	100
РАР _{20б}	0.1	0.4	1.50	0.4	100

Ядра ослабления обоих типов частиц практически совпадают, что демонстрирует рис. 6 при показателе преломления $m=1.5-i0.0005$ и длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм. В целом, наблюдается заметная разница ядер всех типов для различных длин волн в диапазоне размеров вплоть до нескольких микрометров, что может означать хорошую обусловленность задачи многоволнового зондирования в указанном диапазоне. Одновременно можно сделать вывод о

том, что диапазон размеров, где решение обратной задачи с использованием сфероидных ядер является возможным, должен быть сопоставим с тем, который установлен с использованием сфер и достигающим 10 мкм [141].

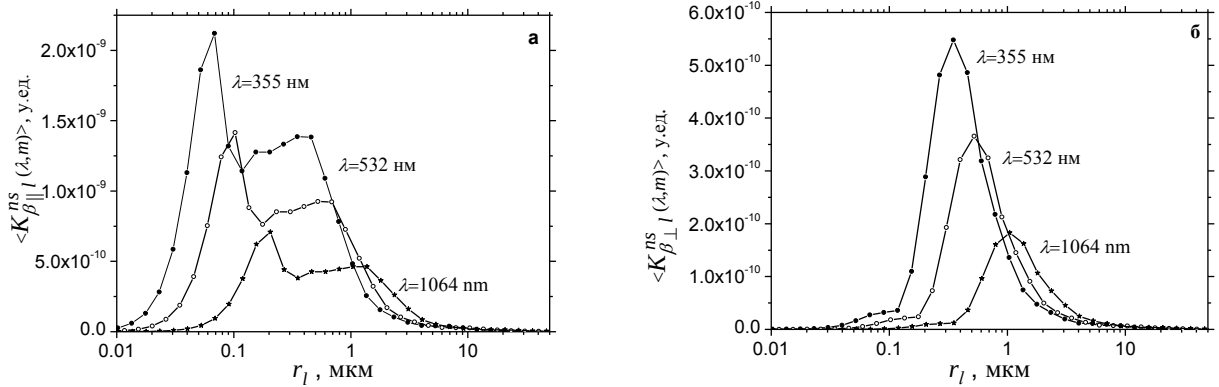


Рис. 3. Усредненные ядра обратного рассеяния, поляризованного параллельно (а) и перпендикулярно (б), соответствующие сфероидам при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$

Характерная особенность наблюдается при сравнении ядер, соответствующих ослаблению и обратному рассеянию, поляризованному перпендикулярно падающему излучению. Как следует из рис. 3б и 6, их спектральное поведение очень близко. С одной стороны, это может свидетельствовать о том, что дополнительные данные в виде обратного рассеяния, поляризованного перпендикулярно падающему излучению, которое возникает из-за сфероидных частиц, не являются существенными и принципиально не увеличивают информационное содержание лидарных измерений коэффициентов обратного рассеяния и ослабления. С другой стороны, они могут быть взаимозаменяемы при решении обратных задач без потери точности восстановления параметров аэрозолей.

Проанализируем влияние реальной части КПП на ядра исследуемой математической модели. На рис. 7 представлены усредненные сфероидные и сферические ядра общего обратного рассеяния, рассчитанные при $m_R=1.4, 1.5$ и $m_I=0.005$. Для всех значений реальной части КПП $\langle K_{\beta\parallel}^s(\lambda, m) \rangle$ больше $\langle K_{\beta\parallel}^{ns}(\lambda, m) \rangle$, однако обратное рассеяние для сфер быстро падает с уменьшением m_R . В результате в некоторых радиусных интервалах сфероидные ядра при

$m_R=1.5$ становятся сравнимы со сферическими ядрами, соответствующими малым значениям m_R . В частности, на интервале от 0.1 до 0.5 мкм выполняется:

$$\langle K_{\beta l}^s(\lambda, m=1.4-i0.0005) \rangle \approx \langle K_{\beta l}^{ns}(\lambda, m=1.5-i0.0005) \rangle$$

Аналогичный эффект наблюдался при рассмотрении ядер в зависимости от мнимой части КПП, когда при увеличении значений m_I ядра обратного рассеяния сфер сходились к соответствующим ядрам сфероидов на интервале от 2 мкм и больше (см. рис. 5). Другими словами, когда рассматриваются сфероидные частицы с КПП около $1.5-i0.0005$, сферические ядра могут хорошо воспроизводить сфероидные ядра при небольших значениях реальной части КПП и, наоборот, высоких у мнимой части.

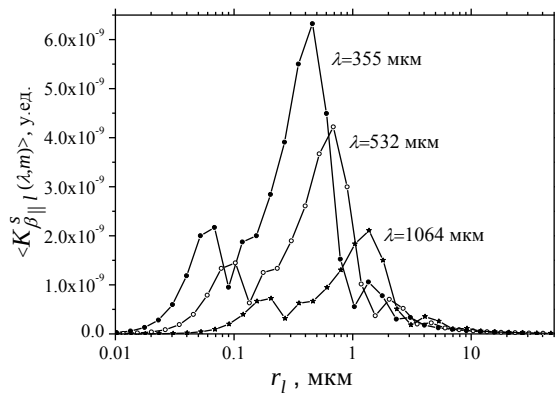


Рис. 4. Усредненные ядра обратного рассеяния, соответствующие сферам при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$

сфер превышает более чем в два раза соответствующее значение для сфероидов, тогда как коэффициент ослабления сферических частиц примерно на 10 % ниже. В этом случае лидарное отношение (6), для сфероидов на длине волны 532 нм оценивается около 51 %, что является типичным для пылевых частиц [131], тогда как для сфер оно составляет 19 %.

На оптические свойства существенно влияет КПП. Зависимость коэффициентов обратного рассеяния и ослабления от реальной части КПП для PAR_{20a} показана на рис. 9. Коэффициент обратного рассеяния растет с увеличением m_R , хотя β^s растет быстрее, чем β^{ns} . Это хорошо согласуется с тем, что фазовая функция для сфер в обратном направлении достигает пикового значения, тогда как для сфероидов при больших углах рассеяния (160° - 180°) она остается прак-

Спектральное поведение коэффициентов обратного рассеяния ($\beta^{s,ns}$) и ослабления ($\alpha^{s,ns}$) аэрозолей сферической и сфероидной формы, распределенных по закону (21), представлено на рис. 8. На рис. 8 также изображен PAR_{20a} в виде вставки. Для данного PAR коэффициент обратного рассеяния

тически неизменной. Коэффициент ослабления для обоих типов аэрозолей не очень чувствителен к вариациям m_R : её изменение в диапазоне от 1.35 до 1.65 ведет к росту $\alpha^{s,ns}$ на 25 %.

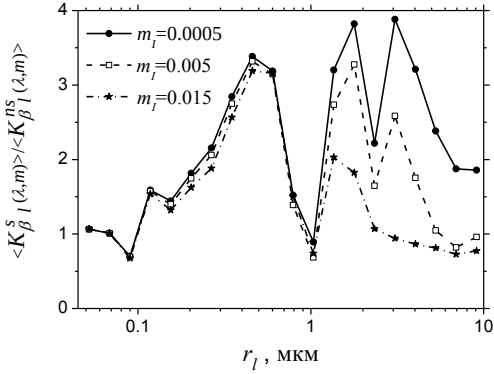


Рис. 5. Отношение усредненных ядер общего обратного рассеяния сфер и сфероидов на длине волны $\lambda=355$ нм при реальной части показателя преломления $m_R=1.5$ и различных значениях мнимой части показателя преломления $m_I=0.0005, 0.005, 0.015$

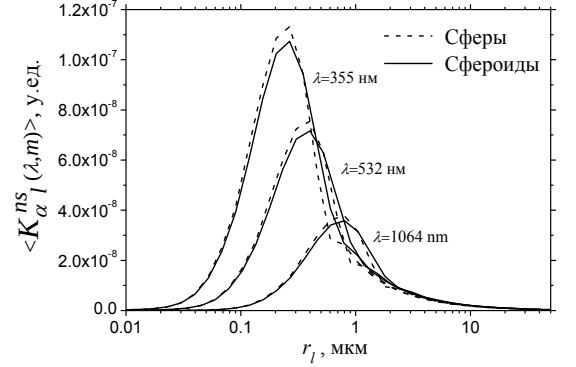


Рис. 6. Усредненные ядра ослабления сфер и сфероидов при длинах волн $\lambda=355, 532$ и 1064 нм и показателе преломления $m=1.5-i0.0005$

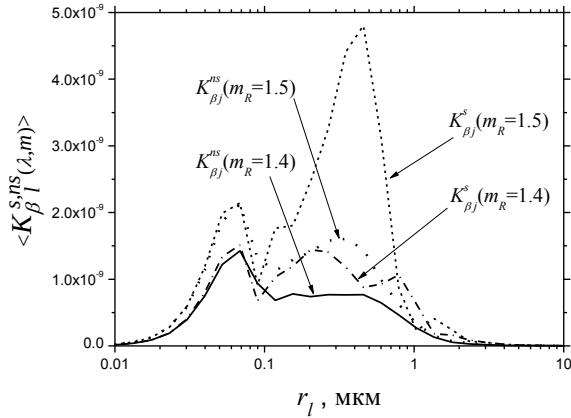


Рис. 7. Усредненные сферические (K_{β}^s) и сфероидные (K_{β}^{ns}) ядра при $\lambda=355$ нм, $m_I=0.0005$

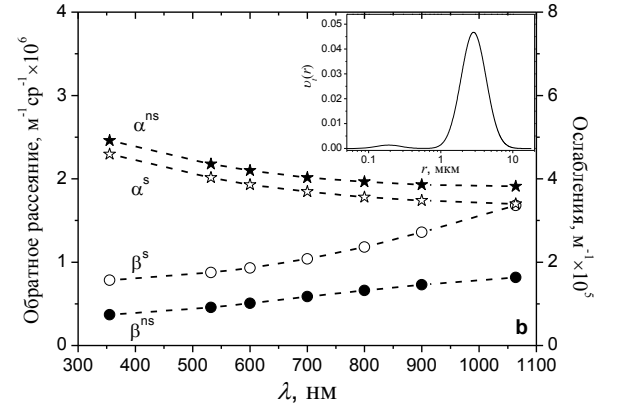


Рис. 8. Спектральное поведение коэффициентов обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы. Вставка показывает тестовое PAR_{20} , используемое в расчетах; во всех случаях КПП $m=1.55-i0.001$.

Зависимость оптических свойств от мнимой части КПП иллюстрируется на рис. 10. В диапазоне $m_I \in (0, 0.02)$ коэффициент ослабления $\alpha^{s,ns}$ показывает несущественную зависимость. В то же время коэффициент обратного рассеяния $\beta^{s,ns}$ быстро падает с увеличением m_I , особенно этот эффект характерен для сфер. В рассматриваемом диапазоне изменения мнимой части КПП β^s уменьшается в 5 раз, в то время как β^{ns} – в 3 раза. Эта разница также объясняется тем, что у сфер существует пик в фазовой функции в обратном направлении, кото-

рый исчезает с ростом m_I , и при больших значениях последней обратное рассеяние сфер и сфероидов становится сопоставимо. Из рис. 9 и 10 можно заключить, что значительное отличие между коэффициентами обратного рассеяния сфер и сфероидов возникает при больших значениях реальной части и малых значениях мнимой части КПП.

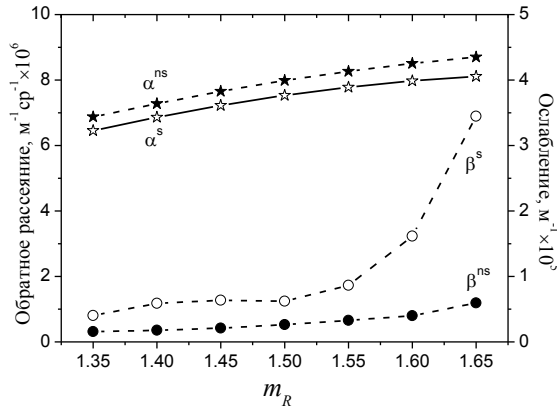


Рис. 9. Коэффициенты обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы в зависимости от реальной части КПП. PAR_{20} , $m_I=0.001$

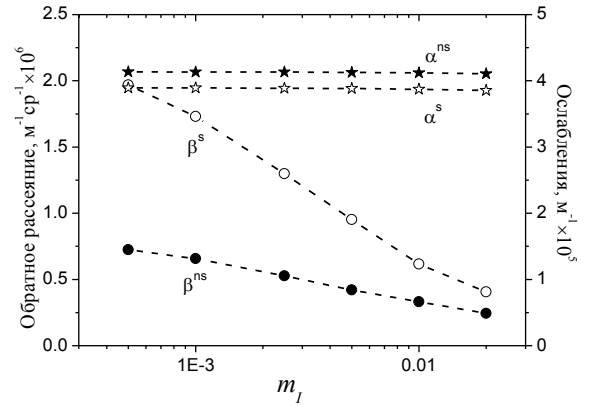


Рис. 10. Коэффициенты обратного рассеяния (круг) и ослабления (звезда) аэрозолей сферической (незаштрихованный маркер) и сфероидной (заштрихованный маркер) формы в зависимости от мнимой части КПП. PAR_{20} , $m_R=1.55$

Наряду с изучением поведения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления важно также исследовать такие характеристики, как лидарное отношение (6) и деполяризация излучения [см. ниже формулу (23)]. Они стали возможными для измерений благодаря многоволновым рамановским лидарам и лидарам с высоким спектральным разрешением при зондировании в ареалах с источниками пыли. Например, результаты, полученные в ходе экспедиций SAMUM [131], демонстрируют, что значения лидарного отношения оцениваются около 55 ср на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Деполяризация излучения измерялась около 30 % без существенных вариаций в том же спектральном диапазоне [55]. В связи с этим сравнение моделируемых спектральных характеристик с экспериментальными данными представляется важным шагом в подтверждении адекватности математической модели (11), основанной на применении случайно ориентированных сфероидов для воспроизведения рассеивающих свойств атмосферных частиц, состоящих из пыли [150].

Рис. 11 показывает спектральные вариации лидарного отношения для различных РАР и КПП. Поскольку РАР, описывающие пыль, представлены главным образом крупной фракцией частиц, расчеты проводились только для грубых мод РАР_{10а} и РАР_{20а}. (см. соответствующие вставки на рис. 11). Чтобы одновременно проиллюстрировать влияния КПП, спектральная зависимость получена при $m = 1.55-i0.001$, $1.45-i0.001$, $1.45-i0.005$. Для РАР_{20а} ($m = 1.55-i0.001$) лидарное отношение с ростом длины волны уменьшается от 55 до 31 ср. Для РАР_{10а} и таком же КПП спектральная зависимость более ровная: лидарное отношение меняется от 41 до 32 ср, а при уменьшении реальной части КПП до 1.45 оно практически становится спектрально независимым и увеличивается до 55 ср. Увеличение мнимой части КПП ведет к росту лидарного отношения на коротких длинах волн, однако моделирование показывает, что этот эффект не так сильно выражен с уменьшением размера частиц.

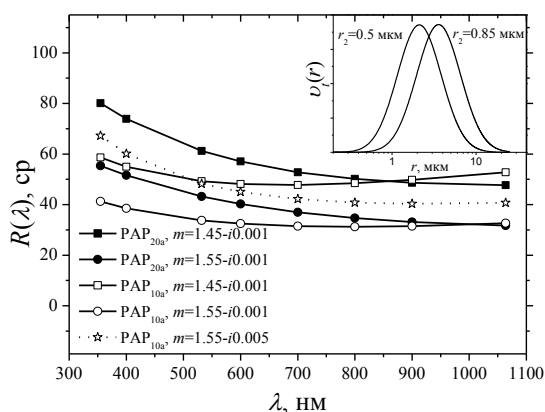


Рис.11. Спектральная зависимость лидарного отношения, рассчитанная для грубой моды РАР_{10а} и РАР_{20а} сфероидов при $m_R = 1.55$ и 1.45 и $m_I = 0.001$ и 0.005

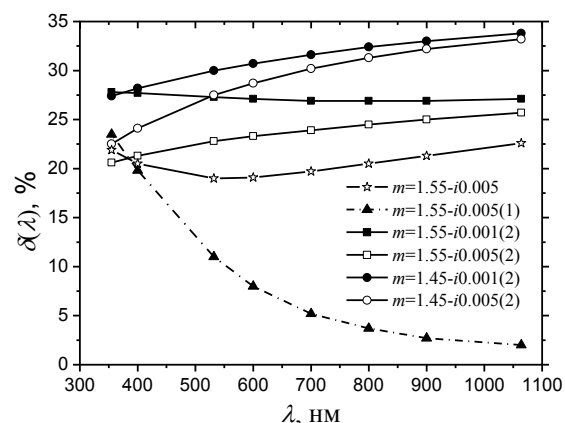


Рис.12. Спектральная зависимость деполаризации, рассчитанной на основе бимодального распределения (звезда), ярко выраженной (треугольник) и грубой (круг и квадрат) моды РАР_{20а} при $m_R = 1.55$ и 1.45 и $m_I = 0.001$ и 0.005

Спектральное поведение деполаризации, рассчитанное для грубой моды РАР_{20а}, показано на рис. 12. При $m = 1.55-i0.001$ деполаризация излучения составляет около 27 % и является спектрально независимой. Увеличение мнимой части до 0.005 ведет к уменьшению деполаризации до 20 % в коротковолновой области, а в длинноволновой части спектра она претерпевает слабый рост. При $m_R=1.45$ деполаризация повышается, достигая 30 % максимум при 1064 нм. Для сравнения рис. 12 также показывает деполаризацию, рассчитанную для ярко

выраженной моды и общего PAR_{20a} при $m = 1.55 - i0.005$. В первом случае она падает с 24 % при $\lambda = 355$ нм до 2 % при $\lambda = 1064$ нм. В то же время деполяризация, соответствующая общему PAR_{20a} , слабо зависит от длины волны падающего излучения, что обусловлено вкладом, который создают крупные частицы в рассеяние излучения. На основе полученных данных можно сделать вывод, что деполяризация излучения, полученная экспериментальным путем и при моделировании, результаты которого приведены на рис. 12, хорошо согласуется.

Зависимость лидарного отношения и деполяризации излучения от КПП, вычисленных для PAR_{20b} , исследуется на рис. 13 и 14. Лидарное отношение у сфероидов снижается примерно в 3 раза с увеличением реальной части КПП от 1.35 до 1.65 при фиксированной мнимой части $m_i = 0.005$. Соответствующий показатель у сфер гораздо выше. Как видно из рис. 13, это отношение уменьшается в 7 раз в том же диапазоне варьирования m_R . Такая динамика обусловлена сильной чувствительностью обратного рассеяния к изменению КПП. В отношении деполяризации сильной зависимости от реальной части КПП не наблюдается: рис. 13 демонстрирует, что в рассматриваемом диапазоне m_R её отклонение от среднего значения не превышает 10 %.

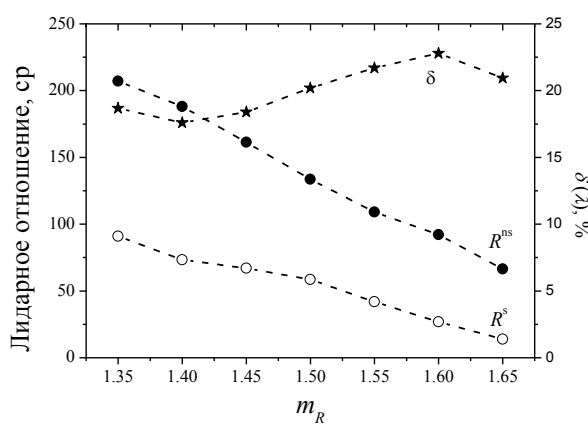


Рис. 13. Лидарное отношение сфер (R^s), сфероидов (R^{ns}) и деполяризация (δ) на длине волны 355 нм как функции реальной части КПП для PAR_{20b} и $m_i = 0.005$

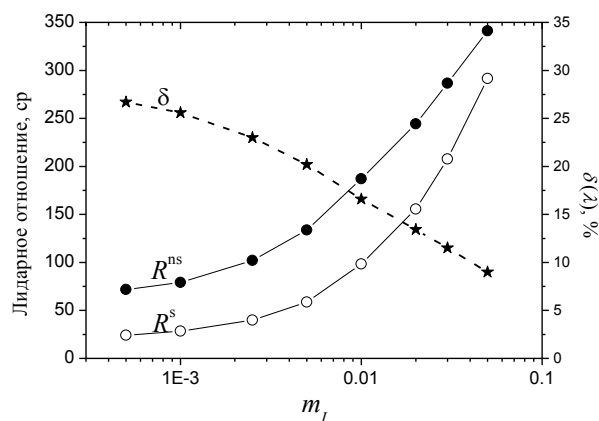


Рис. 14. Лидарное отношение сфер (R^s), сфероидов (R^{ns}) и деполяризация (δ) на длине волны 355 нм как функции мнимой части КПП для PAR_{20b} и $m_R = 1.5$

Также как и при варьировании реальной части КПП, лидарное отношение претерпевает значительное изменение в интересующем нас диапазоне значений от 0.0005 до 0.05, которые может принимать мнимая часть КПП. Согласно рис. 14 в этом случае при фиксированном значении $m_R = 1.5$ лидарное отноше-

ние растет от 71 до 340 ср для сфероидов и от 24 до 290 ср для сфер. Однако в отличие от реальной части КПП, мнимая часть существенно влияет на деполяризацию излучения. Как следует из рис. 14, деполяризация уменьшается с 27 до 9 % в рассматриваемом диапазоне изменений m_I .

Большой интерес при лидарном зондировании представляют случаи, когда наблюдаются аэрозольные смеси из частиц сферической и нерегулярной формы. Они возникают, например, при смешивании продуктов горения биомассы и минеральной пыли. В таких случаях деполяризация может служить индикатором, который указывает на степень присутствия нерегулярных частиц. Поэтому важно понимать, как влияет их содержание в смеси на уровень деполяризации. Рис. 15 показывает деполяризацию излучения на смеси сферических и сфероидных частиц в зависимости от фракции η на длинах волн 355, 532 и 1064 нм. Расчеты выполнялись для PAP_{206} при $m=1.5-i0.005$. Как следует из рис. 15, с ростом η она монотонно возрастает от 0 %, достигая максимума на уровне 26.5 % при $\lambda=1064$ нм.

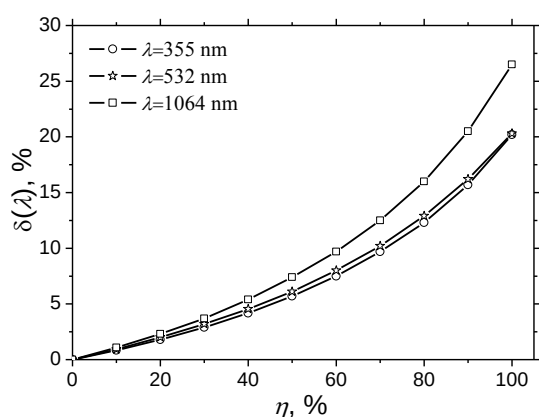


Рис. 15. Деполяризация как функция фракции сфероидов на длинах волн 355, 532, 1064 нм, $m=1.5-i0.005$

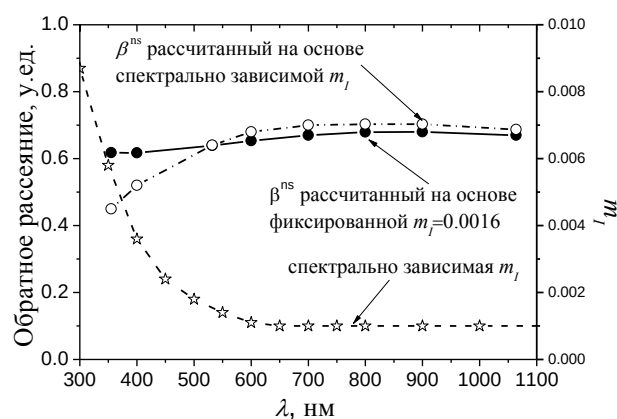


Рис. 16. Коэффициенты обратного рассеяния, рассчитанные на основе сферической модели, использующей переменную (незаштрихованный круг) и фиксированную (заштрихованный круг) мнимую часть КПП. Спектральное поведение мнимой части КПП представлено звездами, везде $m_R=1.55$

В рассмотренных до сих пор случаях предполагалось, что все частицы характеризуются спектрально независимым КПП. В природе, как правило, встречаются аэрозоли с КПП, зависящим от длины волны падающего излучения. При решении обратных задач многоволнового лидарного зондирования

этим эффектом можно пренебречь в силу слабых вариаций КПП в рассматриваемом диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм, однако в ряде случаев, в частности при анализе минеральной пыли, необходима более аккуратная количественная оценка его влияния на оптические свойства частиц. Исследования, посвященные этому вопросу, проводились в лабораторных условиях в диапазоне длин волн от ультрафиолетовой части спектра до инфракрасной [127]. В широком спектральном диапазоне осуществлялись локальные измерения мнимой части КПП с борта самолета в ходе экспедиции SAMUM-1 [107]. Большая статистика о зависимости $m(\lambda)$ для пылевых частиц была аккумулирована при измерениях, выполняемых в AERONETe в естественных условиях в различных регионах [43]. Обычно реальная часть КПП остается неизменной в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм, тогда как мнимая часть в том же диапазоне длин волн допускает широкие вариации. Рис. 16 показывает спектральную зависимость мнимой части, используемой в нашей модели: $m_I=0.001$ не меняется в диапазоне 650-1064 нм, но в коротковолновой области она растет, достигая значения $m_I=0.0058$ при $\lambda=355$ нм. Выбранная модель согласуется с данными AERONETa [43, 47] и спутниковыми наблюдениями [126].

Влияние спектрально зависимого КПП на оптические свойства сфероидов иллюстрируется на рис. 16, на котором представлено спектральное поведение общего коэффициента обратного рассеяния, рассчитанного на основе PAR_{10a} при фиксированной ($m_I = 0.0016$) и переменной (в соответствии с кривой со звездами) мнимой частью КПП. В обоих случаях реальная часть КПП составляет 1.55. Как видно из рис. 16, зависимость КПП от длины волны влияет только на коротковолновую часть спектра коэффициента обратного рассеяния, при этом разница на длине волны 355 нм достигает 33 % между представленными случаями. Это означает, что исследуемый фактор может дополнительно повлиять на размер ошибки, возникающей в решении обратных задач многоволнового лидарного зондирования, если не применять соответствующую коррекцию.

Полученные свойства ядра и оптических коэффициентов математической модели (11) позволяют провести фундаментальный анализ, связанный с оцен-

кой меры обусловленности задачи, информационного содержания данных лидарного зондирования и их линейной независимости при различных диапазонах изменения размеров частиц, комплексного показателя преломления, измерительной погрешности [136], а также с нахождением условий устойчивости и существования решения обратной задачи [15]. Детали проведенного анализа применительно к задачам лидарного зондирования, в которых математическая модель основана на привлечении теории Ми, пригодной только для сферических частиц, изложены в [140, 1]. К наиболее значимым при этом результатам можно отнести следующие выводы:

1. При уровне измерительной погрешности оптических данных g до 10 % существует не более трех коэффициентов общего обратного рассеяния g_β и двух коэффициентов ослабления g_α , которые образуют линейно независимую систему измерений, пригодную для извлечения микрофизических параметров аэрозолей.

2. Данный уровень погрешности позволяет восстановить средний размер частиц в диапазоне от 0.1 до 1.5 мкм с точностью лучше, чем 50 %, если вариации мнимой части КПП ограничены до 0.02.

3. Реальная часть КПП может быть оценена с точностью до 0.05 в узком диапазоне размеров частиц от 0.3 до 1 мкм; мнимая часть может быть оценена с точностью 50 % в случае, если её вариации не превышают более 100% от точного значения.

Исследования, выполненные в этом параграфе, показывают, что ключевые свойства сферических и сфероидных ядер близки, и в частных случаях наблюдается их сходимость. Это позволяет обобщить полученные ранее результаты [140, 1] на случай, когда применяется математическая модель, основанная на представлении аэрозолей в виде смеси сферических и сфероидных частиц.

2.4. Постановка обратной задачи. Её анализ, выбор метода решения

При лидарном зондировании измеряются коэффициенты ослабления $g_\alpha(\lambda_k)$, общего обратного рассеяния

$$g_{\beta}(\lambda_k) = g_{\beta_{\parallel}}(\lambda_k) + g_{\beta_{\perp}}(\lambda_k) \quad (22)$$

и деполяризация излучения

$$\delta(\lambda) = \frac{g_{\beta_{\perp}}(\lambda)}{g_{\beta_{\parallel}}(\lambda)} \times 100\% \quad (23)$$

на некоторых длинах волн λ_k , $k=1,2,\dots, N_{\lambda} \leq 6$. Учитывая, что при рассмотрении математической модели (11) в этом случае ядро $K_i(\lambda, m, r)$ полностью определено, а коэффициенты обратного рассеяния, поляризованного параллельно $g_{\beta_{\parallel}}(\lambda_k)$ и перпендикулярно $g_{\beta_{\perp}}(\lambda_k)$ падающему излучению, легко находятся из уравнений (22) и (23), то относительно РАР $\nu(r)$ возникает интегральное уравнение Фредгольма I рода. От используемых функций обоснованно потребовать следующие условия

$$\nu \in V \subseteq C_2[r_{\min}, r_{\max}], \quad g \in G \subseteq \ell_2, \quad \int_{\lambda_1}^{\lambda_{N_{\lambda}}} \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} [K_i(\lambda, m, r)]^2 dr d\lambda < +\infty, \quad (24)$$

где

$$\begin{aligned} 1.30 \leq m_R \leq 1.60; & \quad 0.00 \leq m_I \leq 0.05; \\ 0.05 \leq r_{\min} \leq 0.30; & \quad 0.50 \leq r_{\max} \leq 10.00; \quad [\text{мкм}] \\ \lambda_1 = 0.355 & \quad \lambda_{N_{\lambda}} = 1.064 \quad [\text{мкм}] \end{aligned} \quad (25)$$

$$0 \leq \eta \leq 1$$

В операторном виде имеет место представление

$$A(\eta, m) \nu = g, \quad (26)$$

где $A(\eta, m)$ – оператор Фредгольмовского типа I рода, зависящий от параметров η и m . Поскольку в общем случае параметры η , m , $r_{\min}$ и $r_{\max}$ неизвестны, то данное уравнение имеет неточно заданное ядро и пределы интегрирования. На практике наряду с восстановлением $\nu(r)$ также требуется оценка параметров η и m . Искомые величины в свою очередь используются для нахождения важных в климатологических исследованиях микрофизических параметров (7) и оптических свойств, таких как коэффициенты рассеяния $g_{\text{sca}}(\lambda)$ и поглощения $g_{\text{abs}}(\lambda)$, альбедо однократного рассеяния $\omega(\lambda)$:

$$g_{\text{sca,abs}}(\lambda) = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_{\text{sca,abs}}(\lambda, m, r) \nu(r) dr, \quad \omega(\lambda) = \frac{g_{\text{sca}}(\lambda)}{g_{\alpha}(\lambda)} \quad (27)$$

Здесь функции $K_{\text{sca}}(\lambda, m, r)$ и $K_{\text{abs}}(\lambda, m, r)$, также как и $K_{\alpha}(\lambda, m, r)$, являются энерге-

тическими характеристиками рассеянного излучения и выражаются через соответствующие сечения рассеяния и поглощения.

Целесообразно отметить особенности возникающего уравнения (26). Прежде всего, нахождение его решения – это классическая обратная задача, относящаяся к классу некорректных, свойства и методы решения которой хорошо изучены [18, 136, 116, 155]. Они основаны на применении такого фундаментального понятия, как регуляризация решения по Тихонову.

Рамановский лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники измеряет коэффициенты обратного рассеяния $g_\beta(\lambda)$ на длинах волн 355, 532, 1064 нм, деполяризацию излучения $\delta(\lambda)$ в том же спектральном диапазоне и коэффициенты ослабления $g_\alpha(\lambda)$ на 355 и 532 нм. Это образует набор из 5-8 измерений, по которому требуется найти функцию $\nu(r)$ как минимум в 5-8 аппроксимационных узлах [см. (30)], параметры m_R , m_I и η . Необходимо отметить, что в общем случае, когда КПП является спектрально зависимым, и отсутствует оценка оптимальных значений пределов интегрирования $r_{\min}$ и $r_{\max}$, возникает еще большее число неизвестных. Таким образом, рассматриваемая задача имеет очень ограниченный набор исходных данных и является существенно недоопределенной.

Наконец, лидарные данные характеризуется большой измерительной погрешностью. Для лидаров наземного базирования погрешность измерения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления составляет около 10 %. Для систем космического базирования она достигает 20 % и более.

Совокупность перечисленных особенностей значительно усложняет решение уравнения (26) с приемлемой точностью. Поэтому на текущий момент существуют только ограниченное число методов, которые до сих пор успешно применялись для обработки реальных данных многоволнового лидарного зондирования, причем только в частных случаях, когда отсутствует деполяризация излучения и как результат $\eta = 0$ [105, 142, 141, 32, 60]. Среди упомянутых наиболее перспективным представляется метод [141], так как существующие сравнительные исследования демонстрируют его большую надежность, точность и

скорость обработки данных. В связи с этим представляется обоснованным построение алгоритма решения уравнения (26) на основе обобщения уже реализованных идей и подходов в [141].

2.5. Алгоритм решения обратной задачи

Следуя [18], регуляризированное решение уравнения (26) в операторном виде находится по следующему правилу

$$v = [A^T(\eta, m)A(\eta, m) + \gamma H]^{-1}A^T(\eta, m)g^{e_r}, \quad (28)$$

где $A^T(\eta, m)$ – оператор, сопряженный $A(\eta, m)$, H – стабилизатор, γ – неотрицательный параметр регуляризации, оптимальное значение которого неизвестно. Символ e_r означает, что исходные данные g в уравнении (26) заданы приближённо. При выборе типа стабилизатора H мы также следуем [136], при этом требуем гладкость от 1-ой производной решения v .

Т.к. в общем случае параметры m , $r_{\min}$ и $r_{\max}$ неизвестны, правило (28) применяется по алгоритму, предложенному в [141] с учетом того, что возникает еще один неизвестный параметр η :

а) задается ряд значений η' , m' , $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$ для каждого из параметров η , m , $r_{\min}$ и $r_{\max}$, равномерно распределенных в диапазонах, на которых соответствующие параметры заданы [см. ограничения (25)]. До десяти значений для каждого из параметров m_R' , m_I' , $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$ является достаточным, что порождает до $N_v \leq 10000$ всевозможных комбинаций;

б) для каждой комбинации полученных значений находится т.н. индивидуальное решение $v^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_v \leq 10000$, по правилу (28), при этом оптимальный параметр регуляризации определяется так, чтобы обеспечить минимум модифицированной невязки [142, 1]

$$\rho(\gamma) = \|A|v(\gamma)| - g^{e_r}\|_G, \quad (29)$$

где знак $|\bullet|$ означает, что в каждой точке функции $v(\gamma)$, определяемой при некоторой γ , берётся в расчёт только абсолютное значение. На этом этапе также отбирается только одно индивидуальное решение из всех, полученных при одном

и том же наборе m_R' , m_I' , $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$, но различных значениях η' в соответствии с критерием минимума невязки (29);

в) найденные индивидуальные решения $\nu^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_\nu \leq 10000$, ранжируются по невязке (29) от минимального значения $\rho_{\min}$ до максимального $\rho_{\max}$;

г) окончательное решение $\bar{\nu}$ уравнения (26) определяется путем усреднения индивидуальных решений, имеющих модифицированную невязку, лежащую в окрестности минимального значения [13]. Обычно, этому условию удовлетворяет несколько процентов индивидуальных решений из общего числа N_ν ;

д) оценка параметров η_{cp} и m_{cp} также осуществляется усреднением предварительно заданного ряда соответствующих значений, при котором были получены усредняемые индивидуальные решения на шаге г);

е) вычисляются микрофизические параметры аэрозолей на основе усредненного решения $\bar{\nu}$, такие как эффективный размер r_{eff} , общая концентрация n_o , площадь поверхности s_o и объём v_o , а также коэффициенты рассеяния $g_{sca}(\lambda)$ и поглощения $g_{abs}(\lambda)$, альбедо однократного рассеяния $\omega(\lambda)$ по формулам (7) и (27).

2.6. Численная реализация регуляризирующего алгоритма

Для нахождения численного решения регуляризирующего алгоритма перейдем к дискретному аналогу правила (28). В связи с этим введем аппроксимацию искомой функции $\nu(r)$:

$$\nu(r) \approx \sum_{j=1}^{N_B} w_j B_j(r) \quad (30)$$

с помощью полиномов 1-ого порядка $B_j(r)$, или базисных функций, определяемых также как и полиномы $b_i(r)$ в выражении (16), но на полуинтервалах $(r_{j-1}, r_{j+1}]$ и с вершинами в узлах r_j , распределенных логарифмически эквидистантно от $r_0 = r_{\min}$ до $r_{N_B+1} = r_{\max}$. Существуют и другие способы задания базисных функций [31, 30, 117, 22], но наш выбор обусловлен жесткой привязкой к имеющемуся банку данных [см. формулу (37)].

В результате нахождение $\nu(r)$ сводится к оценке N_B весовых факторов w_j ,

$j=1, \dots, N_B$. С одной стороны, объём N_B должен быть достаточно большим, чтобы минимизировать ошибку аппроксимации. Однако с другой стороны, он должен быть согласован с объёмом исходной информации, который очень ограничен. Компромиссное значение $N_B \leq 8$ с учетом неравномерной дискретизации и «скольжения» параметров $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$ позволяет пренебречь ошибкой аппроксимации при решении обратной задачи.

Подстановка аппроксимации (30) в уравнение (11) приводит к конечной сумме вида

$$\sum_{j=1}^{N_B} [(1-\eta)a_{pj}^s(m) + \eta a_{pj}^{ns}(m)] w_j = g_p, \quad (31)$$

Здесь элемент g_p означает коэффициент обратного рассеяния или ослабления на какой-либо длине волны: $p=(i, \lambda_k)=1, 2, \dots, N_O$. Как уже отмечалось, объём N_O очень ограничен и при измерениях рамановским лидаром не превышает 5-8. Элементы $a_{pj}^s(m)$ и $a_{pj}^{ns}(m)$ определяются соотношениями

$$a_{pj}^{s,ns}(m) = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} K_p^{s,ns}(m, r) B_j(r) dr, \quad (32)$$

где $K_p^{s,ns}(m, r) = K_i^{s,ns}(\lambda_k, m, r)$. Теперь дискретный аналог рассматриваемой задачи (11) можно представить в следующей матрично-векторной форме

$$\mathbf{A}(\eta, m) \mathbf{w} = \mathbf{g} \quad (33)$$

Вектор-столбцы $\mathbf{w}$ и $\mathbf{g}$ состоят из элементов w_j и g_p соответственно, а матрица $\mathbf{A}$, зависящая от параметров η и m определяется суммой

$$\mathbf{A}(\eta, m) = (1-\eta) \mathbf{A}^s(m) + \eta \mathbf{A}^{ns}(m), \quad (34)$$

в которой матрицы $\mathbf{A}^s$ и $\mathbf{A}^{ns}$ содержат элементы $a_{pj}^s(m)$ и $a_{pj}^{ns}(m)$ соответственно. Как видно из матрично-векторной формы (33), дискретным аналогом рассматриваемой задачи (11) является решение системы из N_O линейных алгебраических уравнений и N_B неизвестных w_j , описываемых вектором $\mathbf{w}$. Отсюда вытекает важное условие, которое требует согласованный выбор N_B с N_O . Наконец, мы можем получить в соответствующей форме и искомое решение по правилу (28)

$$\mathbf{w}=[\mathbf{A}^T(\eta,m)\mathbf{A}(\eta,m)+\gamma\mathbf{H}]^{-1}\mathbf{A}^T(\eta,m)\mathbf{g}^{e_r}, \quad (35)$$

где матрица $\mathbf{A}^T$ является транспонированной к $\mathbf{A}$, символ e_r означает, что компоненты $g_p^{e_r}$ у вектора $\mathbf{g}^{e_r}$ заданы приближённо, а матрица $\mathbf{H}$ в случае гладкости 1-ой производной ν имеет структуру [136]

$$\mathbf{H}=\begin{bmatrix} 1 & -2 & 0 & . & . & . & . \\ -2 & 5 & -4 & 1 & . & . & . \\ 1 & -4 & 6 & -4 & 1 & . & . \\ 0 & -1 & -4 & 6 & -4 & 1 & . \\ . & . & . & . & . & . & . \end{bmatrix} \quad (36)$$

Открытым вопросом в дискретной постановке задачи остается вычисление элементов $a_{pj}^{s,ns}(m)$ по формуле (32). Поскольку шаг дискретизации при задании базисных функций $B_j(r)$ и $b_l(r)$ отличен, вообще говоря, элементы $a_{pj}^{s,ns}(m)$ и $\langle K_{pl}^{s,ns}(m) \rangle = \langle K_{il}^{s,ns}(\lambda_k, m) \rangle$ не совпадают при $l=j$. В связи с этим необходимо корректно ввести интерполяцию, позволяющую использовать имеющийся банк данных [45] для решения лидарных задач. Это можно сделать следующим образом.

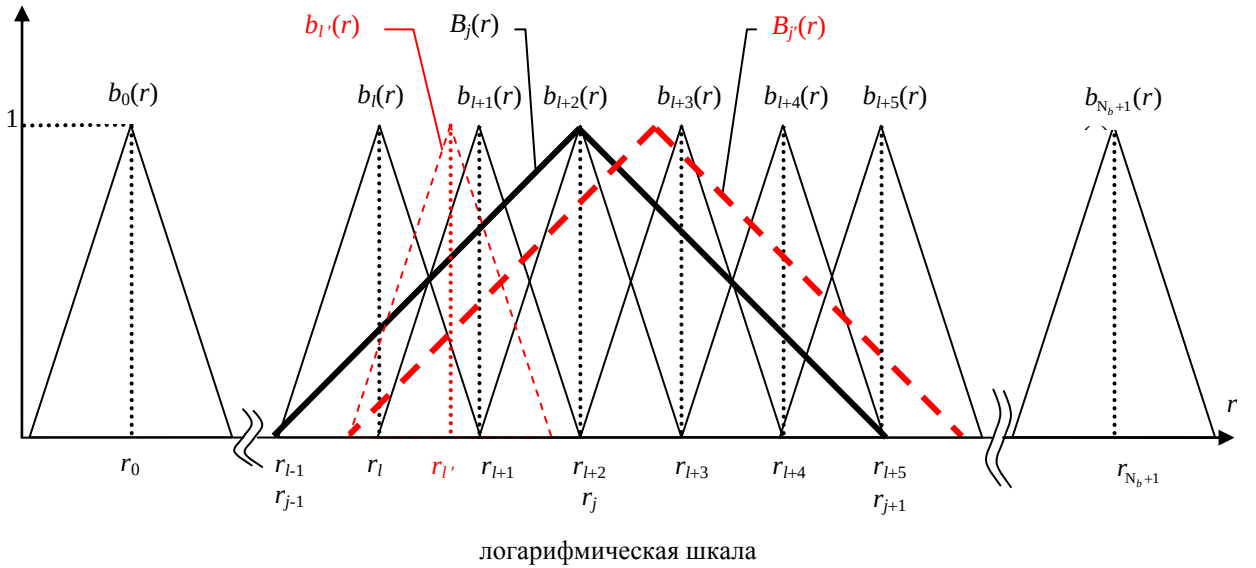


Рис. 17. Возможные случаи взаимного расположения функций $B_j(r)$, $B_j(r)$ и $b_l(r)$, $b_r(r)$.

Прежде всего, рассмотрим частный случай, когда каждый из узлов r_{j-1} , r_j , r_{j+1} базисной функции $B_j(r)$ совпадает с какими-либо узлами r_l из банка данных. На рис. 17 показан один из возможных вариантов, в котором $B_j(r)$ полностью

«накрывает» пять функций $b_l(r)$, а узлы r_{j-1} , r_j , r_{j+1} совпадают с узлами r_{l-1} , r_{l+2} , r_{l+5} соответственно. В этом случае очевидно равенство

$$B_j(r) = \sum_{l=0}^{N_b+1} B_j(r_l) b_l(r) \quad (37)$$

Тогда подставляя его в формулу (32) и имея ввиду (15), (17) получаем точную оценку

$$a_{pj}^{s,ns}(m) = \sum_{l=0}^{N_b+1} \langle K_{pl}^{s,ns}(m) \rangle B_j(r_l) \quad (38)$$

С учетом заданных диапазонов радиусов и шага дискретизации в банке данных возможны случаи, когда $B_j(r)$ полностью «накрывает» 3, 5, 7, ..., 19 функций $b_l(r)$. Это порождает около 40 инверсионных окон $[r_{\min}', r_{\max}']$, удовлетворяющих ограничениям (25). Вообще говоря, такое количество не обеспечивает наилучший результат применения метода [141], поэтому целесообразно рассмотреть случай, когда узлы r_j и r_l не совпадают.

Ясно, что произвольное определение инверсионных окон $[r_{\min}', r_{\max}']$ приводит к значительной потере точности при вычислении элементов $a_{pj}^{s,ns}(m)$ на основе $\langle K_{pl}^{s,ns}(m) \rangle$. Поэтому мы используем те же базисные функции, которые были выявлены в частном случае, с той лишь разницей, что они принимают промежуточные положения путем «скольжения» вдоль радиусного направления. Одна из функций $B_{j'}(r)$, образованная таким образом из $B_j(r)$, изображена на рис. 17 жирным пунктиром. Как видно, ей можно подобрать систему функций $b_{l'}(r)$, смещенных относительно $b_l(r)$. При таком задании базисных функций мы снова приходим к точной оценке

$$a_{pj'}^{s,ns}(m) = \sum_{l'=0}^{N_b+1} \langle K_{pl'}^{s,ns}(m) \rangle B_{j'}(r_{l'}), \quad (39)$$

где $\langle K_{pl'}^{s,ns}(m) \rangle$ определяется формулой (18). С помощью введения «скользящих» базисных функций уже возникает более 100 инверсионных окон $[r_{\min}', r_{\max}']$, удовлетворяющих ограничениям (25). Это нормальный показатель, который обеспечивает наилучшие результаты в методе [141].

Необходимо сделать ряд замечаний, касающихся вычислительных методов, используемых для программной реализации предлагаемого алгоритма. Правило (35) нецелесообразно решать «в лоб» путем обращения матрицы $[A^T(\eta, m)A(\eta, m) + \gamma H]$, например, методом Жордана-Гаусса. С точки зрения производительности, скорости счета и других возможностей, связанных с оптимизацией вычислений, наиболее предпочтительным выглядит метод LU-декомпозиции решения систем линейных алгебраических уравнений.

Вычисление определенных интегралов (7) для оценки микрофизических параметров на основе усредненного решения $\bar{v}$ может быть сделано с помощью метода Симпсона. Он обеспечивает при шаге интегрирования 0.01 мкм погрешность, которая пренебрежимо мала. Указанные методы подробно описаны в [2].

Наконец, важная особенность возникает при вычислении невязки (29). Попытка применить известное определение Евклидовой нормы приведет к результату, лишенному физического смысла, поскольку коэффициенты обратного рассеяния и ослабления имеют различную размерность. Чтобы учесть эту особенность, мы используем следующую нормировку

$$\rho = \frac{1}{N_o} \sum_{p=1}^{N_o} \frac{|g_p^{inv} - g_p^{e_r}|}{g_p^{e_r}}, \quad (40)$$

где элементы g_p^{inv} представляют вектор $\mathbf{g}^{inv} = \mathbf{A}|\mathbf{w}|$ [см. также замечание к формуле (29)], описывающие пространство оптических данных, порождаемых полученными решениями.

Рассмотренные аспекты численной реализации алгоритма позволяют разработать программный комплекс и на его основе провести численный эксперимент.

2.7. Численный эксперимент

Для проверки корректности алгоритма решения обратной задачи (26), стабильности его работы и устойчивости к возмущениям в исходных данных проводится математическое моделирование. В рамках математического моде-

лирования сначала решается прямая задача (11), в которой предварительно заданы параметров m , η , тестовые РАР (см. табл. 5). Затем на основе решения прямой задачи формируются исходные данные для обратной задачи. В качестве исходных данных используется т.н. набор $3\beta+2\alpha$, состоящий из трех коэффициентов общего обратного рассеяния на длинах волн 355, 532 и 1064 нм, двух коэффициентов ослабления на длинах волн 355 и 532 нм. При наличии нерегулярных частиц к этому набору может быть добавлена деполяризация δ на трех длинах волн. Выбор указанных исходных данных обусловлен особенностями конфигурации относительно простого, и потому наиболее распространенного, многоволнового рамановского лидара на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники [24, 90].

РАР, восстановленные на основе невозмущенного набора $3\beta+2\alpha$ и известной $\eta=1$, показано на рис. 18. При генерации исходных данных для обратной задачи использовались тестовые бимодальные распределения РАР_{10a} и $m=1.55-i0.001$ (рис. 18а), РАР_{10b} и $m=1.5-i0.005$ (рис. 18б), РАР_{20a} и $m=1.5-i0.005$ (рис. 18в). Восстановленные РАР близки к тестовым, при этом ошибка в оценке общего объема v_0 составляет менее 5%, а оценка для КПП – $1.57-i0.001$ в первом случае и $1.52-i0.007$ в двух последних.

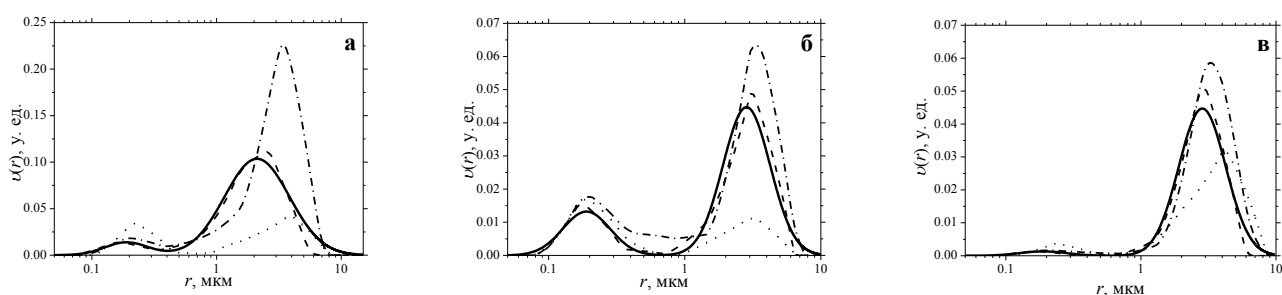


Рис. 18. Восстановление РАР, включающее только сфероиды, на основе только сфероидных или сферических ядер. Сплошная линия – тестовое РАР; пунктирная – РАР, восстановленное со сфероидными ядрами; штрихпунктирная – РАР, восстановленное со сферическими ядрами; точечная – РАР, восстановленное со сферическими ядрами при известном КПП. Тестовыми являются РАР_{10a} , (а), РАР_{10b} , (б), РАР_{20a} , (в)

Рис. 18 также показывает решение обратной задачи в предположении, что все частицы являются сферическими, т.е. $\eta=0$. В результате ошибка в оценке общего объема аэрозолей v_0 достигает в первом случае 48 % и по 25% в двух последних. Это хуже аналогичного показателя, оцениваемого с помощью сфе-

роидной модели, но лучше, чем можно было ожидать в результате анализа, проведенного в параграфе 2.3 (см. рис. 8, 9, 10). Более того, характерные свойства бимодального РАР также могут воспроизводиться, как и в случае, когда применяется сфероидные ядра. Однако большая ошибка возникает при оценке КПП: восстановленные значения составляют $1.43-i0.004$ в первом случае и $1.37-i0.008$ в двух последних. Как видно, реальная часть значительно недооценена, а мнимая часть, наоборот, переоценена, хотя последний факт является свойственным для рассматриваемых задач. Попытка восстановить РАР с использованием только сферической модели аэрозолей и известного m ведет к более худшему результату, при котором грубая мода не воспроизводится должным образом.

Относительно небольшая ошибка восстановления общего объема с помощью сферических ядер становится понятна из сравнения ядер $\langle K_{\beta l}^{ns}(\lambda, m) \rangle$ и $\langle K_{\beta l}^s(\lambda, m) \rangle$, выполненного в параграфе 2.3. Как было показано, для различных значений реальной части КПП: $\langle K_{\beta l}^{ns}(\lambda, m) \rangle < \langle K_{\beta l}^s(\lambda, m) \rangle$, однако ядра обратного рассеяния сфер быстро уменьшаются при падении m_R , и в некоторых радиусных интервалах сфероидные ядра с большим значением $m_R \approx 1.5$ совпадают со сферическими ядрами с малым значением $m_R \approx 1.4$ (см. рис.7). Ядра также сходятся, если одновременно для сфер мнимая часть КПП принимает высокие значения, а у сфероидов, наоборот, – малые. Это означает, что использование сферической модели для восстановления параметров пылевых частиц может вести к разумной оценке размера и объема частиц, при этом реальная часть КПП будет недооценена, а мнимая, наоборот, – переоценена.

На рис. 19 демонстрируется влияние спектрально зависимого КПП на точность решения обратной задачи. В этом случае при формировании исходных данных для обратной задачи используется зависимость КПП от длины волны, изображенная на рис. 16. Как видно из рис. 19, данный фактор ухудшает качество восстановления РАР, и, как следствие, ошибка в оценке общего объема аэрозолей увеличивается с 5 до 17 %. Восстановленное значение КПП составляет

около $m=1.55-i0.003$, из чего можно заключить, что алгоритм дает среднюю оценку мнимой части КПП из всех значений, наблюдаемых на заданном диапазоне длин волн.

Влияние спектрально зависимого КПП на точность решения обратной задачи усиливается при рассмотрении крупных частиц. В этом случае рост мнимой части КПП при 355 нм оказывает больший эффект на обратное рассеяние. В результате для PAR_{20a} ошибка восстановления общего объёма увеличивается до 25 %.

Несмотря на незначительное влияние спектрально зависимого КПП на точность решения обратной задачи, разработанный алгоритм может быть модифицирован так, чтобы снизить негативный эффект. Для этого на шаге 2.5.б алгоритма вместо фиксированной m_I задается спектрально зависящая мнимая часть. При этом $m_I(532)$ принимает текущее значение из предварительно заданного ряда на шаге а), а на длинах волн 355 и 1064 нм мнимая часть вычисляется, используя отношения $m_I(355)/m_I(532)$ и $m_I(532)/m_I(1064)$ соответственно, которые вытекают из модельного поведения (см. рис. 16). Решение, полученное с помощью модифицированного алгоритма, также показано на рис. 19. В результате его применения ошибка в оценке общего объёма уменьшается до 7 %, а восстановленное значение КПП оценивается около $m=1.56-i0.002$ на длине волны 532 нм, что близко к модельному значению $m(532)=1.55-i0.0016$.

Предлагаемая коррекция алгоритма решения обратной задачи позволяет учитывать в решении спектральную вариацию КПП. У реальной пыли КПП обладает и другими свойствами, которые могут усложнять используемый алгоритм и его коррекцию. К ним относится зависимость КПП от размера частиц, который различен у ярко выраженной и грубой мод. Также КПП может зависеть от их формы, когда сферическая и асферическая фракции представлены частицами различного происхождения. Чтобы ввести соответствующую коррекцию в алгоритм, необходимо выбрать подходящую модель. При наличии такой модели представленный здесь алгоритм можно модифицировать аналогичным образом, как это было сделано в случае со спектрально зависимым КПП.

Рамановский лидар, также как и лидар высокого спектрального разрешения, обеспечивает данными с точностью около 10-20 %. Поскольку задача некорректна, ошибка алгоритма в оценке параметров аэрозолей очень чувствительна к возмущению в исходных данных. Для оценки влияния измерительной погрешности на размер ошибки алгоритма исходные данные возмущаются случайным образом по равномерному закону так, что относительная погрешность e_r на каждой длине волны может достичь $e_r^{\max}$:

$$|e_r| = 100\% \times |g_i^{e_r} - g_i| / g_i \leq e_r^{\max} \quad i = \alpha, \beta_{\parallel}, \beta_{\perp} \quad (41)$$

Один и тот же набор $3\beta+2\alpha$ подвергается возмущению много раз, после чего каждая реализация обрабатывается с помощью предлагаемого алгоритма. Чувствительность алгоритма к возмущению исходных данных при $e_r^{\max} = 10\%$ иллюстрируется на рис. 20, на котором показано десять РАР, соответствующих различным реализациям случайных возмущений. Очевидно, что восстановление ярко выраженной моды вполне стабильно, а рассеяние решений в диапазоне размеров частиц более 5 мкм становится большим.

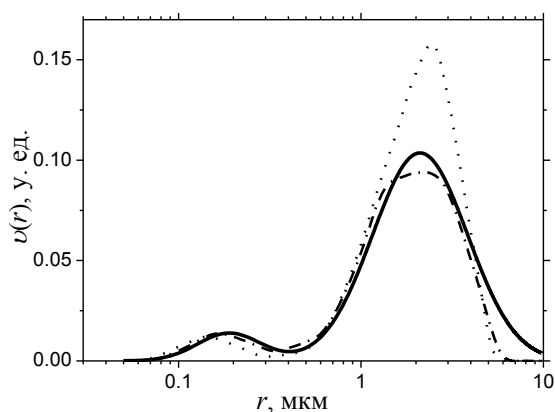


Рис. 19. РАР, восстановленные в предположении спектрально независимой мнимой части КПП (точка) и с учетом спектрально зависимой мнимой частью (штрих-пунктир). Сплошная линия – тестовое РАР

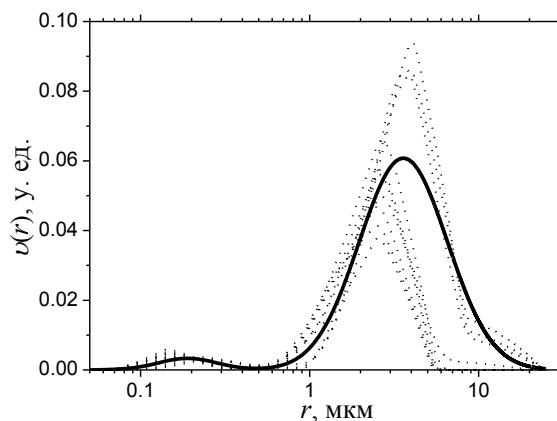


Рис. 20. РАР, восстановленные для 10 реализаций возмущенного набора $3\beta+2\alpha$ с уровнем погрешности 10 %. Сплошная кривая – тестовое РАР

Результаты моделирования, выполненного для различных типов РАР с возмущением в исходных данных $e_r^{\max}$ до 10 и 20 %, суммируются в табл. 6. В ней приводится ошибка алгоритма для различных параметров аэрозолей с вероятностью не ниже 90%. Общий объём и эффективный радиус аэрозолей для РАР_{10а} при возмущении $e_r^{\max}$ до 10 % восстанавливаются с точностью не хуже

$e_r^{r_{eff}, v_0}=30\%$, общая концентрация – $e_r^{n_0}=60\%$. Увеличение радиуса частиц повышает ошибку восстановления общего объёма и эффективного радиуса для PAP_{20a} , но она все еще остается ниже 45 %. Наиболее стабильным параметром в восстановлении является общая площадь поверхности, точность которой составляет около $e_r^{s_0}=12\%$ для обоих типов РАР. Увеличение возмущения e_r^{max} до 20 % приблизительно удваивает погрешность восстановления указанных параметров. Оценка реальной части КПП возможна с точностью $e_r^{m_R}=\pm 0.04$ при возмущении e_r^{max} до 10 %. Наиболее проблематичной представляется оценка мнимой части КПП. Если её реальное значение превышает 0.005, точность оценки составляет около 50 %, в противном случае удастся оценить только верхнюю границу.

Таблица 6.

Ошибка алгоритма при оценке параметров аэрозолей по оптическим данным, измеренным с погрешностью e_r^{max}

Тип РАР	e_r^{max}	$e_r^{v_0}$	$e_r^{s_0}$	$e_r^{n_0}$	$e_r^{r_{eff}}$	$e_r^{m_R}$
PAP_{10a}	10%	25%	12%	60%	30%	± 0.04
PAP_{10a}	20%	50%	25 %	110 %	60 %	± 0.05
PAP_{20a}	10 %	40 %	12 %	80 %	45 %	± 0.04

Еще одним важным аспектом при применении нового алгоритма является роль деполяризации в восстановлении параметров аэрозолей. Представленные результаты были получены на основе набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ при условии, что известна фракция сфероидов η , равная 1. Близкие результаты наблюдаются и при использовании набора $3\beta+2\alpha+1\delta$. В принципе многоволновой лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники может обеспечить измерения деполяризации излучения на трех длинах волн, однако расширение набора оптических данных до $3\beta+2\alpha+2\delta$ или $3\beta+2\alpha+3\delta$ также не ведет к значительному улучшению результатов. Это объясняется тем, что ядра ослабления и обратного рассеяния, поляризованного перпендикулярно падающему излучению, очень близки по своему поведению (см. рис. 3б и 6), и добавление

последних не привносит новой информации, полезной для решения обратной задачи.

Ситуация меняется, если параметр η неизвестен и должен быть оценен, другими словами, частицы представляют собой смесь сфер и случайно ориентированных сфероидов. Такая ситуация возникает, когда, например, пыль, образованная над пустыней, подвергается переносу на большие расстояния в атмосфере, смешивается с частицами другого типа (морскими аэрозолями или продуктами горения биомассы) и модифицируется вследствие химических процессов и изменения влажности. В результате существенная часть частиц может быть представлена сферами. Как было показано в параграфе 2.3 (см. рис. 8), сферы образуют примерно удвоенное обратное рассеяние по сравнению со сфероидами, поэтому присутствие нерегулярных частиц (сфероидной фракции) может быть завуалировано. Чувствительность деполяризации излучения в зависимости от фракции нерегулярных частиц исследована в [132].

Значимость привлечения деполяризации в этом случае иллюстрируется на рис. 21, который показывает результаты работы алгоритма при использовании набора $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+2\alpha+1\delta$. Исходные данные для обратной задачи формируются при $m=1.55-i0.005$, $\eta=0.6$ и $\lambda=355$ нм для расчета деполяризации. РАР, восстановленное на основе набора $3\beta+2\alpha+1\delta$, близко к тестируемому, в результате чего общий объём оценивается с точностью до 5 %. Однако при использовании набора $3\beta+2\alpha$ соответствующая точность ухудшается до 25 %, а оценка КПП $m=1.51-i0.007$ отличается от точного значения.

Причины, объясняющие возникающую разницу, могут быть выявлены в результате углубленного анализа пространства решений обратной задачи. Рис. 21 показывает его структуру, на котором изображена сфероидная фракция, восстановленная по наборам оптических данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, как функция номера индивидуального решения q , которое имеет невязку, рассчитываемую по формуле (29), в окрестности минимального значения. Интервал усреднения включает 100 индивидуальных решений с наименьшей невязкой, что составляет около 1% от всего их количества. Объёмная фракция η , восстановлен-

ная по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$, является стабильной и совпадает с тестируемым значением 60 % для всех индивидуальных решений, участвующих в усреднении. В отсутствии деполяризации фракция η осциллирует и её среднее значение около 35 % ниже тестируемого. Необходимо отметить, что осцилляции η оказывают негативное воздействие на оценку действительной части КПП, что в свою очередь, как ранее было указано, влияет на восстановление общего объёма частиц.

Проверка алгоритма также проводится в условиях неизвестного параметра η и возмущенного набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ с уровнем погрешности 10 %. Из полученных результатов мы можем сделать вывод, что погрешность алгоритма при оценке параметров смеси, состоящей из сфер и сфероидов, аналогична той, которая наблюдалась при моделировании со сфероидами (см. табл. 6).

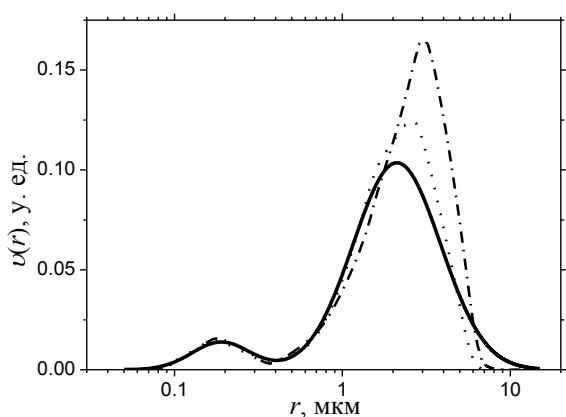


Рис. 21. Восстановление РАР, состоящее из смеси сфер и сфероидов, на основе набора $3\beta+2\alpha$ (пунктир) и $3\beta+2\alpha+1\delta$ (точка). Сплошная кривая – тестовое РАР

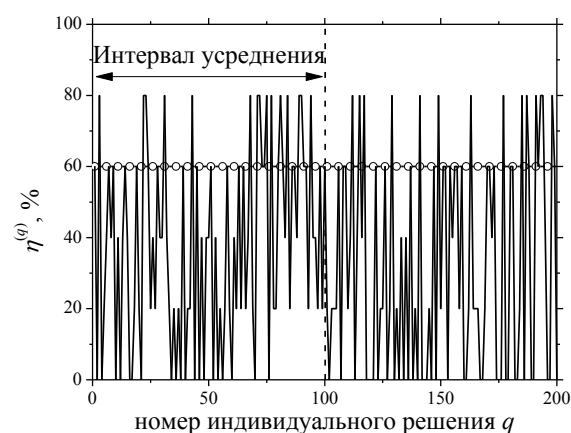


Рис. 22. Объёмная фракция сфероидов как функция номера индивидуального решения с невязкой в окрестности минимального значения. Решения, полученные по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$ – незаштрихованный маркер, $3\beta+2\alpha$ –, сплошная кривая

Принимая во внимание свойства ядер обратного рассеяния, поляризованного перпендикулярно падающему излучению, которые близки свойствам ядер ослабления, мы проводили моделирование для набора оптических данных $3\beta+3\delta$ вместо $3\beta+2\alpha$. Моделирование показывает, что в принципе набор $3\beta+3\delta$ позволяет извлечь информацию как о микрофизических параметрах аэрозолей, так и о КПП. Данный факт может быть использован на пути дальнейшего упрощения лидарных систем, в которых отсутствует канал для измерения коэффициентов ослабления. Однако необходимо иметь в виду, что если общее об-

ратное рассеяние сфероидной модели вполне хорошо согласуется с аналогичной характеристикой реальных пылевых аэрозолей, то невязка между экспериментальными и моделируемыми данными для деполяризации при этом может иметь большее значение. Например, на рис. 8 в [45] заметна разница между отношением элементов рассеивающей матрицы Мюллера P_{22}/P_{11} , полученным из экспериментальных данных [146] и рассчитанным на основе сфероидной модели. Чтобы понять, как аккуратно сфероидная модель воспроизводит деполяризацию обратного рассеяния, необходимо проведение большего числа лабораторных измерений на углах, близких к 180° , и для различных типов пыли. Насколько нам известно, на сегодняшний день экспериментальные данные такого рода отсутствуют.

Выполненные теоретические исследования и численное моделирование позволяют перейти к следующему этапу апробации алгоритма, включающему обработку экспериментальных данных, сравнение получаемых результатов с независимыми измерениями и их интерпретацию (см. гл. 5).

2.8. Оценка погрешности восстановления коэффициентов рассеяния, поглощения и альбедо однократного рассеяния

Проведенный численный эксперимент демонстрирует оптимистичные результаты в оценке эффективного размера, общих концентрации, площади поверхности и объёма по оптическим данным $3\beta+2\alpha$, измеряемым с точностью до $e_r^{\max} = 20\%$. Также показана возможность восстановления реальной и мнимой части КПП. Однако погрешность последней в отсутствии априорной информации может достигать 50% и более. В то же время такие важные целевые параметры в климатологических исследованиях, как коэффициенты рассеяния g_{sca} , поглощения g_{abs} и альбедо однократного рассеяния ω аэрозолей весьма чувствительны к вариациям мнимой части КПП. Поэтому исследуем более тщательно вопрос о влиянии измерительной погрешности $e_r^{\max}$ исходных оптических данных $3\beta+2\alpha$ и неопределенности в m_I на оценку g_{sca} , g_{abs} и ω [81].

В результате решения задачи (26) с возмущенными исходными данными

$3\beta^{er}+2\alpha^{er}$ мы находим индивидуальное решение $\nu^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_\nu$, которое в свою очередь используется для определения исследуемых параметров по формулам (27) и оптических данных $3\beta^{inv}+2\alpha^{inv}$ [см. формулу (40)]. Ясно, что точность их определения зависит от того, насколько аккуратно восстанавливается ν и КПП.

Качество «воспроизводства» коэффициента ослабления α^{inv} легко тестируется путем сравнения его с исходным значением α^{er}

$$\rho_\alpha = (\alpha^{inv} - \alpha^{er}) / \alpha^{er} \times 100 \%, \quad (42)$$

где ρ_α – т.н. индивидуальная невязка. Этот параметр является ключевым при восстановлении ν и для усредняемых индивидуальных решений не превышает нескольких процентов. По этой причине отклонение α^{inv} от невозмущенного, истинного значения α близко к уровню измерительной погрешности лидара

$$e_r^\alpha = (\alpha^{inv} - \alpha) / \alpha \times 100 \% \approx e_r^{\max} \quad (43)$$

В случае коэффициентов рассеяния и поглощения априорная информация, которую можно было бы использовать для проверки качества их восстановления, отсутствует. Для выполнения дальнейших выкладок воспользуемся примечательным свойством, в соответствии с которым потеря энергии излучения, падающего на частицу, идет на рассеяние и тепло, возникающее в ней [72]:

$$g_{sca} + g_{abs} = g_\alpha \quad (44)$$

При зондировании обычной атмосферы аэрозоли являются слабо поглощающими, коэффициент поглощения аэрозолей много меньше коэффициента рассеяния $g_{abs} \ll g_{sca}$ или

$$\varphi = g_{abs} / g_{sca} \leq 0.1, \quad (45)$$

поэтому из свойства (44) вытекает, что $g_{sca} \rightarrow g_\alpha$. Из этого следует и соизмеримость погрешностей, с которыми два последних коэффициента восстанавливаются (см. также рис. 24б):

$$e_r^{sca} = (g_{sca}^{inv} - g_{sca}) / g_{sca} \times 100 \% \geq e_r^\alpha \approx e_r^{\max} \quad (46)$$

Зная погрешность восстановления коэффициентов рассеяния и ослабления, мы можем найти и погрешность оценки АОР из определения (27):

$$e_r^{\omega} = \left(\frac{g_{sca}^{inv}}{g_{\alpha}^{inv}} - \omega \right) / \omega \times 100\% \approx 2e_r^{\alpha} \approx 2e_r^{\max} \quad (\text{здесь } e_r^{\alpha} \ll 100!) \quad (47)$$

Другими словами, в худшем случае следует ожидать удвоение погрешности оценки ω по сравнению с погрешностью лидарных измерений. К сожалению, эта оценка не является окончательной, поскольку кроме измерительной погрешности $e_r^{\max}$, существует дополнительная неопределенность вследствие не точно известной мнимой части КПП. Оценим её влияние на точность восстановления АОР. Для этого представим последний в другом виде. Подставляя (44) в (27), получим выражение

$$\omega = \frac{g_{sca}}{g_{sca} + g_{abs}}, \quad (48)$$

которое позволяет оценить погрешность АОР через погрешность коэффициента поглощения e_r^{abs} :

$$e_r^{abs} = (g_{abs}^{inv} - g_{abs}) / g_{abs} \times 100 \% \quad (49)$$

На основе выражений (48), (49) и обозначения (45) имеем

$$e_r^{\omega} = \left(\frac{g_{sca}}{g_{sca} + g_{abs}^{inv}} - \frac{g_{sca}}{g_{sca} + g_{abs}} \right) / \omega = \frac{e_r^{abs}}{1 + \varphi^{-1} + e_r^{abs}} = \varphi e_r^{abs} \quad (50)$$

(здесь $e_r^{abs} \ll \varphi^{-1} \times 100\%$!)

Чтобы прийти к окончательному выражению, воспользуемся еще одним фундаментальным свойством, согласно которому в наших условиях (25) коэффициент поглощения приблизительно пропорционален мнимой части КПП при не больших вариациях её абсолютных величин (см. например, рис. 13.16 в [3], а также здесь рис. 25а,б)

$$e_r^{abs} \approx k e_r^{m_I}, \quad (51)$$

где k – некоторая константа. Подставляя этот результат в (50), мы найдем связь между неопределенностью АОР и мнимой части КПП

$$e_r^{\omega} \approx k \varphi e_r^{m_I} \quad (52)$$

Она предсказывает, что при $k=1$, когда восстановленное значение m_I отличается от истинного в два раза ($e_r^{m_I} = 100\%$) ошибка в оценке ω будет 10 %.

Интересный результат возникает, если выражение (44) подставить в (49) с учетом ошибки (46):

$$e_r^{\text{abs}} = (e_r^\alpha g_\alpha - e_r^{\text{sca}} g_{\text{sca}}) / g_{\text{abs}} \geq 2\varepsilon_{\text{sca}} \varphi^{-1} \geq 2 \varphi^{-1} e_r^{\text{max}}, \quad (53)$$

из которого следует, что какой бы ни была погрешность оценки коэффициента рассеяния, погрешность коэффициента поглощения будет на порядок больше для слабо поглощающих частиц (см. также рис. 24в).

Ошибки (47) и (52) описывают факторы и степень их влияния независимо друг от друга на точность оценки АОР. В строгом смысле их суперпозиция должна быть принята для получения полной ошибки, однако необходимо принять во внимание «компенсационный эффект» при определенных сочетаниях ошибок, возникающих в рассматриваемых нами задачах, а также специальные процедуры, например усреднения, которые мы используем для анализа пространства решений. Проиллюстрируем полученные нами результаты на примере статистики, накопленной в ходе численного моделирования, выполненного при уровне погрешности оптических данных $e_r^{\text{max}} = 0, 10$ и 20 %. Параметры мономодального тестового РАР приняты следующие: $r_1 = 0.26$ мкм, $\ln \sigma_1 = 0.4$, $m_R = 1.4$, $m_I = 0.005$, $\varphi = 0.05$.

Рис. 23 и 25а представляют графический анализ пространства индивидуальных решений, полученных при решении задачи (26), в которой нет никаких ограничений на мнимую часть КПП. Мы видим только несколько процентов из всего числа индивидуальных решений, имеющих невязку (40) в окрестности минимального значения, которая в данном случае не превышала $\rho_{\text{cp}} = 5$ %. Они показывают относительные отклонения (погрешности) АОР (а), коэффициента рассеяния (б) и поглощения (в) на длине волны $\lambda = 355$ нм в зависимости от ошибки в оценке коэффициента ослабления (43) на той же длине волны. Треугольные маркеры описывают погрешности, полученные при возмущении оптических данных до $e_r^{\text{max}} = 0$ %, ромбы – до 10 % и квадраты – до 20 %.

Рис. 23 показывает, что, несмотря на малый интервал усреднения ($\rho_{\text{cp}} = 5$ %), индивидуальная невязка для коэффициента ослабления на 355 нм ρ_α

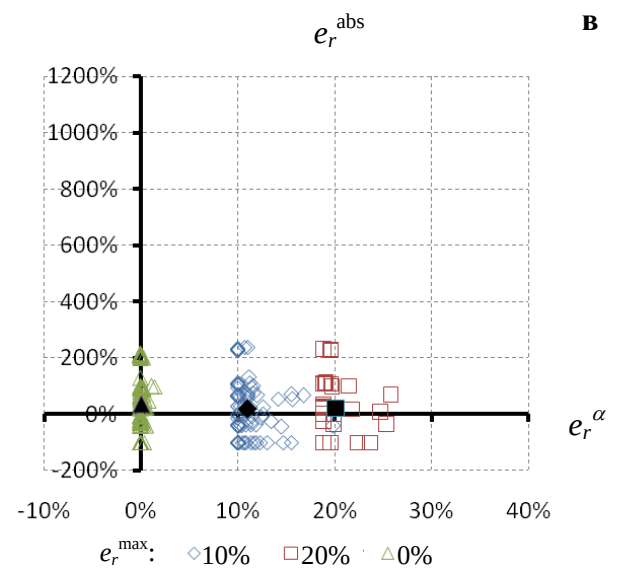
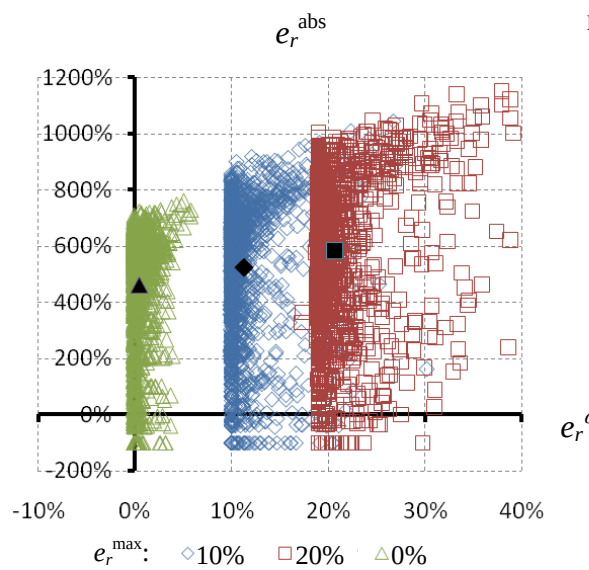
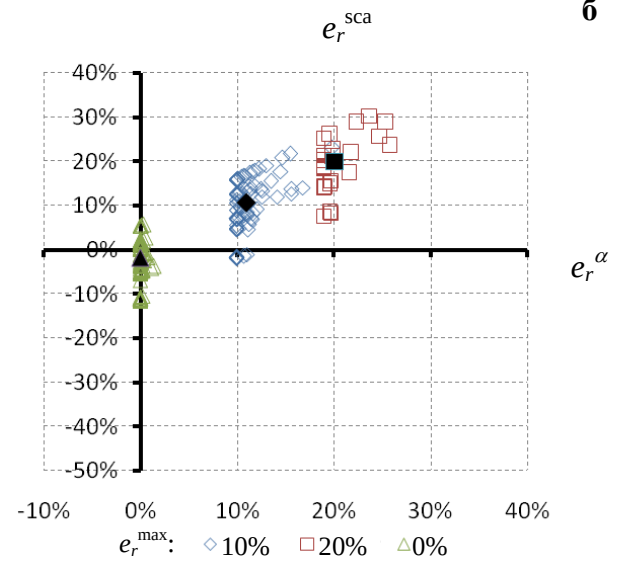
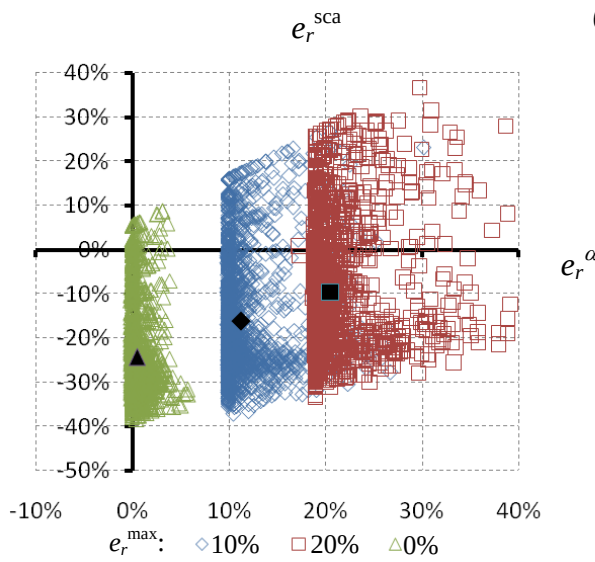
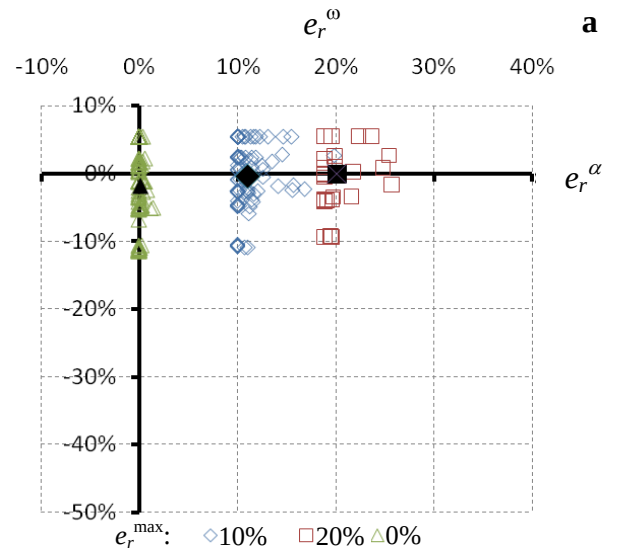
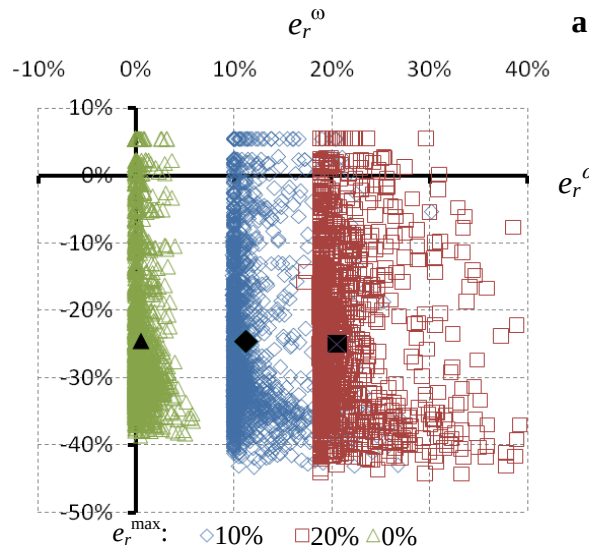


Рис. 23. Анализ пространства решений, полученных при возмущениях оптических данных до $e_r^{\max}$ без ограничений на m_l . Черный маркер – усредненное значение

Рис. 24. Анализ пространства решений, полученных при возмущениях оптических данных до $e_r^{\max}$ с ограничениями на m_l . Черный маркер – усредненное значение

может быть 3 % для случая с $e_r^{\max}=0$ %, 10 % для случая с $e_r^{\max}=10$ % и до 20 % для случая с $e_r^{\max}=20$ %. Одновременно погрешность исследуемых параметров достигает 40 % и более для АОР и коэффициента рассеяния (по модулю) независимо от измерительной погрешности. Для коэффициента поглощения погрешность составляет 800, 1000 и 1200 % для случаев с $e_r^{\max}=0, 10$ и 20 % соответственно. Близкая ошибка в оценке ω и g_{sca} для различных погрешностей в оптических данных может означать, что главный фактор, влияющий на их точность, обусловлен неопределенностью в мнимой части КПП. Даже применение процедуры усреднения (соответствующие решения обозначены черными маркерами) не позволяет получить приемлемый результат.

Поскольку при $e_r^{\max}=0$ % отсутствует измерительная погрешность, полная погрешность в рассматриваемых параметрах является следствием только неопределенности в $e_r^{m_I}$. В частности, в этом случае рис. 23в показывает, что погрешность в определении коэффициента поглощения достигает 800 %. В соответствии с формулой (50) она ведет к $e_r^{\omega} \approx 0.05 \times 800 \% = 40$ %. Аналогичный уровень иллюстрируется рис. 23а.

Рис. 25а показывает погрешность в оценке коэффициента поглощения при различных возмущениях $e_r^{\max}=0, 10$ и 20 % в зависимости от неопределенности в мнимой части КПП. На этом рисунке хорошо различимы интервалы, где выполняется соотношение (51). Например, мы находим $k \approx 1$ при $|e_r^{m_I}| < 100\%$.

Следующий важный вопрос, каков вклад величины возмущений оптических данных в уровень погрешности АОР, коэффициента рассеяния и поглощения? На этот вопрос можно ответить, если рассмотреть индивидуальные решения, приведенные нами на рис. 23 и 25а, но ограниченные неопределенностью в m_I до 100 %. Применение такого ограничения образует подпространство индивидуальных решений, представленных на рис. 24 и 25б-г. Эти рисунки показывают такие же параметры, как и рис. 23 и 25а. Теперь погрешность исследуемых параметров значительно сократилась. Например, e_r^{sca} варьируется до 20 % при $e_r^{\max}=10$ % и до 30 % при $e_r^{\max}=20$ % (см. рис. 24б). Как было показано ана-

литически, точность оценки коэффициента рассеяния не может быть лучше, чем погрешность, с которой коэффициент ослабления извлекается из лидарных данных [см. формулу (46)].

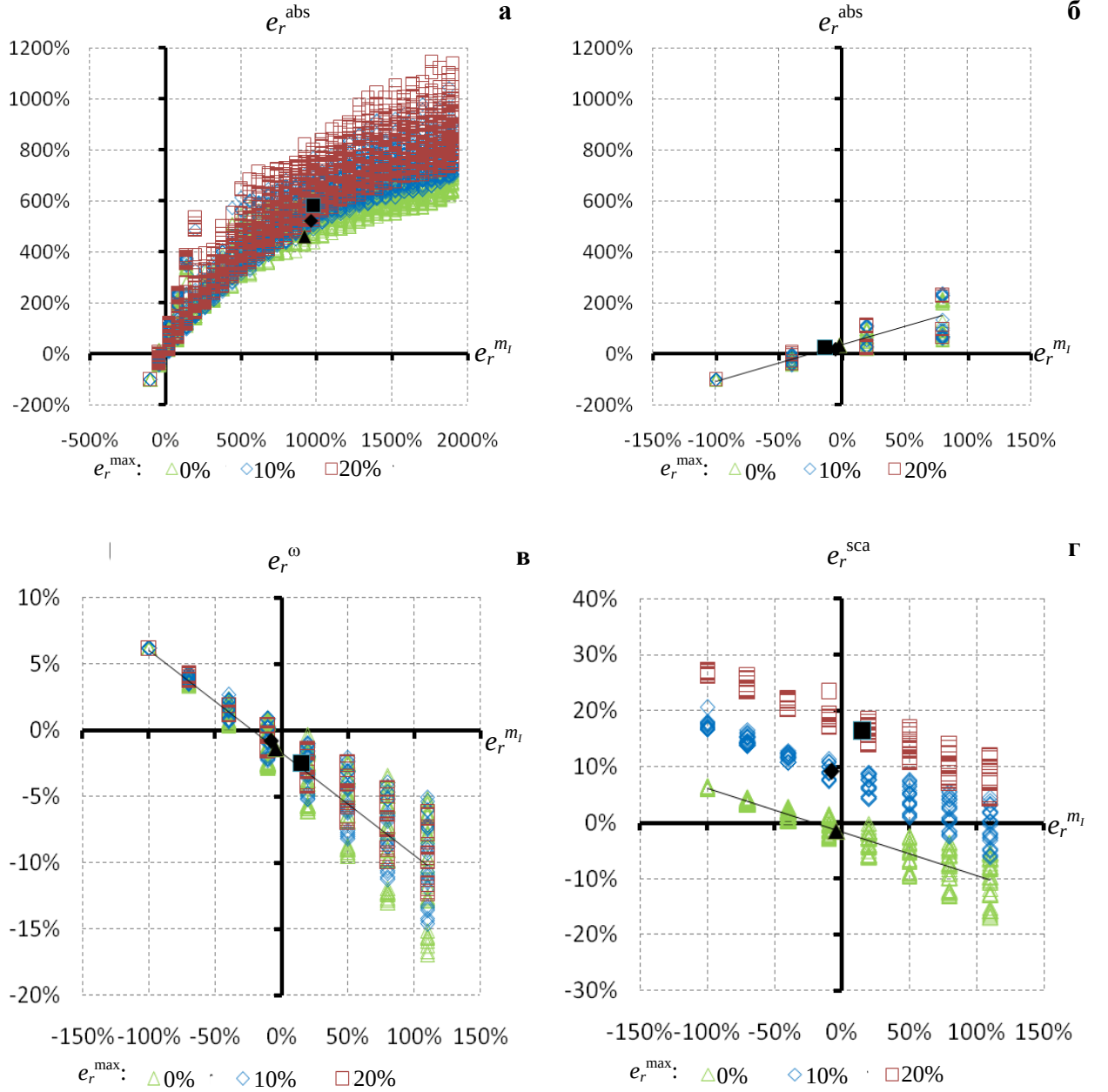


Рис. 25. Анализ пространства решений, полученных при возмущениях оптических данных до e_r^{max} без ограничений (а) и с ограничениями (б, в, г) на m_I . Черный маркер – усредненное значение

Погрешность e_r^{ω} при возмущениях $e_r^{max}=10\%$ и 20% даже меньше, чем та, которая наблюдается при оценке коэффициента рассеяния (см. рис. 24а). Она не превышает 11% , что не вполне согласуется с формулой (47). Это объясняется тем, что оба коэффициента, как ослабления, так и рассеяния, переоцене-

ны одновременно, приводя к «компенсационному эффекту» за счет «сокращения» ошибок и, как следствие, к улучшению результатов.

Погрешность e_r^{abs} , как показано на рис. 24в, составляет около 200 %, что на порядок превышает e_r^{α} , как это и предполагалось [см. оценку (53)]. Рис. 25б-г иллюстрируют корреляции между погрешностями в оценке коэффициентов поглощения (б) и рассеяния (г) и АОР (в).

Отметим еще раз эффективность используемой нами процедуры усреднения пространства индивидуальных решений, которая обеспечивает подавление обоих видов неопределенности в исходных данных для задачи (26). На рис. 23-25 соответствующие решения обозначены черными символами.

Таблица 7.

Ошибка алгоритма при оценке АОР, коэффициентов рассеяния и поглощения атмосферных аэрозолей при возмущениях оптических данных до e_r^{max} и неопределенности мнимой части КПП $e_r^{m_i}$.

Неопределенность $e_r^{m_i}$, %	e_r^{abs} , %	e_r^{sca} , %	e_r^{ω} , %
$e_r^{\text{max}} = 0\%$			
$0 \leq e_r^{m_i} \leq 25$	34	2	2
$25 < e_r^{m_i} \leq 50$	47	3	3
$50 < e_r^{m_i} \leq 100$	93	6	6
$e_r^{\text{max}} = 10\%$			
$0 \leq e_r^{m_i} \leq 25$	43	11	3
$25 < e_r^{m_i} \leq 50$	61	10	4
$50 < e_r^{m_i} \leq 100$	98	10	6
$e_r^{\text{max}} = 20\%$			
$0 \leq e_r^{m_i} \leq 25$	57	23	3
$25 < e_r^{m_i} \leq 50$	67	23	4
$50 < e_r^{m_i} \leq 100$	108	21	6

На основе проведенного масштабного моделирования для различных типов РАР и значений КПП мы сформировали статистику решений для исследуемых параметров в табл. 7. Она показывает ожидаемую погрешность оценки

АОР, коэффициентов рассеяния и ослабления в зависимости от неопределенности в мнимой части КПП и уровня возмущений оптических данных. Как из неё видно, главным фактором, влияющим на точность оценки коэффициента поглощения и АОР, является неопределенность в мнимой части КПП, тогда как для оценки коэффициента рассеяния критическим фактором является измерительная погрешность данных лидарного зондирования. Для получения приемлемых результатов мнимая часть КПП должна быть оценена с точностью не хуже, чем 100 %. В этом случае даже в условиях высокой неопределенности коэффициента поглощения погрешность нахождения АОР составляет около 6% при возмущениях оптических данных до 20 % вследствие компенсационного эффекта от взаимного уничтожения ошибок.

2.9. Выводы ко второй главе

Построена математическая модель для задач многоволнового лидарного зондирования аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов. Она связывает оптические свойства частиц, такие как коэффициент ослабления и обратного рассеяния, поляризованного параллельно и перпендикулярно падающему излучению, с их распределением по размеру интегральным преобразованием, ядром которого служат соответствующие сечения ослабления и обратного рассеяния.

В рамках построенной математической модели исследованы прямая и обратная задачи. Адекватность используемой математической модели подтверждена сходимостью результатов решения прямой задачи и лидарных измерений оптических свойств аэрозолей нерегулярной формы. Исследование обратной задачи показало необходимость привлечения регуляризирующих методов её решения, поскольку она представляет собой класс некорректных задач.

Разработан регуляризирующий алгоритм, основанный на применении модели полидисперсных, случайно ориентированных сфероидов для оценки параметров пылевых частиц по данным многоволнового лидарного зондирования. Численное моделирование демонстрирует, что для типичных РАР, соответст-

вующих пыли, возможна оценка с точностью до 30 % таких их параметров, как общая площадь и объём, эффективный размер с помощью рамановского лидара, измеряющего оптические данные с погрешностью до 10 %. Сравнение результатов расчетов на основе сфероидных и сферических моделей показывает, что применение последних для восстановления параметров пыли в целом ведет к недооценке реальной части КПП, и как следствие, к увеличению погрешности в оценке других параметров. Однако во многих случаях применение сферической модели позволяет делать разумные оценки размера и концентрации пыли.

Разработанный алгоритм позволяет использовать деполяризацию излучения на нескольких длинах волн как дополнительную информацию для обратной задачи. По крайней мере, деполяризация излучения, известная на одной длине волны, является необходимой для решения обратной задачи, когда одна из фракций популяции аэрозолей представлена частицами несферической формы. В таких случаях без использования деполяризации алгоритм ведет к неточной оценке объёмной фракции сфероидов и как следствие к увеличению погрешности восстановления параметров частиц.

При погрешности измерения до 10 %, оптимальный набор оптических данных для распознавания смеси аэрозолей, состоящей из сферических и нерегулярных частиц, включает три коэффициента обратного рассеяния, два коэффициента ослабления и одну деполяризацию излучения на длинах волн в диапазоне от 355 до 1064 нм.

Исследовано влияние показателя преломления, зависящего от длины волны падающего излучения, на результаты решения задачи многоволнового лидарного зондирования. Разработан подход с учетом соответствующей коррекции решения рассматриваемых задач, основанный на использовании априорной информации о спектральном поведении показателя преломления исследуемых аэрозолей.

Получены теоретические оценки, подтвержденные в ходе математического моделирования, точности восстановления разработанным алгоритмом коэффициентов рассеяния и поглощения, альбедо однократного рассеяния атмо-

сферных аэрозолей в зависимости от уровня погрешности оптических данных и неопределенности в мнимой части КПП. Показано, что приемлемая точность достигается при неопределенности в оценке мнимой части до 100 %. В этом случае относительные погрешности восстановления рассматриваемых параметров определяются уровнем измерительной погрешности коэффициента ослабления: у коэффициентов поглощения погрешность на порядок выше указанного уровня, у коэффициента рассеяния – близка к нему, у АОР погрешность ещё ниже.

Глава 3. ДВУМЕРНЫЙ РЕГУЛЯРИЗИРУЮЩИЙ АЛГОРИТМ ВОССТАНОВЛЕНИЯ ПРОФИЛЯ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ

Важной отличительной особенностью лидаров является то, что они позволяют получать данные об аэрозолях по всей трассе зондирования с высоким разрешением по высоте, или удаленности, от источника излучения сигнала. Получаемые данные формируют профиль, который разбивается на характерные высотные слои, выделяемые в результате анализа измеряемой информации. До сих пор оценка параметров аэрозолей осуществлялась на основе лидарных данных, соответствующих какому-либо отдельному высотному слою независимо от того, как распределены аэрозоли по трассе зондирования. В то же время динамика, с которой происходит эволюция оптических свойств аэрозолей от слоя к слою, сама по себе может содержать полезную информацию и использоваться в качестве дополнительных ограничений пространства решений обратной задачи. В настоящей главе предлагается подход, в котором в качестве исходной информации для обратной задачи многоволнового лидарного зондирования служит целый профиль оптических данных, используемый для восстановления соответствующего профиля микрофизических параметров аэрозолей. В связи с этим мы обобщаем одномерную математическую модель на двумерный случай, формализуем двумерную концепцию обратной задачи, разрабатываем регуляризирующий алгоритм её решения, в котором сглаживающий функционал позволяет стабилизировать решение в двух направлениях одновременно: по размеру частиц и по дистанции зондирования.

3.1. Концептуальная модель

Чтобы сделать вывод, насколько оправдан переход к более сложной, двумерной, концепции обратной задачи, целесообразно проанализировать страте-

гию её решения в одномерном случае. Как мы увидели, лидарная система на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники является минимальной конфигурацией, необходимой для успешного восстановления микрофизических параметров аэрозолей, например, эффективного размера и КПП [23, 142, 32]. С помощью разработанных алгоритмов решается интегральное уравнение Фредгольма I рода (10), которое связывает оптические свойства аэрозолей $g_i(\lambda)$, измеряемые с помощью лидарного зондирования, и их искомые физические свойства $\nu(r)$. Его решение является обратной задачей, представляющей класс некорректных задач [18], которые характеризуются следующими особенностями: набор исходных данных существенно ограничен, они содержат высокую измерительную погрешность, нет непрерывной зависимости между ними и решением. Это обуславливает неустойчивость, или нестабильность, решения обратной задачи. Поэтому ключевой момент при разработке алгоритмов заключается в стабилизации решения, которая достигается путем введения математических и физических ограничений на пространства оптических данных и физических свойств как на этапе самого инверсионного процесса [см. шаг б) в параграфе 2.5], так и на этапе постобработки полученного пространства решений после инверсионного процесса [см. шаг г) в параграфе 2.5].

Другими словами можно сказать, что на первом этапе мы получаем математическое пространство решений, которое является результатом применения правила (28), а затем идентифицируем из него физическое пространство решений (т.е. пространство, обладающее физическим смыслом) с помощью процедуры постобработки данных, полученных на первом этапе. Здесь можно выделить ограничения, которые используются неявным образом в инверсионном процессе и явно, после того как первый этап решения обратной задачи завершен. Кроме того, различаются ограничения, вводимые как *априорно*, так и *апостериорно*.

Одним из важных ограничений является гладкость исследуемого РАР [см. член H в правиле (28)]. Это требование позволяет подавлять осцилляции, возникающие вследствие нестабильности решения обратной задачи и генерирую-

щие ложные моды у РАР. Кроме того, оптические свойства исследуемого РАР, которые вычисляются на основе восстановленного набора микрофизических свойств, сравниваются с исходным набором оптических данных. В связи с этим требуется установить некоторую меру для количественной оценки их соотношения, которая должна быть согласована с уровнем измерительной погрешности. Здесь нужно иметь в виду, что исходная информация включает различные типы данных, например, обратное рассеяние и ослабление, которые измеряются с различной точностью. Поэтому отклонение спектрального поведения коэффициентов обратного рассеяния и ослабления, полученных на основе восстановленного РАР, от соответствующих измеренных значений также учитывается при постобработке пространства решений. В ходе инверсионного процесса находится невязка (29), в соответствии с которой пространство решений ранжируется от её минимального до максимального значений. Статистические свойства этого параметра являются ещё одним важным ограничением, накладываемым на пространство решений. Дополнительные ограничения вытекают из анализа границ области определения $r_{\min}$ и $r_{\max}$ [см. условие (25)], идентификации характерных образцов РАР, где выполняется условие неотрицательности $\nu(r) \geq 0$.

Несмотря на богатый набор ограничений, нам все ещё приходится сталкиваться с фундаментальной проблемой, связанной со стабилизацией алгоритма решения обратных задач многоволнового лидарного зондирования. Например, измерительная ошибка оптических свойств может быть причиной недопустимо больших вариаций микрофизических параметров аэрозолей. Такой эффект может наблюдаться даже на высотах, следующих последовательно друг за другом, внутри одного аэрозольного слоя, в котором должны содержаться частицы, близкие по своим свойствам, например, эффективному размеру, КПП [100, 99, 103]. Предположение об инвариантности свойств частиц на близких высотных слоях может способствовать дальнейшей стабилизации решения *а posteriori*. Допустим, нам известно, что указанные свойства не должны изменяться на близких высотах одного и того же аэрозольного слоя. Применяя вы-

шеупомянутые ограничения, мы сначала находим пространство решений, которое дает первоначальную оценку физического пространства решений, на отдельно рассматриваемых высотных слоях. Тогда, имея *апостериорную* информацию, мы можем выполнить ре-анализ первичного физического пространства решений на основе дополнительных ограничений и получить вторичное физическое пространство решений, удовлетворяющее еще более строгим требованиям.

В результате использования такого *апостериорного* подхода мы имеем дело с двумя основными проблемами. Во-первых, процедура постобработки пространства решений в этом случае займет чрезвычайно много времени. Во-вторых, при её привлечении задача по анализу и оптимизированию многомерного пространства физических и математических параметров также зависит от опыта оператора, который накладывает субъективные особенности на решение. Одновременно необходимо еще раз упомянуть о состоянии дел в области исследования аэрозолей с помощью лидарных систем. Например, несколько станций с рамановскими лидарами, входящими EARLINET [36], модернизированы многоволновыми системами. Новые многоволновые рамановские лидары вошли в строй в Восточной Азии [108, 110] и на Шпицбергене [121]. Поэтому разработка алгоритма для обработки большого количества данных является весьма актуальной. Он должен обеспечить при этом объективный, быстрый и аккуратный выбор параметров, ограничивающих пространство решений.

Исследования, проводимые в настоящей главе, направлены на то, чтобы уйти от чрезвычайно трудоемкого *апостериорного* анализа пространства решений отдельных высотных слоев и, более того, модифицировать инверсионный процесс в неявный *априорный* подход. В связи с этим мы вводим ограничение в виде гладкости вдоль направления зондирования как стабилизирующего элемента, в соответствии с которым свойства частиц могут не варьироваться между высотами, следующими друг за другом внутри одного и того же аэрозольного слоя. Действительно, этот вид информации о профиле, который можно интерпретировать как требование коррелированности параметров частиц между

близкими высотными слоями, является одним из фундаментальных преимуществ лидарного зондирования над пассивным зондированием, проводимым с помощью солнечных радиометров и спутников.

3.2. Математическая модель

Классическая одномерная математическая модель описывается уравнением (10). При его решении с помощью регуляризирующего алгоритма реализуется условие сглаживания искомого РАР ν как функции радиуса частиц r . Другими словами, осуществляется регуляризация, или стабилизация, решения в направлении радиуса r .

Оптические данные измеряются лидаром по всей трассе зондирования и характеризуются удалением z от лидарной системы. Тогда закономерно ввести еще одно направление, z , выделить в данном направлении высотные слои z_l , $l=1,2,\dots, N_L \leq 20$, толщиной $\Delta z = (z_{N_L} - z_1)/(N_L - 1)$, последовательно распределенные от минимального z_1 до максимального z_{N_L} расстояния, и рассмотреть на каждом из них уравнение (10). В этом случае возникает N_L интегральных уравнений Фредгольма I рода

$$\int_{r_{\min}^{(l)}}^{r_{\max}^{(l)}} K_i(\lambda, m^{(l)}, r) \nu^{(l)}(r) dr = g_i^{(l)}(\lambda), \quad l=1,2,\dots, N_L, \quad (54)$$

в котором функция $g_i^{(l)}(\lambda)$ означает коэффициент обратного рассеяния ($i=\beta$) или ослабления ($i=\alpha$), функция $\nu^{(l)}(r)$ – РАР, параметр $m^{(l)}$ – КПП, $r_{\min}^{(l)}$ и $r_{\max}^{(l)}$ – диапазоны изменения размеров частиц, заданных на высотном слое l . Такая формулировка одномерной модели позволяет сделать обобщение на двумерный случай. В связи с этим целесообразно ввести следующие функции:

$$m^{(l)} \rightarrow m(z), \quad \nu^{(l)}(r) \rightarrow \nu(r, z), \quad g_i^{(l)}(\lambda) \rightarrow g_i(\lambda, z), \quad r_{\min, \max}^{(l)} \rightarrow r_{\min, \max}(z) \quad (55)$$

Тогда интегрирование уравнения (54), в котором предварительно сделана замена (55), по z от z_1 до z_{N_L} ведет к двумерному интегральному уравнению:

$$\int_{z_1}^{z_{N_L}} \int_{r_{\min}(z)}^{r_{\max}(z)} K_i(\lambda, m(z), r) \nu(r, z) dr dz = G_i(\lambda) \quad (56)$$

Здесь функция

$$G_i(\lambda) = \int_{z_1}^{z_{NL}} g_i(\lambda, z) dz \quad (57)$$

описывает оптические данные, проинтегрированные по всему профилю, или трассе зондирования, и для коэффициента ослабления ($i=\alpha$) называется оптической толщиной, а поверхность $\nu(r, z)$ – распределение аэрозолей по двум направлениям: размеру и дистанции зондирования.

Уравнение (56) формализует двумерную математическую модель для задач многоволнового лидарного зондирования. Введенные функции для всех $z \in [z_1, z_{NL}]$ удовлетворяют условиям (24) и (25).

3.3. Постановка двумерной обратной задачи. Построение её решения

В данном параграфе мы сначала сформулируем двумерную обратную задачу многоволнового лидарного зондирования, а затем построим её решение. При этом мы воспользуемся заделом, созданным при изложении главы 1, в связи с чем несколько параграфов из главы 1 рационально сгруппировать в один раздел, в котором одновременно рассматриваются непрерывный и дискретный аналоги двумерной задачи. При рассмотрении двумерной задачи мы будем следовать следующей стратегии: на первом шаге исследуется задача в направлении r , на втором шаге – в направлении z , затем осуществляется обобщение на двумерный случай.

Итак, в результате лидарного зондирования измеряются профили оптических данных $g_i^{e_r}(\lambda)$ с погрешностью e_r на некоторых длинах волн λ_k , $k=1, 2, \dots, N_\lambda \leq 6$. Чтобы не усложнять обозначения, мы опустим символ e_r в дальнейших выкладках. Поскольку ядро $K_i(\lambda, m(z), r)$ определено, то при использовании профиля оптических данных $g_i(\lambda, z)$ в модели (56) в качестве исходных данных относительно неизвестной поверхности $\nu(r, z)$ возникает двумерное интегральное уравнение. Оно имеет неточно заданное ядро и пределы интегрирова-

ния, так как функции $m(z)$ и $r_{\min, \max}(z)$ заданы неточно. Кроме того, для любого фиксированного z выполняется (10).

Исследуем задачу в направлении r . В предыдущем параграфе мы получили в этом направлении N_L интегральных уравнений Фредгольма I рода (54). Для них можно применить все результаты, полученные в главе 1. В частности, нахождение их решения является обратной задачей. Воспользуемся подходом, изложенным в параграфе 2.6. В соответствии с ним уравнения (54) можно представить в следующей матрично-векторной форме

$$\mathbf{A}^{(l)} \mathbf{w}^{(l)} = \mathbf{g}^{(l)}, \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (58)$$

В результате возникает N_L систем линейных алгебраических уравнений. Попытка решить их одновременно приводит к рассмотрению обобщенной системы линейных алгебраических уравнений вида

$$\tilde{\mathbf{A}} \tilde{\mathbf{w}} = \tilde{\mathbf{g}} \quad (59)$$

с блочными матрицей и векторами

$$\tilde{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}^{(1)}]_{N_0 \times N_B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}^{(2)}]_{N_0 \times N_B} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{A}^{(N_L)}]_{N_0 \times N_B} \end{bmatrix}_{N_L N_0 \times N_B N_L}, \quad \tilde{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}^{(1)}]_{N_B \times 1} \\ [\mathbf{w}^{(2)}]_{N_B \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{w}^{(N_L)}]_{N_B \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times 1}, \quad \tilde{\mathbf{g}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{g}^{(1)}]_{N_0 \times 1} \\ [\mathbf{g}^{(2)}]_{N_0 \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{g}^{(N_L)}]_{N_0 \times 1} \end{bmatrix}_{N_L N_0 \times 1}$$

Здесь вектор-столбцы $\mathbf{g}^{(l)}$ состоят из элементов $g_p^{(l)}$, образующих профиль коэффициентов обратного рассеяния ($i=\beta$) или ослабления ($i=\alpha$) на какой-либо длине волны $[p=(i, \lambda_k)=1, 2, \dots, N_0]$ при пробегании индекса l от 1 до N_L . Вектор-столбцы $\mathbf{w}^{(l)}$ содержат элементы $w_j^{(l)}$, необходимые для аппроксимации типа (30) функции $v^{(l)}(r)$ на высотном слое l . Наконец, элементы матрицы $\mathbf{A}^{(l)}$ определяются по аналогии с формулой (32) как

$$a_{pj}^{(l)} = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} K_p(m^{(l)}, r) B_j(r) dr \quad (60)$$

Обобщенная система (59) имеет $N_L \times N_0$ уравнений и $N_B \times N_L$ неизвестных $w_j^{(l)}$. Поскольку N_0 и N_B согласованы (см. параграф 2.6), то количество неизвестных равно количеству уравнений и в принципе полученная система разрешима, если задан весь профиль оптических данных $\tilde{\mathbf{g}}$. Очевидно, для поиска

её решения можно воспользоваться уже обоснованным для таких задач правилом (35)

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}} + \gamma \tilde{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{g}}, \quad (61)$$

где матрица-стабилизатор также имеет блочную структуру:

$$\tilde{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{H}]_{N_B \times N_B} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times N_B N_L},$$

в которой матрица $\mathbf{H}$ определяется также как и в (36). Как видно из этого правила, решения $\mathbf{w}^{(1)}, \dots, \mathbf{w}^{(N_L)}$ находятся независимо друг от друга и не отличаются от решения в классической постановке задачи (33) в соответствующем высотном слое l .

Исследуем теперь задачу в направлении z . После исследования, выполненного в направлении r , к функциям, введенным с помощью замены (55), целесообразно добавить также

$$w_j^{(l)} \rightarrow w_j(z), \quad a_{pj}^{(l)} \rightarrow a_{pj}(z), \quad a_{ij}^{(l)}(\lambda) \rightarrow a_{ij}(\lambda, z), \quad (62)$$

где $a_{ij}^{(l)}(\lambda) = \int_{r_{j-1}}^{r_{j+1}} K_i(\lambda, m^{(l)}, r) B_j(r) dr$. Тогда уравнение (56) может быть снова сведено к одномерному случаю, но уже в направлении z . Для этого проинтегрируем его по r с учетом того, что используется аппроксимация (30) и сделана замена (62). В результате возникает сумма

$$\sum_{j=1}^{N_B} \int_{z_1}^{z_{N_L}} a_{ij}(\lambda, z) w_j(z) dz = G_i(\lambda) \quad (63)$$

Разобьем её с помощью некоторых факторов ϕ_j , таких, что $\sum_{j=1}^{N_B} \phi_j = 1$, на N_B интегральных уравнений Фредгольма I рода относительно функции $w_j(z)$, представляющей собой объёмное распределение по высоте аэрозолей радиусом r_j :

$$\int_{z_1}^{z_{N_L}} a_{ij}(\lambda, z) w_j(z) dz = \phi_j G_i(\lambda), \quad j=1, 2, \dots, N_B \quad (64)$$

Применим к поиску его решению тот же самый подход, как и для уравнения (54). В частности, использование аппроксимации $w_j(z)$ с помощью полиномов

нулевого порядка на соответствующем отрезке $[z_l, z_{l+1}]$ (формально $z_{N_L+1} = z_{N_L} + \Delta z$), представляющей искомую функцию как ступенчатую, приводит к N_B системам линейных алгебраических уравнений

$$\mathbf{A}_j \mathbf{w}_j \cong \phi_j \mathbf{G} / \Delta z, \quad j=1, 2, \dots, N_B, \quad (65)$$

где матрица $\mathbf{A}_j$ и вектор-столбцы $\mathbf{w}_j$ и $\mathbf{G}$ имеют компоненты $a_{pj}^{(l)}$ [см. формулу (60)], $w_j^{(l)}$ и $G_p = G_i(\lambda_k)$ соответственно, причем для них $l=1, 2, \dots, N_L$, $p=1, 2, \dots, N_O$, а индекс j – фиксированный.

Продолжая аналогию, на основе N_B систем (65) построим обобщенную систему линейных алгебраических уравнений, в матрично-векторной записи представляемой как

$$\bar{\mathbf{A}} \bar{\mathbf{w}} \cong \bar{\mathbf{g}} \quad (66)$$

с блочными матрицей и векторами

$$\bar{\mathbf{A}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}_1]_{N_O \times N_L} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}_2]_{N_O \times N_L} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{A}_{N_B}]_{N_O \times N_L} \end{bmatrix}_{N_B N_O \times N_B N_L}, \quad \bar{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}_1]_{N_L \times 1} \\ [\mathbf{w}_2]_{N_L \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{w}_{N_B}]_{N_L \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times 1}, \quad \bar{\mathbf{g}} = \frac{1}{\Delta z} \begin{bmatrix} \phi_1 [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \\ \phi_2 [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \\ \dots \\ \phi_{N_B} [\mathbf{G}]_{N_O \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_O \times 1},$$

Она имеет $N_B \times N_O$ уравнений и $N_B \times N_L$ неизвестных $w_j^{(l)}$, что в общем случае означает несогласованное число уравнений и неизвестных. Однако формально общее решение в направлении z находится по правилу

$$\bar{\mathbf{w}} = (\bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{A}} + \kappa \bar{\mathbf{H}})^{-1} \bar{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{g}}, \quad (67)$$

где κ – параметр регуляризации, определяющий степень сглаживания в направлении z , а блочная матрица-стабилизатор $\bar{\mathbf{H}}$ имеет структуру:

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} & \dots & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{H}]_{N_L \times N_L} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times N_B N_L}$$

Если потребовать от функции ν в направлении z , также как и в направлении r , гладкость 1-ой производной, то матрица $\mathbf{H}$ будет иметь структуру, аналогичную (36).

В завершение исследования задачи в направлении z необходимо сделать замечание, касающееся факторов ϕ_j . Их физический смысл становится понятен, если ввести интегральное РАР всего профиля, или столба:

$$V(r) = \int_{z_1}^{z_{NL}} v(r, z) dz \quad (68)$$

На его основе легко находятся средние микрофизические параметры аэрозолей, содержащихся в полном профиле, такие как эффективный размер R_{eff} , общие концентрация N_o , площадь поверхности S_o и объём V_o по формулам

$$V_o = \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{V(r)}{r} dr, \quad S_o = 3 \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{V(r)}{r^2} dr, \quad N_o = \frac{3}{4\pi} \int_{r_{min}}^{r_{max}} \frac{V(r)}{r^4} dr, \quad R_{eff} = \frac{3V_o}{S_o} \quad (69)$$

Привлекая аппроксимацию типа (30) для функции $v(r, z)$, мы получим разложение для интегрального РАР

$$V(r) \approx \sum_{j=1}^{N_B} W_j B_j(r), \quad (70)$$

где его весовые факторы W_j определяются на основе профилей $w_j(z)$ выражением

$$W_j = \int_{z_1}^{z_{NL}} w_j(z) dz \quad (71)$$

Сравним одномерную и двумерную математическую модели (10) и (56) с учетом (68), (70), (71). Из курса математического анализа известно [19], что существует некоторое взвешенное значение КПП M на его профиле $m(z)$, при котором достигается равенство

$$\sum_{j=1}^{N_B} W_j a_{pj}(M) \approx G_p \quad (72)$$

Теперь при сопоставлении с (63) видно, что факторы ϕ_j связаны с весовыми факторам W_j соотношением

$$\phi_j \approx \frac{a_{pj}(M)}{G_p} W_j \quad (73)$$

Поскольку при решении рассматриваемых здесь задач $a_{pj}(M)$ и G_p известны, то оценка ϕ_j сводится к нахождению W_j . Это может быть сделано в результате использования, например, пассивных методов зондирования [44]. Поэтому полученный вывод является весьма перспективным с точки зрения разработки алго-

ритмов по определению параметров атмосферных аэрозолей с помощью комбинирования различных методов зондирования (см. параграф 3.7).

Итак, исследование двумерной обратной задачи, описываемой моделью (56), в двух направлениях приводит к решениям, представляющим собой либо распределение весовых факторов для аппроксимации РАР на каждом высотном слое $\tilde{\mathbf{w}}$ [при рассмотрении системы (59) в направлении r], либо распределение каждого весового фактора, соответствующего предварительно заданному радиусу, по высоте $\bar{\mathbf{w}}$ [при рассмотрении системы (66) в направлении z]. Вектора $\tilde{\mathbf{w}}$ и $\bar{\mathbf{w}}$ отличаются друг от друга порядком, в котором расположены соответствующие компоненты $w_j^{(l)}$. Переупорядочивание компонент $w_j^{(l)}$ (или строк) у вектор-столбца $\bar{\mathbf{w}}$ так, что вектор $\bar{\mathbf{w}} \rightarrow \tilde{\mathbf{w}}$, и одновременная перегруппировка соответствующих вектор-столбцов у матриц $\bar{\mathbf{A}}$ и $\bar{\mathbf{H}}$, в результате которой возникнут новые матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$, приводит систему (66) к новой системе линейных алгебраических уравнений

$$\hat{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{w}} \cong \bar{\mathbf{g}}, \quad (74)$$

но с прежним решением, определяемым по правилу

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} + \kappa \hat{\mathbf{H}})^{-1} \hat{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{g}} \quad (75)$$

Матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$ уже не являются блочными и имеют разреженную структуру. Подробно их структуры будут исследованы в параграфе 3.5.

Заключительный шаг в построении двумерного решения обратной задачи заключается в рассмотрении суперпозиции выражений (61) и (75), в результате чего правило для его нахождения примет вид

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}} + \hat{\mathbf{A}}^T \hat{\mathbf{A}} + \gamma \tilde{\mathbf{H}} + \kappa \hat{\mathbf{H}})^{-1} (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{g}} + \hat{\mathbf{A}}^T \bar{\mathbf{g}}) \quad (76)$$

Особенностью данного решения является то, что в отличие от решений (61) и (75) оно стабилизируется одновременно в двух направлениях: по размеру частиц r и по дистанции зондирования z посредством матриц $\tilde{\mathbf{H}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$ соответственно. Также необходимо отметить, что при лидарном зондировании обычно отсутствует априорная информация о факторах ϕ_j , поэтому правило для нахож-

дения решения с помощью двумерной регуляризации представляется в более простой форме

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{A}} + \gamma \tilde{\mathbf{H}} + \kappa \hat{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}^T \tilde{\mathbf{g}} \quad (77)$$

Если параметр γ определяет силу сглаживания в радиусном направлении исследуемого РАР, то параметр κ – силу сглаживания вдоль трассы зондирования. В следующем параграфе предлагается подход по оценке их оптимальных значений. Кроме того, при проведении численного эксперимента будет продемонстрировано, как в действительности изменяется γ , если добавляется регуляризирующий параметр κ .

3.4. Двумерный регуляризирующий алгоритм решения обратной задачи

В целом двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей включает такие же шаги а)-е), как и ранее представленные в гл. 1. Однако в связи с введением направления z возникают характерные особенности, на которые следует обратить внимание.

При выполнении шага б) наряду с поиском оптимального значения γ , нам также необходимо найти оптимальное значения κ . Потребуем, чтобы оптимальное значение γ обеспечивало минимум модифицированной невязки, соответствующей двумерной задаче (59)

$$\tilde{\rho}(\gamma, \kappa) = \|\tilde{\mathbf{A}} | \tilde{\mathbf{w}}(\gamma, \kappa) | - \tilde{\mathbf{g}}^e\|_G \quad (78)$$

Здесь, как и в определении (29), знак $|\bullet|$ означает, что каждая компонента вектора $\tilde{\mathbf{w}}(\gamma, \kappa)$, зависящего от некоторых γ и κ , берётся в расчёт по абсолютному значению. Другими словами, определение модифицированной невязки (78) является обобщением невязки (29) на двумерный случай.

Применение аналогичного критерия для оценки оптимального значения регуляризирующего параметра κ не позволяет дополнительно стабилизировать решение. С помощью известных подходов его оптимальной оценки [105, 18, 58] также не удалось добиться положительного результата. Для выработки нового

критерия мы проанализировали причины возникновения неустойчивости. Одной из критических особенностей рассматриваемых обратных задач является случай, когда у восстановленного РАР первый весовой фактор $w_1^{(l)}$, соответствующий минимальному радиусному узлу, значительно переоценивается, что ведет к возникновению т.н. выброса в решении и ложной ярко выраженной моды. Этот эффект хорошо известен и является причиной, по которой альтернативные алгоритмы в ряде случаев не позволяют получить оценку общей концентрации аэрозолей [105, 31]. До сих пор борьба с ним сводилась к ограничению допустимых вариаций для параметра $r_{\min}$ [см. условия (25)], минимальное значение которого не должно быть ниже ~ 0.1 мкм. К сожалению, в этом случае невозможна достоверная оценка параметров мелких аэрозолей, возникающих например, при антропогенном загрязнении или горении продуктов биомассы. В результате проведенного анализа мы разработали критерий, по которому оптимальное значение параметра регуляризации κ обеспечивает минимум суммы всех компонент вектора $\tilde{w}$, взятых по модулю и соответствующих первому, или наименьшему, радиусному узлу:

$$S(\kappa) = \sum_{j=1}^{N_k} |w_1^{(j)}(\kappa)| \rightarrow \min_{0 \leq \kappa} \quad (79)$$

Теперь шаг б) двумерного регуляризирующего алгоритма формулируется следующим образом. Для предварительно заданного ряда значений $\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_{\max}$, распределенных от 0 до заведомо большого $\kappa_{\max}$, находятся пробные решения $\tilde{w}(\gamma, \kappa_1), \tilde{w}(\gamma, \kappa_2), \dots, \tilde{w}(\gamma, \kappa_{\max})$ по правилу (77), при этом оптимальный параметр регуляризации γ определяется так, чтобы обеспечить минимум модифицированной невязки (78). На основе пробных решений строится ряд $S(\kappa_1), S(\kappa_2), \dots, S(\kappa_{\max})$ согласно критерию (79). В полученном ряде выбирается минимальный элемент, на котором параметр κ и достигает оптимального значения. Из пробных решений идентифицируется индивидуальное решение $\tilde{w}^{(q)}(\gamma, \kappa_{\text{opt}})$, соответствующее оптимальному значению регуляризирующего параметра κ_{opt} .

Кроме шага б), требует обобщения на двумерный случай в регуляризирующем алгоритме и шаг г), связанный с реализацией процедуры усреднения.

Ключом её успешного применения является оценка невязки ρ_{cp} , которая задает интервал усреднения, или окрестность около её минимального значения $\rho_{\min}$. Ясно, что в случае с классической одномерной регуляризацией параметр ρ_{cp} должен быть оценен отдельно на каждом высотном слое z_l . Такой подход «в лоб», во-первых, является очень трудоемким, учитывая, что $l=1,2,\dots, N_L \leq 20$, а во-вторых, указанная оценка осуществляется индивидуально, независимо от той, которая делается на соседних высотных слоях.

В связи с этим мы модифицировали процедуру усреднения для двумерного регуляризирующего алгоритма следующим образом. Задается ряд значений $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_{\max}$, распределенных от 0 до заведомо большого $\rho_{\max}$, среди которых лежит искомый параметр ρ_{cp} . Для каждого значения находятся усредненные решения $\bar{v}^{(l)}(\rho_1), \bar{v}^{(l)}(\rho_2), \dots, \bar{v}^{(l)}(\rho_{\max})$ на основе индивидуальных решений $\tilde{\mathbf{w}}^{(q)}$, соответствующие им оптические данные $\bar{g}_p^{inv,(l)}(\rho_1), \bar{g}_p^{inv,(l)}(\rho_2), \dots, \bar{g}_p^{inv,(l)}(\rho_{\max})$ и невязки $\bar{\rho}^{(l)}(\rho_1), \bar{\rho}^{(l)}(\rho_2), \dots, \bar{\rho}^{(l)}(\rho_{\max})$ с помощью формул (10) и (40) на каждом слое z_l . В результате строится ряд значений для общей невязки

$$\bar{\rho}_0(\rho_i) = \frac{1}{N_L} \sum_{l=1}^{N_L} \bar{\rho}^{(l)}(\rho_i), \quad i=1,2,\dots,\max \quad (80)$$

рассчитанной для усредненного решения $\bar{V}(\rho_i)$, описывающего РАР всего профиля и имеющего аналитическое представление (68).

Поведение общей невязки $\bar{\rho}_0(\rho_i)$ в зависимости от интервала усреднения ρ_i представляется характеристикой, удобной для углубленного и быстрого анализа пространства решений исследуемого профиля в целом. Анализируя функцию $\bar{\rho}_0(\rho_i)$, мы находим оптимальное пространство решений на всех высотных слоях одновременно. В общем, оптимальный выбор параметра ρ_{cp} достигается при выполнении двух условий: в его окрестности, во-первых, поведение функции $\bar{\rho}_0(\rho_i)$ стабильно, а во-вторых, не возникает сильных изменений исследуемых микрофизических параметров всего профиля (69), т.е. их значения остаются инвариантными [141, 79].

В результате применения алгоритма находится поверхность $\nu(r, z)$, профили микрофизических параметров аэрозолей $r_{eff}(z)$, $n_o(z)$, $s_o(z)$, $v_o(z)$, $m(z)$ и оптических характеристик $g_{sca}(\lambda_k, z)$, $g_{abs}(\lambda_k, z)$ и $\omega(\lambda_k, z)$ на основе их дискретных аналогов $\nu^{(l)}(r)$, $r_{eff}^{(l)}$, $n_o^{(l)}$, $s_o^{(l)}$, $v_o^{(l)}$, $m^{(l)}$, $g_{sca}^{(l)}(\lambda_k)$, $g_{abs}^{(l)}(\lambda_k)$, $\omega^{(l)}(\lambda_k)$ и формул (7) или (27).

Описанные здесь особенности двумерного регуляризирующего алгоритма будут детально исследованы при проведении численного эксперимента.

3.5. Численная реализация двумерного регуляризирующего алгоритма

Анализ двумерного регуляризирующего алгоритма показывает, что при его численной реализации не возникает новых объектов, которые бы требовали в этом смысле привлечения дополнительных численных методов для их построения (см. параграф 2.6), за исключением матриц $\hat{\mathbf{A}}$ и $\hat{\mathbf{N}}$. Займемся их получением.

Как было показано в параграфе 3.3, они образуются из соответствующих матриц $\bar{\mathbf{A}}$, $\bar{\mathbf{N}}$ путем перегруппировки вектор-столбцов. Порядок, по которому осуществляется перегруппировка, должен быть точно таким же, как это делается при переходе от вектора $\bar{\mathbf{w}}$ к вектору $\tilde{\mathbf{w}}$ в результате перестановки компонент $w_j^{(l)}$ (или строк). Его можно формализовать следующим образом. Введем сквозную нумерацию строк у вектора $\bar{\mathbf{w}}$: $\tau=1, 2, \dots, N_B \times N_L$. Сквозной номер его каждой строки однозначно определяется верхним и нижним индексом соответствующей компоненты $w_j^{(l)}$:

$$\tau = (j - 1) N_L + l, \quad j=1, 2, \dots, N_B, \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (81)$$

Каждая пара (l, j) также однозначно определяет сквозной номер строки $t=1, 2, \dots, N_B \times N_L$ у вектора $\tilde{\mathbf{w}}$:

$$t = (l - 1) N_B + j, \quad j=1, 2, \dots, N_B, \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (82)$$

Пробегаая по всем возможным комбинациям (l, j) , мы получим порядок, по которому сквозной номер строки $\tau(l, j)$ у вектора $\bar{\mathbf{w}}$ примет номер $t(l, j)$ после пе-

регруппировки в вектор $\tilde{\mathbf{w}}$. Аналогичным образом выполняется перегруппировка вектор-столбцов у матриц $\bar{\mathbf{A}}$, $\bar{\mathbf{H}}$ при переходе в матрицы $\hat{\mathbf{A}}$ и $\hat{\mathbf{H}}$.

Рассмотрим такого рода переход на примере матрицы $\bar{\mathbf{H}}$, когда задано три высотных слоя ($N_L=3$) и пять весовых факторов, используемых для аппроксимации РАР ($N_B=5$). В случае, если на решение накладывается требование непрерывности (сглаживание нулевого порядка) и матрицы $\mathbf{H}_l$ являются единичными, то обобщенная матрица $\bar{\mathbf{H}}$ имеет структуру

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|c|} \hline 1 & 0 & \dots & & & & & & & & & & & & & 0 \\ \hline 0 & 1 & & & & & & & & & & & & & & \\ \hline \dots & & 1 & & & & & & & & & & & & & \\ \hline & & & 1 & & & & & & & & & & & & \\ & & & & 1 & & & & & & & & & & & \\ & & & & & 1 & & & & & & & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & & & & & & & & & \\ & & & & & & & 1 & & & & & & & & \\ & & & & & & & & 1 & & & & & & & \\ & & & & & & & & & 1 & & & & & & \\ & & & & & & & & & & 1 & & & & & \\ & & & & & & & & & & & 1 & & & & \\ \hline 0 & & & & & & & & & & & & 1 & & & 1 \\ \hline \end{array}$$

Перегруппировка вектор-столбцов по формулам (81), (82) ведет к образованию новой матрицы $\hat{\mathbf{H}}$

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{array}{|cccccccccccc|} \hline 1 & & & & & & & & & & & \\ \hline & & & & 1 & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & & 1 & & & \\ \hline & 1 & & & & & & & & & & \\ \hline & & & & 1 & & & & & & & \\ \hline & & 1 & & & & & & & 1 & & \\ \hline & & & & & 1 & & & & & & \\ \hline & & & 1 & & & & & & & 1 & \\ \hline & & & & & & 1 & & & & & \\ \hline & & & & 1 & & & & & & & \\ \hline & & & & & & & 1 & & & & \\ \hline & & & & & & & & & & 1 & \\ \hline & & & & & & & & & & & 1 \\ \hline \end{array}$$

В случае, если на решение накладывается требование гладкости 1-ой производной (сглаживание второго порядка), при котором матрицы $\mathbf{H}_l$ имеют вид (36), то обобщенная матрица $\bar{\mathbf{H}}$

$$\bar{\mathbf{H}} = \begin{array}{|cccccccccccc|} \hline 1 & -2 & 1 & & & & & & & & & 0 \\ \hline -2 & 5 & -2 & & & & & & & & & \\ \hline 1 & -2 & 1 & & & & & & & & & \\ \hline & & & 1 & -2 & 1 & & & & & & \\ \hline & & & -2 & 5 & -2 & & & & & & \\ \hline & & & 1 & -2 & 1 & & & & & & \\ \hline & & & & & & 1 & -2 & 1 & & & \\ \hline & & & & & & -2 & 5 & -2 & & & \\ \hline & & & & & & 1 & -2 & 1 & & & \\ \hline & & & & & & & & & 1 & -2 & 1 \\ \hline & & & & & & & & & -2 & 5 & -2 \\ \hline 0 & & & & & & & & & 1 & -2 & 1 \\ \hline \end{array}$$

после перегруппировки по формулам (81), (82) принимает структуру

$$\hat{\mathbf{H}} = \begin{bmatrix} 1 & & & & -2 & & & & 1 & & & \\ -2 & & & & 5 & & & & -2 & & & \\ 1 & & & & -2 & & & & 1 & & & \\ & 1 & & & & -2 & & & & 1 & & \\ & -2 & & & & 5 & & & & -2 & & \\ & 1 & & & & -2 & & & & 1 & & \\ & & 1 & & & -2 & & & & & 1 & \\ & & -2 & & & 5 & & & & -2 & & \\ & & 1 & & & -2 & & & & 1 & & \\ & & & 1 & & & -2 & & & & 1 & \\ & & & -2 & & & 5 & & & & -2 & \\ & & & 1 & & & -2 & & & & 1 & \\ & & & & 1 & & & -2 & & & & 1 \\ & & & & -2 & & & 5 & & & & -2 \\ & & & & 1 & & & -2 & & & & 1 \end{bmatrix}$$

Как видно, матрица $\hat{\mathbf{H}}$ уже не является блочной и имеет разреженную структуру.

Теперь все готово для доработки программного комплекса, в котором пространство решений может быть одновременно исследовано по всему профилю зондирования, и проведения на его основе математического моделирования.

3.6. Численный эксперимент

В этом параграфе мы суммируем некоторые результаты полномасштабно выполненного математического моделирования с использованием двумерного регуляризирующего алгоритма. Применяемая здесь стратегия заимствована из параграфа 2.7 с учетом того, что возникает еще одно направление исследования. Поэтому ключевым аспектом при моделировании является задание профилей параметров частиц. Нам нужно принять решение о количестве аэрозольных слоев, формирующих профиль, определить тестируемые (исходные) оптические и микрофизические свойства частиц в каждом слое. В общем случае форма профиля может быть очень сложной, в то же время профили исследуемых микрофизических параметров должны представлять реальные аэрозольные частицы, образующиеся в атмосферных условиях.

Рассмотрение проблемы вдоль всей трассы зондирования существенно увеличивает число степеней свободы параметрического пространства, подлежащего оценке с помощью двумерного регуляризирующего алгоритма, по сравнению с тем, которое возникает при тестировании классической одномерной регуляризации. В связи с этим мы исследуем тестовые профили, которые представляют систему из двух и трех различных аэрозольных слоев, расположенных последовательно друг за другом. Это будет достаточным, чтобы сделать вывод об основных свойствах нового алгоритма.

Аналогичные профили оптических данных были получены в ходе полевых испытаний, если пренебречь небольшими отклонениями геометрических и оптических свойств внутри главного аэрозольного слоя. Например, слои антропогенного загрязнения, расположенные над аэрозолями планетарного пограничного слоя и обнаруженные лидарной системой, функционирующей в Лейпциге, характеризуют континентальные условия [103, 89]. Другие примеры связаны с наблюдениями в морских условиях в рамках II Эксперимента по Характеристике Аэрозолей [27, 28] и Эксперимента в Индийском Океане [54]. В этих случаях деполяризация излучения отсутствует, поэтому параметр η известен и равен 0, а аэрозоли описываются только сферической моделью. По этой причине при моделировании мы фиксируем $\eta = 0$. Кроме того, с теоретической точки зрения важно понять возможности нового алгоритма в сравнении с тем, который уже апробирован и получил подтверждение [142, 141], а это было сделано как раз, когда $\eta = 0$.

Также как и в параграфе 2.7, сначала решается прямая задача по расчету профилей оптических данных, включающих набор $3\beta + 2\alpha$ [см. математическую модель (54)]. Для решения прямой задачи вызываются тестовые РАР: $v_l(r, z_l) = v^{(l)}(r)$, $l = 1, 2, \dots, N_L$, описываемые мономодальным законом (20), в котором $i = 1$. Его интегральные параметры приведены в табл. 8, 9 и согласуются с ожидаемыми из вышеупомянутых Экспериментов. Полученные профили оптических данных возмущаются и используются в качестве исходной информации для обратной задачи. В результате её решения с помощью двумерного регуля-

ризирующего алгоритма, описанного в параграфе 3.4, на каждом высотном слое z_l восстанавливаются РАР, а затем находятся профили микрофизических параметров, КПП и пр. Чтобы оценить преимущества двумерной концепции над одномерной, оптические данные обрабатываются также с помощью «классического» регуляризирующего алгоритма, описанного в параграфе 2.5.

Рис. 26 показывает пример шлейфа, состоящего из двух аэрозольных слоев. Расстояние между символами каждого профиля, равное 200 м, может означать разрешение Δz , с которым проводятся лидарные измерения. Эффективный радиус и КПП нижнего аэрозольного слоя (см. табл. 8) могут описывать относительно чистый морской пограничный слой. Следующий по высоте аэрозольный слой может представлять, например, слабо поглощающие частицы антропогенного загрязнения. Слой, расположенный выше 3 км, характеризует часть тропосферы с низким содержанием аэрозолей, поэтому концентрация частиц над системой из двух слоев близка к пренебрежимо малым значениям, но достаточным для проведения численного эксперимента вдоль всей трассы зондирования.

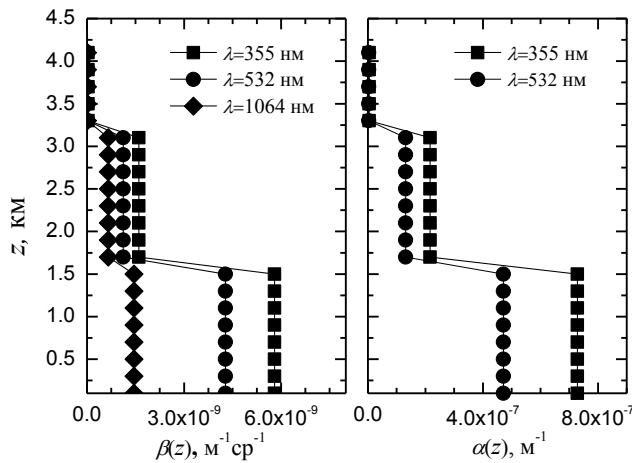


Рис. 26. Профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления на длинах волн 355, 532, 1064 нм.

Поскольку в рассматриваемой системе ярко выражены два слоя, мы уменьшаем размерность задачи за счет формирования профиля оптических данных с разрешением $\Delta z=400$ м путем усреднения значений, соответствующих двум соседним высотным слоям. В результате количество высотных слоев снижается с $N_L=21$ до 11.

Полученный набор профилей $3\beta+2\alpha$ возмущается случайной ошибкой (41) на каждом высотном слое, распределенной по равномерному закону с максимальной относительной погрешностью $e_r^{\max}=10\%$. Рис. 27 показывает 10 возмущенных профилей для коэффициента обратного рассеяния и ослабления

на длине волны 532 нм. Аналогичным образом генерируются и другие возмущенные профили на длинах волн 355 и 1064 нм из набора $3\beta+2\alpha$. Каждый из возмущенных наборов $3\beta+2\alpha$ используется в качестве исходной информации для обратной задачи (56). Символы указывают высотные слои толщиной $\Delta z=400$ м, формирующие профили оптических данных.

Обратная задача решается в результате последовательной обработки подготовленных предварительно профилей оптических данных с помощью разработанного алгоритма, и находятся соответствующие РАР, микрофизические параметры, КПП вдоль всей трассы зондирования.

Прежде чем перейти к анализу статистики всех полученных решений, остановимся подробно на двух аспектах, связанных с реализацией двумерного регуляризирующего алгоритма при обработке какого-либо из возмущенных профилей оптических данных.

Прежде всего, проиллюстрируем, какое влияние оказывает введение регуляризации по направлению z на восстановление РАР. На рис. 27 показано два индивидуальных решения, полученные в результате применения одномерного (штрих) и двумерного (пунктир) алгоритмов на высоте $z=0.9$ км при обработке одного и того же набора оптических данных и одинаковых значениях m_R' , m_I' , $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$. Оптимальное значение параметра регуляризации в первом случае достигается при $\gamma_{\text{opt}}=2^{17}\times 10^{-27}$, во втором случае – при $\gamma_{\text{opt}}=2^{21}\times 10^{-27}$. Кроме того, во втором случае решение регуляризуется в направлении z , при этом оптимальное значение $\kappa_{\text{opt}}=2^{10}\times 10^{-27}$. Как видно, использование двумерной регуляризации ведет к большему значению оптимального параметра γ , и, как следствие, к большей степени сглаживания в направлении r . И действительно, в решении, полученном с помощью двумерной регуляризации, отсутствует ложная ярко выраженная мода, возникающая в решении одномерного регуляризирующего алгоритма. Из этого можно сделать заключение, что введение регуляризации в направлении z стабилизирует также решение и в направлении r . Или дру-

гими словами, стабилизация решения в направлении z происходит в том числе и за счет его регуляризации в направлении r .

Еще одним важным аспектом нового алгоритма является применение процедуры усреднения на шаге γ). Её применение демонстрируется на рис. 28. В соответствии с ней мы строим общую невязку $\bar{\rho}_0(\rho_i)$ усредненного решения $\bar{V}(\rho_i)$, описывающего РАР всего профиля, а не невязку усредненного решения какого-либо высотного слоя $\bar{\rho}^{(l)}(\rho_i)$, как это делалось ранее [141]. Параметр ρ_i определяет количество индивидуальных решений, которые усредняются так, что их индивидуальная невязка (40) на каждом слое z_l удовлетворяет условию $\rho^{(l)} \leq \rho_i$. Кроме того, вычисляются эффективный радиус $\bar{R}_{eff}(\rho_i)$, общие концентрация $\bar{N}_0(\rho_i)$, площадь поверхности $\bar{S}_0(\rho_i)$ и объём $\bar{V}_0(\rho_i)$, рассчитываемые на основе $\bar{V}(\rho_i)$ по формулам (69) и соответствующие относительные ошибки e_r^{Reff} , e_r^{No} , e_r^{So} , e_r^{Vo} . Как видно из рис. 28, существует диапазон, начиная с $\rho_i > 10\%$, где общая невязка претерпевает сильный рост. Граница этого диапазона определяет искомый интервал усреднения ρ_{cp} , в котором параметры $\bar{R}_{eff}$, $\bar{N}_0$, $\bar{S}_0$ и $\bar{V}_0$ отклоняются от тестового (истинного) значения в меньшей степени и, что более важно, динамика отклонений сравнительно мала. Как результат, увеличение интервала усреднения вдвое до 20% не повлекло бы существенного изменения ошибок рассматриваемых параметров. Однако в этом случае ошибка параметра $\bar{N}_0$ растёт быстрее, чем динамика уменьшения ошибок остальных параметров, поэтому оптимальное значение выбирается при $\rho_{cp} = 10\%$.

Предлагаемая процедура обладает следующими важными свойствами. Во-первых, она позволяет извлекать окончательный результат на основе двух простых критериев стабильности общей невязки и инвариантности пространства решений. Это дает возможность новому алгоритму работать в автономном или полуавтономном режиме, снизить требования, предъявляемые к оператору при его применении, и, как следствие, наличие субъективного фактора при выполнении оценок.

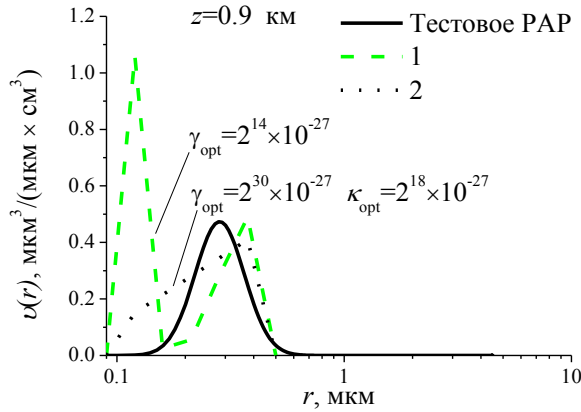


Рис.27. Индивидуальные RAP, восстановленные с помощью одномерного (1) и двумерного (2) алгоритмов на высоте $z=0.9$ км при одинаковых значениях m_R' , m_I' , $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$.

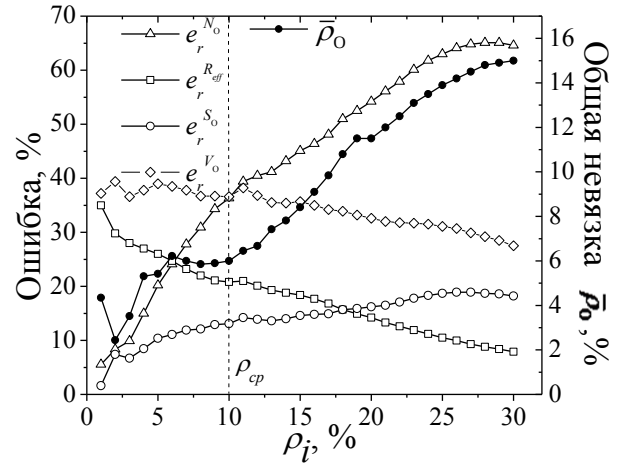


Рис. 28. Ошибка восстановления эффективного размера (квадрат), общей концентрации (треугольник), площади поверхности (круг) и объема (ромб) всего профиля, а также общая невязка (заштрихованный круг) в зависимости от величины невязки ρ_i . Вертикальная линия – интервал усреднения.

Во-вторых, одновременная пост-обработка всего профиля данных значительно снижает время расчетов. Так, обработка набора профилей $3\beta+2\alpha$ с помощью двумерного регуляризирующего алгоритма, включая все шаги а)-е), требует около 2-2.5 часов работы персонального компьютера с процессором Pentium IV и тактовой частотой 3 ГГц. Для сравнения: на первоначальную обработку набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ с какого-либо высотного слоя с помощью одномерного алгоритма, включая только шаги а)-б), уходит около 5 минут. Учитывая, что таких высотных слоев в профиле $N_L=11$, то общее время первоначальной обработки данных всей трассы зондирования будет около 1 часа. К этому времени надо добавить также продолжительность пост-обработки пространства решений, идентификацию физического пространства, т.е. выполнение шагов в)-е) алгоритма, сшивку результатов в единый профиль. Оценку их продолжительности достаточно трудно сделать, т.к. она зависит от конкретного случая. Часто такая работа занимает целый день, поэтому применение двумерного алгоритма позволяет увеличить скорость обработки данных многоволнового зондирования примерно в 5 раз. Оптимизация вычислительного процесса обеспечила возможность проведения полномасштабного моделирования и формирования мощной статистики, включающей результаты обработки более 250 различных наборов профилей оптических данных.

Вернемся к анализу статистики решений для двухслойной аэрозольной системы. Как уже отмечалось, каждая из реализаций возмущенных профилей оптических данных подвергается обработке с помощью одномерного и двумерного алгоритма, в результате чего возникает по 10 решений, таких как поверхность $\nu(r,z)$, профиль эффективного размера $r_{eff}(z)$, общей концентрации $n_o(z)$, площади поверхности $s_o(z)$, объёма $v_o(z)$ и КПП $m(z)$. Для удобства анализа мы усредняем 10 решений и находим их стандартный разброс, или погрешность. На рис. 29, 30 усредненные таким образом решения, полученные с помощью одномерного алгоритма, представлены кривыми, снабженными кружками (индекс 1), а с помощью двумерного – квадратами (индекс 2). Сплошные линии без маркеров означают тестируемый (точный) профиль, планка погрешности – стандартный разброс. Табл. 8 суммирует результаты применения обоих алгоритмов, представляющие собой средние значения параметров аэрозольного слоя. Кроме того, мы ввели в неё колонку «+/-», содержащую в строчках знак «+», если двумерный алгоритм дает лучший результат, чем одномерный.

Анализ результатов показывает, что в оценке профиля общей площади поверхности $s_o(z)$ значительной разницы между обоими алгоритмами не возникает. Данный параметр всегда характеризовался наибольшей точностью и стабильностью при восстановлении. При рассмотрении профилей $v_o(z)$ и $r_{eff}(z)$ ситуация меняется и восстановленные значения двумерным алгоритмом лучше согласуются с точным решением. Это можно объяснить, если сравнить восстановленные РАР на высотах 0.9 км и 2.1 км (см. рис. 30). РАР, полученные методом двумерной регуляризации (точечные кривые), в отличие от РАР, полученных одномерным алгоритмом (пунктирные кривые), не имеют ложной грубой моды в диапазоне размеров частиц около 1 мкм.

Наибольшая ошибка среди микрофизических параметров наблюдается при оценке общей концентрации. Тем не менее, двумерный алгоритм снова точнее по сравнению с одномерным алгоритмом. Более того, двумерный

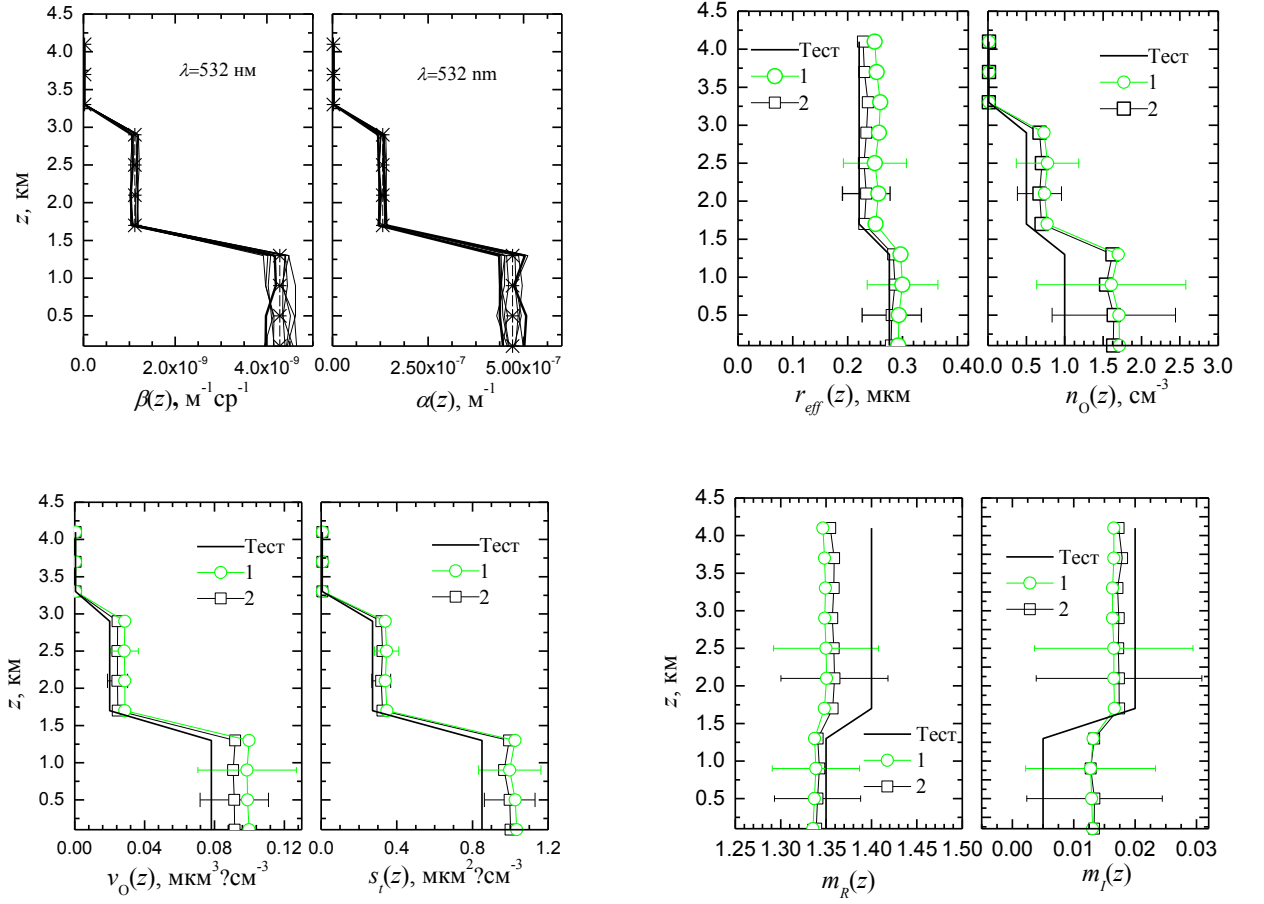


Рис. 29. Двухслойная аэрозольная система. Возмущенные (сплошные линии) и невозмущенные (звезды) профили коэффициентов обратного рассеяния $\beta(z)$ и ослабления $\alpha(z)$ на длине волны 532 нм и решения, полученные с помощью одномерного (1) и двумерного алгоритмов (2), для профилей эффективного размера $r_{eff}(z)$, общей концентрации $n_0(z)$, площади поверхности $s_0(z)$ и объема $v_0(z)$, КПП $m(z) = m_R(z) - im_I(z)$. Сплошная линия (Тест) соответствует тестируемому (точному) профилю, планка погрешности – стандартному разбросу.

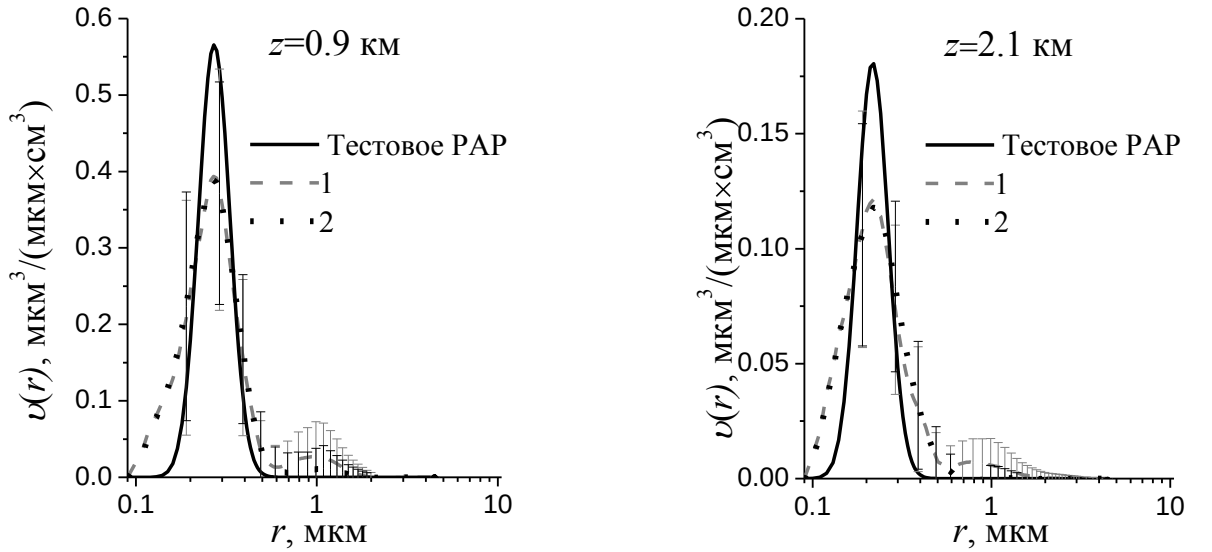


Рис. 30. РАР, восстановленные с помощью одномерного (1) и двумерного (2) алгоритмов на высотах 0.9 и 2.1 км.

алгоритм ведет к более стабильной оценке, характеризующейся меньшим стандартным отклонением (погрешностью), что является следствием дополнительного сглаживания вдоль направления зондирования. Более высокая стабильность демонстрируется двумерным алгоритмом и при оценке остальных микрофизических параметров.

При использовании регуляризации вдоль направления z возникает угроза потери информации в интенсивных аэрозольных слоях вследствие дополнительного сглаживания. Примечательно, что в рассматриваемом случае двумерный алгоритм различает границу раздела двух аэрозольных слоев для всех четырех микрофизических параметров, другими словами, детектирует перепад свойств частиц. Конечно, в реальном эксперименте такой ярко выраженный переход между аэрозольными слоями невозможен. Однако необходимо учитывать то обстоятельство, что мы можем принять в расчет профиль оптических данных с более высоким разрешением по высоте, например, $\Delta z = 200$ м, и тем самым усилить влияние регуляризирующего эффекта в направлении z . Поэтому полученные до сих пор результаты подтверждают преимущества двумерного регуляризирующего алгоритма и позволяют перейти к анализу случая с более сложными профилями оптических данных (см. рис. 32).

Еще одним важным результатом, вытекающим из анализа статистики решений двумерного алгоритма, является погрешность восстановления эффективного радиуса, общих площади поверхности и объема, которая находится в пределах 25 %, рассчитанная без привлечения углубленного анализа пространства решений. Наименьшая погрешность, как и прежде, возникает при оценке общей площади поверхности. В этой связи необходимо еще раз подчеркнуть, что в ходе инверсионного процесса [см. шаг б) алгоритма] генерируется математическое пространство решений, которое порождает сравнительно большую величину погрешности. Она может быть уменьшена до приемлемого уровня при использовании классической регуляризации только в результате привлечения углубленного анализа пространства решений, в частности процедуры усреднения [13]. Этот результат есть плод более чем десятилетнего опыта, накоп-

ленного при работе с одномерным алгоритмом. По крайней мере, не худший результат, достигнутый с использованием двумерного алгоритма без привлечения богатого опыта работы с ним, очередной раз демонстрирует его потенциал.

Таблица 8.

Сравнение решения обратной задачи, полученного одномерным и двумерными алгоритмами для двухслойной аэрозольной системы

Параметр	Тестовое значение	Одномерный алгоритм		Двумерный алгоритм		+/-
		Значение*	Ошибка	Значение*	Ошибка	
Аэрозольный слой высотой 0-1.7 км						
r_{eff} , МКМ	0.28	0.30±0.06	9%	0.29±0.06	4%	+
n_o , см ⁻³	1.00	1.61±0.97	61%	1.54±0.75	54%	+
s_o , МКМ ² /см ⁻³	0.85	1.00±0.16	17%	0.97±0.13	14%	+
v_o , МКМ ² /см ⁻³	0.078	0.1±0.03	26%	0.091±0.020	16%	+
m_R	1.350	1.34±0.05	1%	1.34±0.05	1%	
m_I	0.0050	0.013±0.011	155%	0.013±0.011	155%	
Аэрозольный слой высотой 1.7-2.9 км						
r_{eff} , МКМ	0.22	0.26±0.06	16%	0.23±0.04	6%	+
n_o , см ⁻³	0.50	0.74±0.38	47%	0.67±0.29	34%	+
s_o , МКМ ² /см ⁻³	0.27	0.34±0.06	25%	0.32±0.05	17%	+
v_o , МКМ ² /см ⁻³	0.020	0.029±0.008	43%	0.025±0.006	22%	+
m_R	1.400	1.35±0.06	4%	1.36±0.06	3%	+
m_I	0.0200	0.017±0.013	17%	0.017±0.014	13%	

*Примечание. Значение характеризуется решением, полученным соответствующим алгоритмом и его погрешностью.

В отношении КПП улучшение результатов не такое ощутимое, как в случае с эффективным размером и другими интегральными параметрами исследуемого РАР. Реальная часть КПП обоими алгоритмами оценивается приблизительно одинаково. Как и для микрофизических параметров, мы можем найти границу раздела двух аэрозольных слоев. Что касается мнимой части КПП, оба алгоритма дают её переоценку, однако погрешность алгоритмов «накрывает» истинное значение. Несмотря на значительную погрешность, из рис. 29 мы видим, что граница раздела двух аэрозольных слоев всё ещё различима. Как отмечалось в главе 1, для малых значений мнимой части до $i0.005$ мы можем достоверно оценить только её верхнюю границу. Для больших значений погрешность составляет около 50%.

Подводя итоги анализа статистики решений для двухслойной аэрозольной системы, мы можем заключить, что двумерный алгоритм обеспечивает лучшие результаты практически для всех параметров аэрозолей. Это дает основание утверждать, что повышение точности восстановления с помощью двумерной регуляризации обусловлено более сильной корреляцией свойств частиц между соседними высотными слоями при введении дополнительного ограничения по дистанции зондирования.

Для обобщения полученных результатов на произвольный случай необходимо провести моделирование, в котором профили оптических данных описываются более сложной геометрией. Рассмотрим ситуацию, когда профиль формируется из трехслойной аэрозольной системы, изображенной на рис. 31. Нижний аэрозольный слой может описывать чистый морской слой. Над областью раздела, описываемой вторым слоем, мы определяем третий слабо поглощающий слой антропогенного загрязнения. Рис. 32 показывает 10 возмущенных профилей коэффициентов обратного рассеяния и ослабления на длине волны 532 нм, используемые в качестве исходных данных для обратной задачи, а также статистику решений, полученных для аэрозольных параметров. Рис. 33 показывает статистику восстановленных РАР. В таблице 9 сведены их интегральные параметры.

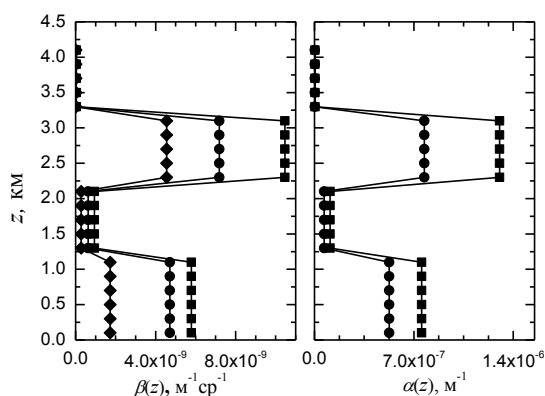


Рис. 31. Профили коэффициентов обратного рассеяния и ослабления на длинах волн 355, 532, 1064 нм.

Как и в случае с двухслойной аэрозольной системой, общие площадь поверхности, объём и до определенной степени концентрация оцениваются более точно двумерным алгоритмом. С еще большей точностью восстанавливается эффективный радиус во всех трех аэрозольных слоях. Снова граница раздела между всеми тремя аэрозольными слоями различима

для всех микрофизических параметров. РАР, восстановленное двумерным

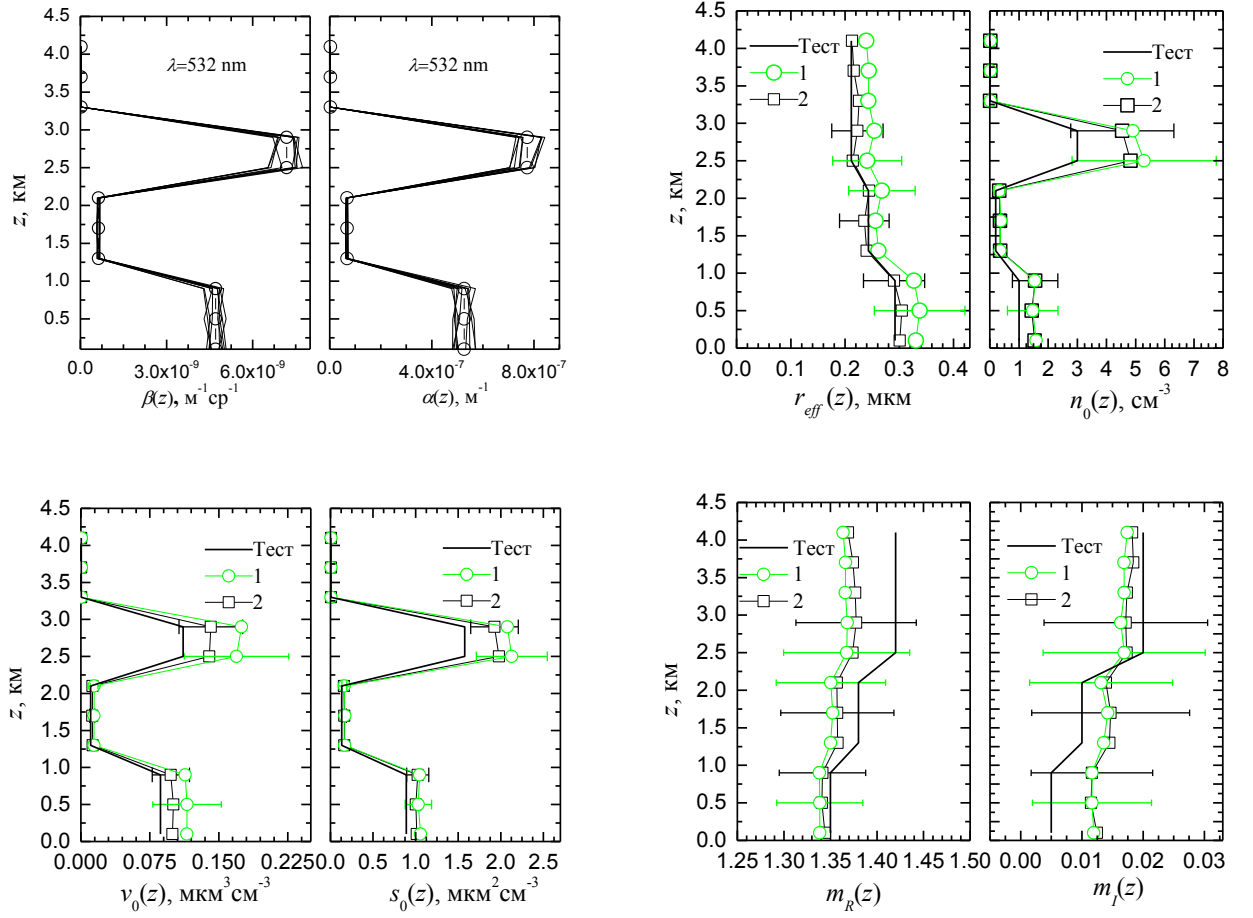


Рис. 32. Трехслойная аэрозольная система. Возмущенные (сплошные линии) и невозмущенные (звезды) профили коэффициентов обратного рассеяния $\beta(z)$ и ослабления $\alpha(z)$ на длине волны 532 нм и решения, полученные с помощью одномерного (1) и двумерного алгоритмов (2), для профилей эффективного размера $r_{eff}(z)$, общей концентрации $n_0(z)$, площади поверхности $s_0(z)$ и объема $v_0(z)$, КПП $m(z) = m_R(z) - im_I(z)$. Сплошная линия (Тест) соответствует тестируемому (точному) профилю, планка погрешности – стандартному разбросу.

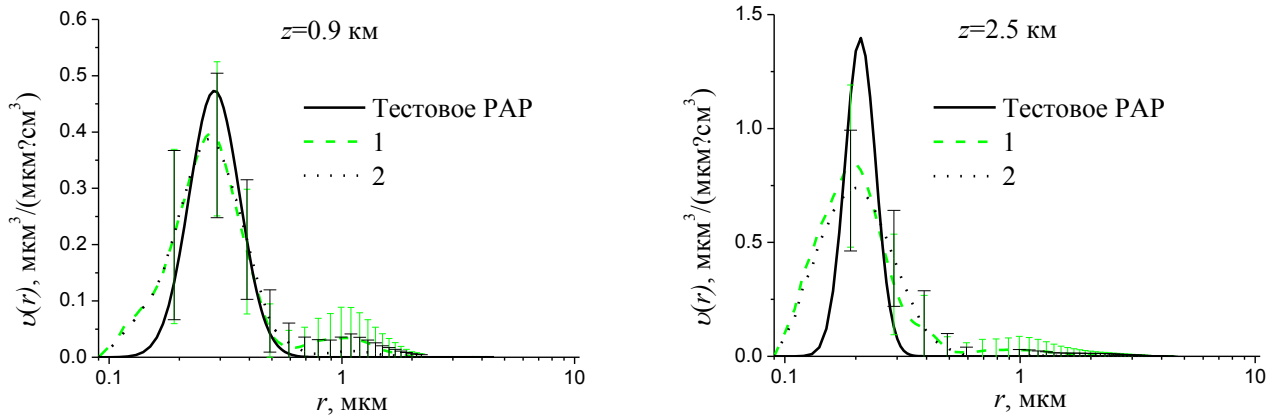


Рис. 33. PAP, восстановленные с помощью одномерного (1) и двумерного (2) алгоритмов на высотах 0.9 и 2.5 км трехслойной аэрозольной системы.

алгоритмом, лучше согласуется с тестовым из-за отсутствия осцилляций в длинноволновой области около 1 мкм.

Реальная часть КПП может быть реконструирована с помощью двумерного алгоритма во всех аэрозольных слоях, если принять во внимание величину погрешности. Перепад между центральным и верхним аэрозольным слоем различается хуже, чем перепад между центральным и нижним аэрозольным слоем.

Таблица 9.

Сравнение решения обратной задачи, полученного одномерным и двумерными алгоритмами для трехслойной аэрозольной системы

Параметр	Тестовое значение	Одномерный алгоритм		Двумерный алгоритм		+/-
		значение	Ошибка	значение	Ошибка	
Аэрозольный слой высотой 0-1.1 км						
r_{eff} , МКМ	0.29	0.33±0.08	12%	0.29±0.06	1%	+
n_o , см ⁻³	1.00	1.54±0.93	54%	1.56±0.78	56%	-
s_o , МКМ ² /см ⁻³	0.89	1.05±0.16	18%	1.02±0.13	15%	+
v_o , МКМ ² /см ⁻³	0.087	0.113±0.036	31%	0.098±0.020	13%	+
m_R	1.35	1.34±0.05	1%	1.34±0.05	1%	
m_I	0.005	0.012±0.010	133%	0.012±0.010	133%	
Аэрозольный слой высотой 1.3-2.1 км						
r_{eff} , МКМ	0.24	0.26±0.06	5%	0.24±0.05	3%	+
n_o , см ⁻³	0.20	0.38±0.21	90%	0.35±0.16	77%	+
s_o , МКМ ² /см ⁻³	0.13	0.17±0.03	29%	0.16±0.02	23%	+
v_o , МКМ ² /см ⁻³	0.011	0.014±0.004	33%	0.012±0.003	17%	+
m_R	1.38	1.35±0.06	2%	1.36±0.06	2%	+
m_I	0.010	0.014±0.013	42%	0.015±0.013	47%	-
Аэрозольный слой высотой 2.3-3.1 км						
r_{eff} , МКМ	0.21	0.24±0.06	14%	0.21±0.05	1%	+
n_o , см ⁻³	3.00	5.29±2.47	76%	4.83±1.89	61%	+
s_o , МКМ ² /см ⁻³	1.58	2.13±0.42	35%	1.98±0.31	26%	+
v_o , МКМ ² /см ⁻³	0.111	0.169±0.057	52%	0.140±0.035	26%	+
m_R	1.42	1.37±0.07	4%	1.37±0.06	3%	+
m_I	0.020	0.017±0.013	16%	0.017±0.013	13%	

Мнимая часть КПП также восстанавливается двумерным алгоритмом. И снова мы находим наибольшую ошибку в нижнем аэрозольном слое, где тестовое, или истинное, значение мало, что, как уже неоднократно упоминалось, создает сложности при работе алгоритма. Если в нижних аэрозольных слоях

мнимая часть систематически переоценивается, то в верхнем аэрозольном слое она слегка недооценена.

Как и в случае с двухслойной аэрозольной системой, лучшие результаты восстановления эффективного радиуса и др. интегральных параметров РАР достигаются при использовании двумерного регуляризирующего алгоритма. Ошибка оценки реальной части КПП практически не отличается у одномерного и двумерного алгоритмов. В отношении мнимой части КПП результаты неоднозначны. В двух из трех аэрозольных слоев точность её восстановления обоими алгоритмами сопоставима, тогда как в одном слое одномерный алгоритм показывает немного лучшее исполнение.

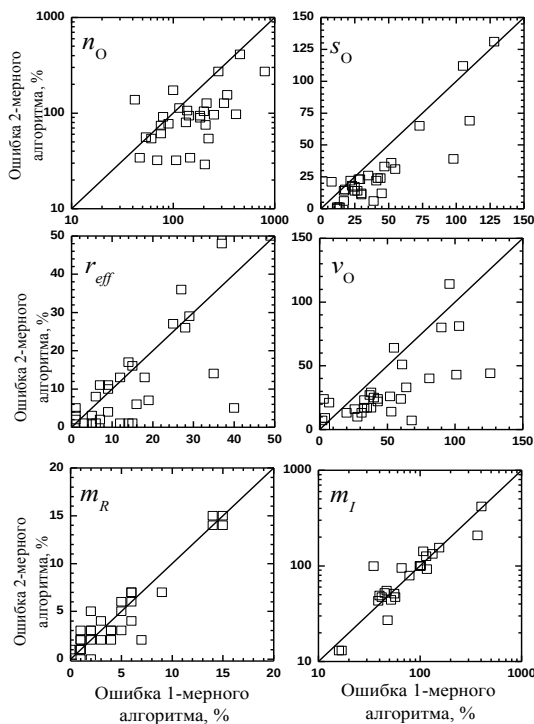


Рис. 34. Сравнение ошибки восстановления эффективного размера r_{eff} , общей концентрации n_o , площади поверхности s_o и объёма v_o , КПП $m = m_R - im_I$ между двумерным и одномерным алгоритмами.

всех высотных слоях, выполненного одномерным и двумерным алгоритмами по отдельным реализациям возмущенных оптических данных. На нем мы показываем относительное отклонение в процентах восстановленных значений от тестовых, истинных, значений для эффективного размера r_{eff} , общих концентрации n_o , площади поверхности s_o и объёма v_o , КПП $m = m_R - im_I$.

До сих пор мы проанализировали профили, включающие 2 и 3 аэрозольных слоя. В общей сложности мы провели моделирование с наборами профилей, имеющими пять различных геометрических форм и разновидностей аэрозольных частиц. Для каждого из наборов генерировалось до 50 реализаций случайной ошибки, достигающей в отдельных случаях $e_r^{\max} = 20\%$. В итоге было обработано более 250 возмущенных наборов профилей. Рис. 34 представляет статистический анализ точности восстановления параметров аэрозолей на

Как видно, ключевые интегральные параметры РАР (общие концентрация, площадь поверхности и объём) в среднем при моделировании получены с более высокой точностью двумерным регуляризирующим алгоритмом. Действительно, около 80 % случаев характеризуются лучшими результатами, когда дополнительно активируется сглаживание вдоль дистанции зондирования. При оценке эффективного размера улучшение результатов обнаружено в 50 % случаев. В 50 % из всех восстановленных реальных частей КПП аналогичный или лучший результат демонстрируется двумерным алгоритмом. Аналогичный вывод можно сделать и в отношении мнимой части КПП.

Проверка двумерного алгоритма при обработке данных лидарного зондирования в реальных условиях и сравнение полученных результатов с результатами локального забора проб для контроля точности восстановления параметров аэрозолей дистанционным методом проводится в гл. 5.

3.7. Семейство методов на базе двумерной концепции математической модели

Двумерная математическая модель позволяет построить несколько подходов, полезных с точки зрения дальнейшего применения теперь уже в явном виде *априорной* информации о высотном распределении данных лидарного зондирования, а также возможности одновременной обработки данных, получаемых в результате комбинирования различных методов зондирования. Покажем наиболее интересные из таких подходов.

Как мы видели, профили оптических данных содержат информацию о высотном поведении свойств аэрозолей вдоль трассы зондирования (см., например, рис. 29, 31). Из них следует, что если оптические данные не меняются в высотных слоях, расположенных последовательно друг за другом, мы можем предположить, что микрофизические параметры в них также не претерпевают колебаний. И наоборот, скачок в профиле оптических данных, или сильный градиент, может быть признаком изменения микрофизических параметров на соответствующей высоте. Ясно, что возникающий при этом перепад в профи-

лях оптических данных и микрофизических параметрах должен быть согласованным. В качестве меры изменения функции в точке при некоторых вариациях её аргумента служит производная. Поскольку профили оптических данных, используемые для решения рассматриваемых нами задач (10), хорошо «сглажены», мы можем достаточно аккуратно найти их производную по высоте. Допуская, что профили $m(z)$, $r_{\min, \max}(z)$, слабо зависят от высоты, дифференцирование уравнения (10) с учетом замены (55) ведет к уравнению

$$\int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_i(\lambda, m(z), r) \frac{\partial \nu(r, z)}{\partial z} dr \approx \frac{\partial g_i(\lambda, z)}{\partial z}, \quad i = \alpha, \beta_{\parallel}, \beta_{\perp} \quad (83)$$

Применим дискретизацию (30), (62), тогда это уравнение в конечно-разностной форме примет вид [2]

$$\sum_{j=1}^{N_B} a_{pj}^{(l)} [w_j^{(l)} - w_j^{(l+1)}] = g_p^{(l)} - g_p^{(l+1)}, \quad (84)$$

$$p=1, 2, \dots, N_O; \quad l=1, 2, \dots, N_L-1;$$

где коэффициенты $a_{pj}^{(l)}$ определяются по формуле (60). Мы получили $N_O \times (N_L-1)$ конечно-разностных уравнений, которые все вместе образуют обобщенную систему линейных алгебраических уравнений

$$\tilde{\mathbf{A}}' \tilde{\mathbf{w}} = \tilde{\mathbf{g}}' \quad (85)$$

Чтобы её замкнуть, достаточно применить граничные условия в виде уравнения (10), например, на начальной высоте z_1 . Решением обобщенной системы (85) уже является поверхность $\nu(r, z)$ и совпадает с решением задачи (59). Блочные матрица и вектора в обобщенной системе (85) имеют следующие структуры

$$\tilde{\mathbf{A}}' = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}^{(1)}]_{N_O \times N_B} & -[\mathbf{A}^{(2)}]_{N_O \times N_B} & \mathbf{0} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & [\mathbf{A}^{(2)}]_{N_O \times N_B} & -[\mathbf{A}^{(3)}]_{N_O \times N_B} & \dots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & -[\mathbf{A}^{(N_L-1)}]_{N_O \times N_B} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \dots & [\mathbf{A}^{(N_L-1)}]_{N_O \times N_B} & -[\mathbf{A}^{(N_L)}]_{N_O \times N_B} \end{bmatrix}_{N_L-1 N_O \times N_B N_L}, \quad (86)$$

$$\tilde{\mathbf{w}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{w}^{(1)}]_{N_B \times 1} \\ [\mathbf{w}^{(2)}]_{N_B \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{w}^{(N_L)}]_{N_B \times 1} \end{bmatrix}_{N_B N_L \times 1}, \quad \tilde{\mathbf{g}}' = \begin{bmatrix} [\mathbf{g}^{(1)}]_{N_O \times 1} - [\mathbf{g}^{(2)}]_{N_O \times 1} \\ [\mathbf{g}^{(2)}]_{N_O \times 1} - [\mathbf{g}^{(3)}]_{N_O \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{g}^{(N_L-1)}]_{N_O \times 1} - [\mathbf{g}^{(N_L)}]_{N_O \times 1} \end{bmatrix}_{N_L-1 N_O \times 1} \quad (87)$$

Их сравнение со структурами матрицы и векторов обобщенной системы (59) показывает, что принципиальная разница возникает только у матриц $\tilde{\mathbf{A}}$ и $\tilde{\mathbf{A}}'$. Если в первом случае ненулевые блоки расположены на главной диагонали, то во втором случае к ненулевым блокам на главной диагонали добавляются блоки на побочной диагонали. Это накладывает дополнительные ограничения, при которых решение на каждом следующем высотном слое $\mathbf{w}^{(l+1)}$ зависит от решения на предыдущем высотном слое $\mathbf{w}^{(l)}$. Степень зависимости решений на соседних высотных слоях определяется разностью в оптических данных тех же высотных слоев $[\mathbf{g}^{(l)} - \mathbf{g}^{(l+1)}]$.

Для нахождения решения задачи (85) можно привлечь те же подходы, которые мы используем при рассмотрении задачи (59). В частности, метод наименьших квадратов приводит к решению

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{A}}')^{-1} \tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{g}}' \quad (88)$$

Поскольку в этом случае решение неустойчиво, необходимо его регуляризовать. Одномерный регуляризирующий алгоритм формализуется правилом

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{A}}' + \gamma \tilde{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{g}}', \quad (89)$$

а двумерная регуляризация представляется следующим образом

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{A}}' + \gamma \tilde{\mathbf{H}} + \kappa \hat{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\mathbf{A}}'^T \tilde{\mathbf{g}}' \quad (90)$$

Отличительная особенность семейства методов (88)-(90) состоит в том, что они позволяют получать решения, которые коррелированы от слоя к слою. Степень корреляции «автоматически» определяется исходным профилем оптических данных, используя, тем самым, в явном виде *априорную* информацию о высотном распределении, или градиенте, свойств аэрозолей. Подчеркнем, что еще большая степень коррелированности свойств аэрозолей достигается в результате нахождения производных более высокого порядка в уравнении (83). Кроме того, решение задачи (56) можно находить с помощью суперпозиции правил (90) и (77) и т.д., используя одновременно все имеющиеся ограничения на пространства решений.

Перейдем к построению подхода, позволяющего обрабатывать одновременно данные, получаемые в результате комбинирования различных методов

зондирования. Такая необходимость вызвана тем, что исследуемые здесь задачи многоволнового лидарного зондирования являются недоопределенными, характеризуются высокой измерительной погрешностью правой части. Было бы естественно расширить данные лидарного зондирования дополнительной информацией с тем, чтобы повысить точность, устойчивость и достоверность решения. На сегодняшний день наиболее перспективным представляется привлечение такой информации из результатов пассивного зондирования с помощью солнечных радиометров, составляющих измерительную основу AERONETa (см. параграф 2.1).

Как мы упоминали в параграфе 3.3, в результате обработки данных пассивного зондирования определяется, в частности, интегральное РАР всего атмосферного столба (68). Используем эту информацию как *априорную* для нахождения решения задачи (56), или её дискретного аналога (59). Весовые коэффициенты, используемые для аппроксимации функций $V(r)$ и $\nu(r,z)$, связаны уравнением (71). По формуле прямоугольников заменим это уравнение конечной суммой

$$\frac{1}{\Delta z} W_j \approx \sum_{l=1}^{N_L} w_j^{(l)} \quad j=1, \dots, N_B \quad (91)$$

N_B таких сумм образует систему линейных алгебраических уравнений с $N_B \times N_L$ неизвестными $w_j^{(l)}$. Несмотря на то, что эта система вырождена и имеет бесчисленное число решений, она может быть использована как ограничение, которое накладывается на весовые факторы $w_j^{(l)}$ для задачи (59). Поэтому представляется разумным объединить обе системы (91) и (59) в одну. В результате мы получим новую систему линейных алгебраических уравнений

$$\tilde{\tilde{\mathbf{A}}} \tilde{\tilde{\mathbf{w}}} = \tilde{\tilde{\mathbf{g}}} \quad (92)$$

со специальной структурой блочных матрицы $\tilde{\tilde{\mathbf{A}}}$ и вектора $\tilde{\tilde{\mathbf{g}}}$:

$$\tilde{\tilde{\mathbf{A}}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{A}^{(1)}]_{N_O \times N_B} & \mathbf{O} & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & [\mathbf{A}^{(2)}]_{N_O \times N_B} & \dots & \mathbf{O} \\ \dots & \dots & \dots & \mathbf{O} \\ \mathbf{O} & \mathbf{O} & \dots & [\mathbf{A}^{(N_L)}]_{N_O \times N_B} \\ [\mathbf{E}]_{N_B \times N_B} & [\mathbf{E}]_{N_B \times N_B} & \dots & [\mathbf{E}]_{N_B \times N_B} \end{bmatrix}_{(N_L N_O + N_B) \times N_B N_L}, \quad \tilde{\tilde{\mathbf{g}}} = \begin{bmatrix} [\mathbf{g}^{(1)}]_{N_O \times 1} \\ [\mathbf{g}^{(2)}]_{N_O \times 1} \\ \dots \\ [\mathbf{g}^{(N_L)}]_{N_O \times 1} \\ \frac{1}{\Delta z} \mathbf{V} \end{bmatrix}_{(N_L N_O + N_B) \times 1},$$

в которых матрица $\mathbf{E}$ является единичной, а вектор-столбец $\mathbf{V}$ содержит элементы $V(r_j)=W_j$, $j=1, \dots, N_B$. Снова применяя метод наименьших квадратов, одномерную или двумерную регуляризацию, мы найдем решения задачи (92) по правилам

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{A}}})^{-1} \tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{g}}}, \quad (93)$$

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{A}}} + \gamma \tilde{\tilde{\mathbf{H}}})^{-1} \tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{g}}}, \quad (94)$$

или

$$\tilde{\mathbf{w}} = (\tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{A}}} + \gamma \tilde{\tilde{\mathbf{H}}} + \kappa \hat{\mathbf{H}})^{-1} \tilde{\tilde{\mathbf{A}}}^T \tilde{\tilde{\mathbf{g}}} \quad (95)$$

соответственно. Отличительная особенность семейства методов (93)-(95) состоит в том, что они используют результаты пассивного зондирования в виде данных $\mathbf{V}$, которые «подавляют» возможные осцилляции в решении $\tilde{\mathbf{w}}$ вследствие ограничения (91). Предварительно полученные результаты применения этого семейства методов и сравнение с результатами традиционных подходов демонстрируют увеличение точности и устойчивости решения задачи (56). С полученными результатами и их сравнением можно ознакомиться в [80].

В заключение необходимо подчеркнуть, что построенные в настоящем параграфе подходы (88)-(90) и (93)-(95) могут быть комбинированы в любом сочетании между собой. Исследование такой возможности мы оставляем за рамками настоящей работы.

3.8. Выводы к третьей главе

Построена двумерная математическая модель для задач многоволнового лидарного зондирования аэрозолей. Она связывает профиль оптических свойств частиц, коэффициентов ослабления и обратного рассеяния, с двумер-

ной функцией, описывающей распределение аэрозолей по размеру и по дистанции зондирования, двукратным интегральным преобразованием. Ядром двукратного интегрального преобразования являются сечения ослабления и обратного рассеяния. Сформулирована двумерная обратная задача восстановления параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования.

Разработан двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей, таких как эффективный размер, концентрация, общие площадь поверхности и объём, КПП, по всей дистанции зондирования. Он обеспечивает более высокую устойчивость и надежность при использовании в условиях ограниченного набора оптических данных и значительной погрешности их измерения (до 20 %).

Работа регуляризирующего алгоритма основана на применении специально построенного двумерного стабилизатора для функционала Тихонова. Построенный стабилизатор позволяет повысить устойчивость и точность восстановления профиля параметров аэрозолей в результате регуляризации решения обратной задачи одновременно по размеру частиц r и по дистанции зондирования z .

Обобщение обратных задач многоволнового лидарного зондирования на двумерный случай привело к необходимости модификации существующего специального принципа отбора индивидуальных решений в окрестности минимума модифицированной невязки. Модифицированная процедура постобработки пространства решений основана на рассмотрении не отдельного высотного слоя трассы зондирования, как ранее, а всего профиля в целом, для которого вводится общая невязка усредненного решения. Анализ поведения общей невязки в окрестности минимального значения позволяет сделать выбор оптимального интервала усреднения индивидуальных решений на всех высотных слоях всего профиля одновременно.

Модифицированная процедура постобработки пространства решений в купе с дополнительной его стабилизацией вследствие двумерной регуляризации позволила существенно оптимизировать вычислительный процесс. В ре-

зультате применение двумерного алгоритма ведет к увеличению скорости обработки данных многоволнового зондирования примерно в 5 раз по сравнению с одномерным алгоритмом.

Выполнено полномасштабное численное моделирование применения двумерного регуляризирующего алгоритма для обработки профилей оптических данных, возмущенных случайной ошибкой до 20% и характеризующихся различной геометрией содержащихся в них аэрозольных слоев. Сравнительный анализ точности всех полученных решений продемонстрировал превосходство двумерного регуляризирующего алгоритма над одномерным. В частности, показано, что общая концентрация, площадь поверхности и объём оцениваются с лучшими результатами в 80 % случаев, когда дополнительно активируется сглаживание вдоль дистанции зондирования. При оценке эффективного размера улучшение результатов обнаружено в 50 % случаев. КПП восстанавливается обоими алгоритмами с сопоставимой точностью.

На базе 2-мерной концепции математической модели построено семейство методов, обеспечивающих дальнейшее усовершенствование двумерного регуляризирующего алгоритма. В частности, показана возможность применения в явном виде *априорной* информации о высотном распределении свойств аэрозолей, содержащейся в данных лидарного зондирования, а также возможность одновременной обработки данных, получаемых в результате комбинирования различных методов зондирования.

Глава 4. БЫСТРЫЙ АЛГОРИТМ ДЛЯ ЛИНЕЙНОЙ ОЦЕНКИ ПОЛЯ МИКРОФИЗИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ АЭРОЗОЛЕЙ ПО ДАННЫМ ЛИДАРНЫХ ИЗМЕРЕНИЙ

В этой главе исследуется возможность непосредственной оценки интегральных параметров распределения аэрозолей по размерам из данных лидарного зондирования. Мы исходим из того, что концентрация аэрозолей может быть хорошо аппроксимирована линейной комбинацией аэрозольных характеристик, измеряемых многоволновым лидаром. Это означает, что концентрация непосредственно извлекается из лидарных измерений без необходимости восстановления РАР, которое само по себе представляется нетривиальной процедурой. Определение коэффициентов упомянутой линейной комбинацией основывается на разложении РАР в ряд по ядрам интегрального преобразования, которое связывает это РАР с оптическими данными. В результате их определения мы приходим к методу, альтернативному регуляризации, позволяющему делать быстрые оценки микрофизических параметров частиц. Как обычно, мы подробно описываем соответствующий алгоритм, исследуем его точность, устойчивость к возмущениям в исходных данных, как с помощью аналитических инструментов, так и с использованием математического моделирования.

4.1. Концептуальная модель

Как мы увидели, все богатство методов решения обратных задач многоволнового лидарного зондирования так или иначе связано с использованием принципов регуляризации [105,141, 79]. Поскольку задачи некорректные и в общем случае лидарные данные нельзя интерпретировать единственным образом, конструируется семейство решений – компакт, при этом привлекаются различного рода догадки, начальные предположения о свойствах аэрозолей, по-

звolyающие сделать *априорные* ограничения. В результате возникает семейство регуляризованных решений, часть из которых с невязкой, лежащей в окрестности минимального значения, усредняется и находится окончательная оценка свойств аэрозолей. Несмотря на то, что в предлагаемых алгоритмах успешно предпринимались попытки по их оптимизации, развитие лидарной техники происходит большими темпами и в ближайшей перспективе войдут в строй многоволновые системы авиационного и космического базирования, которые будут измерять колоссальный объём информации [64]. Эта информация включает данные не только с определенных высотных слоев или целого профиля зондирования, но и данные со всей траектории движения лидарной системы. Поэтому исследования дополнительных возможностей по ускорению обработки данных остаются актуальными.

Еще одной важной особенностью упомянутых методов, используемых для решения рассматриваемых здесь задач, является то, что нам необходим, по крайней мере, набор из пяти оптических данных ($3\beta+2\alpha$), чтобы найти РАР. Однако во многих приложениях, в частности, при размещении лидара на космической платформе, желательно уменьшение их числа. Поэтому разработка подхода, позволяющего непосредственно восстанавливать такие интегральные параметры, как общий объём, площадь поверхности, эффективный размер, также КПП, по уменьшенному набору оптических данных, является важным этапом в упрощении лидарных систем и дальнейшей оптимизации вычислительного процесса.

Один из подходов, реализующих данную концепцию, описан у Туоми [136] и использовался в похожих задачах [37,135]. Донован и Карсвел адаптировали его применительно к задачам многоволнового лидарного зондирования и сформулировали как принципиальный компонентный анализ [40]. В нем разложение РАР в ряд по ядрам интегрального уравнения (10) позволяет непосредственно представить интегральные свойства аэрозолей в виде линейной комбинации исходных оптических данных (коэффициентов ослабления α и обратного рассеяния β). Соответствующие весовые коэффициенты могут быть со-

хранены в банк данных, использование которого обеспечивает чрезвычайно высокую скорость расчетов. Этот подход был дополнительно доработан в недавней публикации [60], где типичные аэрозольные модели распознаются при обработке оптических данных без *априорной* информации о КПП.

Алгоритм, основанный на разложении в ряд по ядрам, предложенный Туоми, адаптированный Донованом и Карсвелом и в дальнейшем доработанный Граафом и др., выглядит весьма обещающим. Его модификация в результате применения идей и подходов, уже разработанных и апробированных в настоящей работе, должна помочь ответить на вызовы, возникающие при лидарном зондировании на современном этапе развития измерительной техники.

4.2. Построение устойчивого решения обратной задачи.

Его обоснование и оценка точности

Рассмотрим обратную задачу (10). Для более наглядной интерпретации результатов при построении альтернативного решения мы будем оперировать её дискретным аналогом вида

$$\mathbf{K} \mathbf{v} \cong \mathbf{g} \quad (96)$$

В данной постановке правая часть, представляемая вектор-столбцом оптических данных $\mathbf{g}$, абсолютно идентична правой части задачи (33) с одноименным вектором и элементами $g_p: p=(i, \lambda_k)=1, 2, \dots, N_0$. Элементами матрицы $\mathbf{K}$ являются значения ядерных функций $K_p(m, r_t)$, заданных на радиусной сетке $r_{\min}=r_1, r_2, \dots, r_N=r_{\max}$ с достаточно малым шагом $\Delta r=(r_N - r_1)/(N-1)$. В этом случае искомое РАР $\nu(r)$ аппроксимируется ступенчатой функцией, или полиномами 0-ого порядка, со значениями $\nu(r_t)$ в узлах r_t , при этом вектор-столбец $\mathbf{v}$ состоит из компонент $v_t=\Delta r \nu(r_t): t=1, 2, \dots, N$. Отметим, что размерность матрицы $\mathbf{K}$ равна $N_0 \times N$, вектора $\mathbf{v} - N \times 1$ и $\mathbf{g} - N_0 \times 1$.

Интерпретируем строки матрицы $\mathbf{K}$ как вектора, образующие базис некоторого ядерного пространства, и спроецируем на него искомый вектор $\mathbf{v}$. В результате мы получим представление вектора $\mathbf{v}$ в виде суммы

$$\mathbf{v} = \mathbf{v}_g + \mathbf{v}_\perp \quad (97)$$

где вектор $\mathbf{v}_g$ – это проекция РАР на ядра интегрального преобразования

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{K}^T \mathbf{x}, \quad (98)$$

а вектор $\mathbf{v}_\perp$ – часть РАР, ортогональная этим ядрам

$$\mathbf{K} \mathbf{v}_\perp = \mathbf{0}, \quad (99)$$

с компонентами $v_{g_t} = \sum_{s=1}^{N_0} x_s K_s(m, r_t) \Delta r$ и $v_{\perp t} = \Delta r v_\perp(r_t)$ соответственно. Элементы x_s

вектор-столбца $\mathbf{x}$ есть не что иное, как коэффициенты разложения РАР в ряд по ядрам интегрального уравнения с остаточным членом $v_\perp(r_t)$:

$$v(r_t) = \sum_{s=1}^{N_0} x_s K_s(m, r_t) + v_\perp(r_t) \quad (100)$$

Детальное описание и обоснованность такого представления изложено, например, в [136]. Подставка суммы (97) в (96) с учетом (98) и (99) ведет к задаче относительно неизвестного вектора $\mathbf{x}$

$$\mathbf{K} \mathbf{K}^T \mathbf{x} = \mathbf{g}, \quad (101)$$

который легко находится по правилу

$$\mathbf{x} = (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{g} \quad (102)$$

Используем этот результат в формуле (98) для получения явного выражения проекции РАР на ядра интегрального преобразования на основе исходных данных обратной задачи

$$\mathbf{v}_g = \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{g} \quad (103)$$

Для дальнейших исследований мы будем также использовать ошибку в разложении (97), которую можно представить следующим образом:

$$\mathbf{v}_\perp = \mathbf{v} - \mathbf{v}_g = [\mathbf{I} - \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{K}] \mathbf{v} \quad (104)$$

Следующим принципиальным моментом при построении решения является переход от поиска РАР непосредственно к его интегральным параметрам. В связи с этим введем преобразование $\mathbf{P}$, обеспечивающее явное выражение вектор-столбца $\mathbf{p}$ с элементами p_i : $i=1, 2, \dots, N_p$, которые не измеряются и должны быть оценены, используя измерения $\mathbf{g}$, через вектор-столбец $\mathbf{v}$:

$$\mathbf{p} \equiv \mathbf{P} \mathbf{v} \quad (105)$$

Суть элементов p_i есть неизмеряемые аэрозольные характеристики, представляющие собой интегральные параметры v_o , s_o , n_o , g_{sca} , g_{abs} . В данном контексте размерность матрицы $\mathbf{P}$ равна $5 \times N$, вектора $\mathbf{p}$ – 5×1 . В общем случае их размерность может быть больше и зависит от количества искоемых параметров N_p . На определении структуры и элементов матрицы $\mathbf{P}$ мы подробно остановимся в параграфе 4.4.

Как и в случае с вектором $\mathbf{v}$ выделим у вектора $\mathbf{p}$ две составляющие, одна из которых, $\mathbf{p}_g$, является проекцией на пространство, образованное измерениями $\mathbf{g}$, а другая, $\mathbf{p}_\perp$, образована «нулевым» пространством $\mathbf{v}_\perp$:

$$\mathbf{p} = \mathbf{P}(\mathbf{v}_g + \mathbf{v}_\perp) = \mathbf{p}_g + \mathbf{p}_\perp \quad (106)$$

Их явное представление возникает при подстановке разложения (97) в (105) с учетом (103) и (104), откуда

$$\mathbf{p} = \mathbf{F} \mathbf{g} + \mathbf{D}_\perp \mathbf{v}, \quad (107)$$

где

$$\mathbf{F} = \mathbf{P} \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1}, \quad (108)$$

и

$$\mathbf{D}_\perp = \mathbf{P} [\mathbf{I} - \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{K}] \quad (109)$$

Сравнение выражений (106) и (107) приводит к следующему представлению:

$$\mathbf{p}_g = \mathbf{F} \mathbf{g}, \quad (110)$$

$$\mathbf{p}_\perp = \mathbf{D}_\perp \mathbf{v}, \quad (111)$$

из чего следует, что составляющая $\mathbf{p}_g$ может быть оценена непосредственно из $\mathbf{g}$, тогда как информацию о другой составляющей $\mathbf{p}_\perp$ нельзя извлечь из измерений.

Элементы матрицы $\mathbf{F}$ могут быть единожды вычислены и сохранены в банк данных, тем самым обеспечивая быстрый расчет проекции $\mathbf{p}_g$. Оценку остаточного члена $\mathbf{p}_\perp$, описывающего математическую ошибку вследствие разложения (100), мы сделаем в рамках численного моделирования для типичных ситуаций. Его особенностью является то, что им нельзя управлять, например, путем изменения шага Δr . Предварительный анализ показывает [см., например,

разложение (107)], что если наблюдения $\mathbf{g}$ чувствительны к изменению параметрического вектора $\mathbf{p}$, а не к особенностям $\mathbf{v}$, то существование «нулевого» пространства $\mathbf{v}_\perp$ не имеет существенного значения и остаточный член $\mathbf{p}_\perp$, в общем, ожидается малым. Как известно, оптические данные очень чувствительны к интересующим нас микрофизическим параметрам, например, к общей концентрации. Это позволяет предположить, что при их оценке с помощью (107) остаточный член $\mathbf{p}_\perp$ мал.

В случаях, когда можно пренебречь $\mathbf{p}_\perp$, обратная задача (96) сводится к нахождению решения $\mathbf{p} \approx \mathbf{p}_g$ по правилу (110), так что

$$\mathbf{p} \approx \mathbf{F} \mathbf{g} = \mathbf{P} \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{g}, \quad (112)$$

без предварительного вычисления вектора $\mathbf{v}$. Применение правила (112) связано с обращением матрицы $\mathbf{K} \mathbf{K}^T$. Как неоднократно отмечалось, в плохо обусловленных задачах эта операция ведет к неустойчивости решения при малых возмущениях в исходных данных. Обычно в таких случаях мы прибегали к регуляризации, которая в данной постановке задачи может быть реализована в виде

$$\mathbf{p}_g = \mathbf{P} \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T + \gamma \mathbf{H})^{-1} \mathbf{g} \quad (113)$$

Однако она требует разработку подходящего критерия выбора оптимального параметра регуляризации γ и его дальнейшее применение в вычислительном процессе. Ясно, что оценка еще одного параметра – это затраты дополнительных временных ресурсов, которые неприемлемы при разработке быстрого алгоритма, являющегося целью исследования настоящей главы.

Для стабилизации решения в данном подходе мы воспользуемся способом, альтернативным регуляризации. В связи с этим проанализируем причины возникновения неустойчивости решения $\mathbf{x}$ задачи (101). Соответствующая ей ковариационная матрица $\mathbf{C} = \mathbf{K} \mathbf{K}^T$ является действительной симметричной и положительно определенной, поэтому все её собственные значения χ_p , $p=1, 2, \dots, N_0$, также действительны и положительны [5]. Упорядочим их в порядке убывания от $\chi_1 = \chi_{\max}$ до $\chi_{N_0} = \chi_{\min}$. Пусть им соответствует ортонормированная сис-

тема собственных векторов $\mathbf{U}_1, \mathbf{U}_2, \dots, \mathbf{U}_{N_O}$. Тогда справедливо представление для ковариационной матрицы [5]

$$\mathbf{C} = \mathbf{K}\mathbf{K}^T = \mathbf{U}\mathbf{D}\mathbf{U}^T, \quad (114)$$

где матрица $\mathbf{U}$ состоит из вектор-столбцов $\mathbf{U}_p$, а диагональная матрица $\mathbf{D}$ – из собственных значений χ_p , расположенных на главной диагонали. Решение задачи (101) в таком представлении выглядит следующим образом

$$\mathbf{x} = \sum_{p=1}^{N_O} \frac{(\mathbf{U}_p, \mathbf{g})}{\chi_p} \mathbf{U}_p, \quad (115)$$

где выражение в круглых скобках означает скалярное произведение векторов. При возмущении исходных данных ошибкой $\Delta \mathbf{g}$

$$\mathbf{g}^{e_r} = \mathbf{g} + \Delta \mathbf{g} \quad (116)$$

решение будет

$$\mathbf{x}^{e_r} = \sum_{p=1}^{N_O} \frac{(\mathbf{U}_p, \mathbf{g}) + (\mathbf{U}_p, \Delta \mathbf{g})}{\chi_p} \mathbf{U}_p \quad (117)$$

Коэффициент $\frac{(\mathbf{U}_p, \Delta \mathbf{g})}{\chi_p}$ может оказаться очень большим при малых χ_p , что ведет к сильному искажению решения. Отсюда становится ясно, почему плохо обусловленные задачи имеют большую меру обусловленности, определяемую отношением максимального собственного значения $\chi_{\max}$ к минимальному $\chi_{\min}$.

Учитывая причины возникновения неустойчивости решения, закономерно «отфильтровать» члены с малыми значениями χ_p , задав некоторое значение $N_O' < N_O$ и принять [2]

$$\mathbf{x}^{e_r} \approx \sum_{i=1}^{N_O'} \frac{(\mathbf{U}_i, \mathbf{g}^{e_r})}{\chi_i} \mathbf{U}_i \quad (118)$$

В этой связи важно аккуратно определить N_O' с тем, чтобы не потерять значимую информацию. Многочисленные исследования [40, 140, 39], выполненные в данном направлении, свидетельствуют, что при наборе измерений $N_O = 5$ основная информация ковариационной матрицы $\mathbf{C}$ заключается в двух-трех компонентах $\mathbf{U}_p$, соответствующих максимальным собственным значениям. Таким

образом, представляется обоснованным ограничить значение N_0' от 3 до 4 и при возникновении плохо обусловленных матриц $\mathbf{C}$ с большой мерой обусловленности использовать следующее правило для её обращения:

$$\mathbf{C}^{-1} = (\mathbf{K}\mathbf{K}^T)^{-1} \approx \mathbf{U}'\mathbf{D}'^{-1}\mathbf{U}'^T, \quad (119)$$

где редуцированные матрицы $\mathbf{D}'$ и $\mathbf{U}'$ не имеют 1-2 минимальных собственных значения и соответствующих собственных векторов соответственно. Удаление из матрицы $\mathbf{D}$ хотя бы одного минимального собственного значения $\chi_{\min}$ и соответствующего собственного вектора $\mathbf{U}_{N_0}$ из матрицы $\mathbf{U}$ позволяет стабилизировать решение без привлечения регуляризации.

Итак, проекция $\mathbf{p}_g$ характеризуется важными особенностями. Её оценка не требует нахождения РАР $\mathbf{v}$. Это дает существенное преимущество по сравнению с традиционными методами решения обратных задач многоволнового лидарного зондирования, основанными на привлечении регуляризации и восстановлении РАР [105, 142, 141, 143, 79]. Действительно, расчет $\mathbf{p}_g$ очень быстрый и включает определение элементов матрицы $\mathbf{F}$ напрямую по формуле (108). Определение её элементов связано с обращением ковариационной матрицы (114), которое осуществляется без привлечения регуляризации и, как следствие, без оценки параметра регуляризации с помощью правила (119). Более того, само по себе представление ковариационной матрицы $\mathbf{C} = \mathbf{K}\mathbf{K}^T$ ведет к размерности $N_0 \times N_0$, где $N_0 < 8$, что позволяет избежать экстремально большие значения её меры обусловленности и, как результат, накопление большой ошибки при обращении. Если же рассмотреть традиционный подход, обеспечивающий восстановление РАР $\mathbf{v}$, то в наших обозначениях ковариационная матрица приняла бы вид $\mathbf{C} = \mathbf{K}^T\mathbf{K}$, а решение с помощью, например, метода наименьших квадратов, соответственно

$$\mathbf{v} = (\mathbf{K}^T\mathbf{K})^{-1} \mathbf{K}^T\mathbf{g} \quad (120)$$

Ковариационная матрица $\mathbf{K}^T\mathbf{K}$ уже имеет размерность $N \times N$, где N – размерность $\mathbf{v}$ и достаточно велико, чтобы обеспечить сходимость уравнения (96). Поэтому размерность у матрицы $\mathbf{K}^T\mathbf{K}$ значительно больше, чем у $\mathbf{K}\mathbf{K}^T$. В частно-

сти, при восстановлении РАР в пассивном методе, предлагаемом в [44], используется $N=22$. В этом случае матрица $\mathbf{K}^T \mathbf{K}$ плохо обусловлена, её обращение становится проблематичным и необходимо привлекать различные типы ограничений, чтобы стабилизировать решение. Ограничение путем требования гладкости, или регуляризации, предлагаемые [136, 116, 18], неизбежно ведет к необходимости разработки специализированных алгоритмов и выполнения оптимальных оценок. В случае с методами, применяемыми в лидарном зондировании [105, 142, 141, 143, 79], РАР описывается с помощью гораздо меньшего числа узлов и $N=N_B < 8$. Однако слишком малое N может вызвать увеличение ошибки аппроксимации в разложении (30) и потерю свойств РАР. В этой связи альтернативный метод, исследуемый в настоящем параграфе, снова имеет преимущества, поскольку для расчета элементов матрицы $\mathbf{F}$ используется «детальное» РАР, задаваемое с высоким разрешением и большим N .

Перейдем к оценке влияния измерительной погрешности $\Delta \mathbf{g}$ на точность решения, получаемого разрабатываемым методом. Общая ошибка метода с учетом (116) и (112) имеет представление

$$\Delta \mathbf{p} = \mathbf{p}^{er} - \mathbf{p} = \mathbf{F} \mathbf{g}^{er} - (\mathbf{F} \mathbf{g} + \mathbf{D}_\perp \mathbf{v}) = \mathbf{F} \Delta \mathbf{g} - \mathbf{D}_\perp \mathbf{v} \quad (121)$$

Предположим, погрешность измерения $\Delta \mathbf{g}$ является случайной без систематической составляющей, т.е. $\langle \Delta \mathbf{g} \rangle = \mathbf{0}$, с ковариационной матрицей $\mathbf{C}_g = \langle \Delta \mathbf{g} \Delta \mathbf{g}^T \rangle$, тогда соответствующая ковариационная матрица для ошибки восстанавливаемых параметров $\Delta \mathbf{p}$ записывается как

$$\mathbf{C}_p = \langle (\mathbf{F} \Delta \mathbf{g} - \mathbf{D}_\perp \mathbf{v}) (\mathbf{F} \Delta \mathbf{g} - \mathbf{D}_\perp \mathbf{v})^T \rangle = \mathbf{C}_p^r + \mathbf{C}_p^s \quad (122)$$

Здесь член $\mathbf{C}_p^r$ характеризует вклад случайной измерительной погрешности $\Delta \mathbf{g}$ в $\mathbf{C}_p$, а $\mathbf{C}_p^s$ – неслучайная составляющая общей ошибки, обусловленная существованием вектора $\mathbf{v}_\perp$, ортогонального ядрам $\mathbf{K}$. Они могут быть выражены следующим образом:

$$\mathbf{C}_p^r = \mathbf{F} \langle \Delta \mathbf{g} \Delta \mathbf{g}^T \rangle \mathbf{F}^T = \mathbf{P} \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{C}_g (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{K} \mathbf{P}^T \quad (123)$$

$$\mathbf{C}_p^s = \mathbf{p}_\perp \mathbf{p}_\perp^T = \mathbf{D}_\perp (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) \mathbf{D}_\perp^T = \mathbf{P} [\mathbf{I} - \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{K}] (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) [\mathbf{I} - \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{K}] \mathbf{P}^T \quad (124)$$

Первый член вычисляется на основе ковариационной матрицы $\mathbf{C}_g$, а второй – на основе оценки $\mathbf{v}$. Например, при моделировании (см. параграф 4.5) будет показано, что $\mathbf{p}_\perp$ обычно мал, и поэтому точность восстановления $\mathbf{p}$ с помощью правила (112), используя только проекцию $\mathbf{p}_g$ в разложении (106), допустимо во многих случаях.

В проводимых до сих пор исследованиях мы предполагали, что матрица $\mathbf{K}$ в уравнении (96), и, как следствие, матрица $\mathbf{F}$ в (108) заданы точно. Однако в реальных измерениях КПП $m(\lambda)$ неизвестен, поэтому используется его некоторое приближение $\tilde{m}(\lambda)$. В результате выражение (106) примет вид

$$\tilde{\mathbf{p}} = \tilde{\mathbf{P}}(\mathbf{v}_g + \mathbf{v}_\perp) = \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{K}}^T (\tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{K}}^T)^{-1} \mathbf{g} + \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{v}}_\perp, \quad (125)$$

выражение (107) в свою очередь

$$\tilde{\mathbf{p}} = \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{g} + \tilde{\mathbf{D}}_\perp \mathbf{v} \quad (126)$$

и наконец, выражение (110)

$$\tilde{\mathbf{p}}_g^{e_r} = \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{g}^{e_r} \quad (127)$$

Тогда ошибка вследствие неточно заданного КПП оценивается следующим образом:

$$\begin{aligned} \Delta \mathbf{p} &= \tilde{\mathbf{p}}_g^{e_r} - \mathbf{p} = \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{g}^{e_r} - (\mathbf{p}_g + \mathbf{p}_\perp) = \tilde{\mathbf{F}}(\mathbf{g} + \Delta \mathbf{g}) - (\mathbf{F}\mathbf{g} + \mathbf{D}_\perp \mathbf{v}) = \\ &= \tilde{\mathbf{F}}\Delta \mathbf{g} - \Delta \mathbf{F}\mathbf{g} - \mathbf{D}_\perp \mathbf{v} = \tilde{\mathbf{F}}\Delta \mathbf{g} - \Delta \mathbf{F}\mathbf{K}\mathbf{v} - \mathbf{D}_\perp \mathbf{v} = \tilde{\mathbf{F}}\Delta \mathbf{g} - (\Delta \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{D}_\perp) \mathbf{v}, \end{aligned} \quad (128)$$

где $\Delta \mathbf{F} = \mathbf{F} - \tilde{\mathbf{F}}$. В данном случае ковариационная матрица ошибки метода имеет вид

$$\mathbf{C}_p = \left\langle \left(\tilde{\mathbf{F}}\Delta \mathbf{g} - (\Delta \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{D}_\perp) \mathbf{v} \right) \left(\tilde{\mathbf{F}}\Delta \mathbf{g} - (\Delta \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{D}_\perp) \mathbf{v} \right)^T \right\rangle = \mathbf{C}_p^r + \mathbf{C}_p^s, \quad (129)$$

где

$$\mathbf{C}_p^r = \tilde{\mathbf{F}} \langle \Delta \mathbf{g} \Delta \mathbf{g}^T \rangle \tilde{\mathbf{F}}^T = \tilde{\mathbf{F}} \mathbf{C}_g \tilde{\mathbf{F}}^T = \tilde{\mathbf{P}} \tilde{\mathbf{K}}^T (\tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{K}}^T)^{-1} \mathbf{C}_g (\tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{K}}^T)^{-1} \tilde{\mathbf{K}} \tilde{\mathbf{P}}^T, \quad (130)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_p^s &= (\Delta \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{D}_\perp) (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) (\Delta \mathbf{F}\mathbf{K} + \mathbf{D}_\perp)^T = \\ &= \Delta \mathbf{F}\mathbf{K} (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) \mathbf{K}^T (\Delta \mathbf{F})^T + \Delta \mathbf{F}\mathbf{K} (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) \mathbf{D}_\perp^T + \mathbf{D}_\perp (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) \mathbf{K}^T (\Delta \mathbf{F})^T + \mathbf{D}_\perp (\mathbf{v} \mathbf{v}^T) \mathbf{D}_\perp^T \end{aligned} \quad (131)$$

Сравнивая выражения (123) и (130), мы видим, что единственное между ними отличие – это присутствие в последнем матрицы $\tilde{\mathbf{F}}$ вместо $\mathbf{F}$. Отсюда возникает вывод, что если элементы этих матриц близки при некоторых вариациях $\tilde{m}(\lambda)$,

можно ожидать соизмеримость элементов матриц $\mathbf{C}_p^r$ в выражениях (123) и (130).

Выражение (131) отличается от (124) наличием трех дополнительных членов, содержащих $\Delta\mathbf{F}$. Если $\Delta\mathbf{F}=\mathbf{0}$, выражение (131) совпадает с (124). В то же время в случае, когда измерения $\mathbf{g}^{er}$ образуют полное пространство и $\mathbf{D}_1=\mathbf{0}$, выражение (122) будет содержать только первый член $\mathbf{C}_p^r$, тогда как выражение (129) все еще сохранит второй член, представляющий систематический сдвиг:

$$\mathbf{C}_p = \mathbf{C}_p^r + \mathbf{C}_p^s = \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{C}_g\tilde{\mathbf{F}}^T + \Delta\mathbf{F}\mathbf{K}(\mathbf{v}\mathbf{v}^T)\mathbf{K}^T(\Delta\mathbf{F})^T, \quad (132)$$

Поэтому, какого бы не было отклонения $\tilde{m}(\lambda)$ от $m(\lambda)$, всегда будет возникать систематическая ошибка $\mathbf{C}_p^s$. Более того, $\mathbf{C}_p^s$ может превосходить $\mathbf{C}_p^r$ в (132). Действительно, подставляя (96) в (132) получим

$$\mathbf{C}_p = \tilde{\mathbf{F}}\mathbf{C}_g\tilde{\mathbf{F}}^T + \Delta\mathbf{F}(\mathbf{g}\mathbf{g}^T)(\Delta\mathbf{F})^T \quad (133)$$

Здесь $\mathbf{C}_g = \langle \Delta\mathbf{g}\Delta\mathbf{g}^T \rangle$ – ковариационная матрица измерительной погрешности $\Delta\mathbf{g}$. Поскольку её величина обычно меньше, чем само измерение $\mathbf{g}$, элементы матрицы $\mathbf{C}_g$ также меньше соответствующих элементов матрицы $\mathbf{g}\mathbf{g}^T$. Поэтому, даже если $\Delta\mathbf{F} = \mathbf{F} - \tilde{\mathbf{F}}$ не очень велико, второй член в (132) может быть сравнительно большим.

Из проведенного анализа вытекает, что если измерения $\mathbf{g}^{er}$ чувствительны к параметру $m(\lambda)$, ошибка метода вследствие неправильно заданного $m(\lambda)$ может быть много больше той, которая обусловлена измерительной погрешностью и существованием «нулевого» пространства. Здесь необходимо отметить проблему, которая усложняет применение рассматриваемого подхода для решения уравнения (96). В методах, изложенных в двух предыдущих главах, количественным критерием оценки качества восстановления КПП является невязка (40). Близость невязки к минимальному значению при некотором КПП означает, что данный КПП также находится в окрестности точного решения. При использовании альтернативного метода нельзя сравнить невязку каких-либо индивидуальных решений, полученных, например, при различных значе-

ниях параметра m , так как она всегда тождественно равна 0, какой бы ни был параметр m .

Возвращаясь к анализу, проводимому в текущем параграфе, и учитывая возможную чувствительность измерений к вариациям КПП, можно попытаться оценить $m(\lambda)$ по имеющимся измерениям в виде вектора $\mathbf{g}^{er}$ при достаточном наборе его элементов g_p^{er} : $p=1, 2, \dots, N_0$. В частности, мы можем выбрать один из элементов g_p^{er} и оценить его, исходя из оставшихся в наборе элементов $g_{p'}^{er}$: $p'=1, 2, \dots, N_0'=N_0-1$ и $p' \neq p$, используя правило, аналогичное правилу (112) и предложенное в [60]. Более четкое определение будет приведено в параграфе 4.4. Повторяя эту процедуру для всех других элементов $g_{p'}^{er}$, мы получим N_0 оценок g_p^{inv} и тем самым сформируем вектор $\mathbf{g}^{inv}$, который можно сравнить с наблюдениями $\mathbf{g}^{er}$. Предлагаемая процедура также демонстрирует, почему каждый из элементов вектора $\mathbf{g}^{inv}$ не может быть оценен исходя из полного набора данных N_0 , так как в этом случае возникает тождество $\mathbf{g}^{inv} \equiv \mathbf{g}^{er}$ независимо от того, при каких значениях m , $r_{\min}$ и $r_{\max}$ вычисляются элементы матрицы $\mathbf{K}$ в уравнении (96). Если чувствительность $\mathbf{g}^{er}$ к вариациям $m(\lambda)$ высокая, невязка $\Delta g_p = g_p^{inv} - g_p^{er}$ должна сильно зависеть от предполагаемых значений $m(\lambda)$. Соответственно, получая оценки $g_p^{inv}(m)$ для различных предполагаемых значений $m(\lambda)$, можно попытаться локализовать некоторую окрестность у последнего, в которой достигается минимум квадратической формы

$$\Psi(m) = (\mathbf{g}^{inv}(m) - \mathbf{g}^{er})^T \mathbf{C}_g^{-1} (\mathbf{g}^{inv}(m) - \mathbf{g}^{er}) \quad (134)$$

Чем сильнее данная чувствительность, тем лучше должен быть выражен минимум формы (134) как функции параметра $m(\lambda)$, обеспечивая выбор его оптимального значения. В случае, когда КПП спектрально независим, а погрешность измерений на всех длинах волн сопоставима, минимум формы (134) совпадает с минимумом невязки в норме пространства G

$$\rho = \|\mathbf{g}^{inv} - \mathbf{g}^{er}\|_G \quad (135)$$

Подробнее анализ невязки как функции КПП мы проведем при численном моделировании в параграфе 4.5 (см. рис. 36).

Полученный вывод дает возможность привлечь процедуру усреднения, апробированную в традиционных методах, и ограничить область всех значений не только для параметра m' , но и $r_{\min}'$ и $r_{\max}'$ в исходных условиях (25).

В результате исследований, проведенных в настоящем параграфе, нам удалось построить альтернативный метод решения задачи (96), позволяющий непосредственно восстанавливать интегральные параметры $\mathbf{p}$ по правилу (112) без промежуточного нахождения РАР, его регуляризации и выполнения оптимальных оценок регуляризирующего параметра. Устойчивость данного метода, вытекающая из теоретических оценок, будет подтверждена и в ходе численного моделирования (см. параграф 4.5).

Важным следствием сокращения числа независимых параметров, которые оцениваются с помощью альтернативного метода, n_o , s_o и v_o , является возможность уменьшения числа исходных данных, например, до набора $3\beta+1\alpha$. Численное моделирование также продемонстрирует возможность применения альтернативного метода при ограниченном наборе оптических данных.

4.3. Быстрый алгоритм решения обратной задачи

Построим на основе альтернативного метода, изложенного в предыдущем параграфе, быстрый алгоритм решения обратной задачи (96). Учитывая опыт, накопленный при разработке традиционных методов и преимущества, демонстрируемые при их применении, целесообразно алгоритм, приведенный в параграфе 2.5, принять в качестве базового. Чтобы адаптировать его к применению альтернативного метода, необходимо модифицировать шаги, связанные с привлечением РАР, оставляя без изменения все остальные. В результате быстрый алгоритм решения обратной задачи (96) схематично формализуется следующим образом:

а) задается ряд значений для каждого из параметров η , m , $r_{\min}$ и $r_{\max}$, равномерно распределенных в диапазонах, на которых соответствующие парамет-

ры заданы [см. ограничения (25)];

б) для каждой комбинации полученных значений находятся индивидуальный вектор $\mathbf{p}^{(q)}$ по правилу (112) и соответствующая им невязка (135);

в) найденные индивидуальные вектора $\mathbf{p}^{(q)}$, $q=1, 2, \dots, N_v$, ранжируются по невязке (135) от минимального до максимального значения;

г) окончательное решение $\mathbf{p}_{cp}$ задачи (96) определяется путем усреднения индивидуальных решений, имеющих невязку, лежащую в окрестности минимального значения [13];

д) оценка параметров η и m осуществляется усреднением предварительно заданного ряда соответствующих значений, при котором были получены усредняемые индивидуальные решения.

В результате применения алгоритма находятся микрофизические параметры аэрозолей n_o , s_o , v_o , $r_{eff}=3v_o/s_o$, оптические характеристики $g_{sca}(\lambda_k)$, $g_{abs}(\lambda_k)$ и $\omega(\lambda_k)=g_{sca}(\lambda_k)/[g_{sca}(\lambda_k)+g_{abs}(\lambda_k)]$, фракция η .

4.4. Численная реализация быстрого алгоритма

В ходе построения решения задачи (96) с помощью альтернативного метода остались нерассмотренными несколько вопросов, касающихся строгого определения объектов, возникающих при реализации данного подхода.

Сначала найдем элементы матрицы $\mathbf{P}$, которые определяются структурой вектора $\mathbf{p}$. Если вектор $\mathbf{p}=(v_o, s_o, n_o, g_{sca}, g_{abs})^T$, то исходя из его определения (105) и определения каждой из его компонент [см. формулы (7) и 27], легко получить следующие соотношения:

$$P_{1t} = 1/r_t, \quad P_{2t} = 3/r_t^2, \quad P_{3t} = 3/(4\pi r_t^4), \quad t=1, 2, \dots, N \quad (136)$$

$$P_{4t} = K_{sca}(\lambda, m, r_t), \quad P_{5t} = K_{abs}(\lambda, m, r_t), \quad t=1, 2, \dots, N \quad (137)$$

Обозначим вектор-строки матрицы $\mathbf{P}$ как $\mathbf{P}_i$, $i=1, 2, \dots, N_p=5$, с компонентами P_{it} , $t=1, 2, \dots, N$, тогда каждый из элементов вектора-решения $\mathbf{p}$ определяется по правилу (112) в виде

$$p_i \approx \mathbf{P}_i \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1} \mathbf{g}, \quad (138)$$

Перейдем к получению явного вида элементов вектора $\mathbf{g}^{inv}$ в невязке (135), описывающих оптические данные, порождаемые решением $\mathbf{p}$ задачи (96). Мы уже отмечали, что элемент g_p^{inv} не может быть выражен через полный набор элементов вектора $\mathbf{g}^{er}$, как, например, элемента p_4 или p_5 с помощью правила (138). Это может быть сделано на основе уменьшенного набора элементов $g_{p'}^{er}$: $p'=1, 2, \dots, N_O'=N_O-1$, не включающего элемент g_p^{er} . В связи с этим сформируем редуцированные вектор $\mathbf{g}'$ из $\mathbf{g}$, в котором отсутствует p -ая компонента, и матрицу $\mathbf{K}'$ из $\mathbf{K}$ путем выведения p -ой вектор-строки. Тогда найдем элемент g_p^{er} , используя правило (138):

$$g_p^{er} \approx \mathbf{P}'\mathbf{K}'^T(\mathbf{K}'\mathbf{K}'^T)^{-1} \mathbf{g}', \quad p=1, 2, \dots, N_O \quad (139)$$

где вектор-строка $\mathbf{P}'$ состоит из элементов $P_t' = K_p(m, r_t)$. Применяя это правило N_O раз, мы получим вектор $\mathbf{g}^{inv}$, с помощью которого, в свою очередь, находится невязка (135). Для расчета последней мы будем использовать определение (40).

При численной реализации быстрого алгоритма важным параметром является шаг дискретизации Δr , при котором обеспечивается равенство левой и правой части в задаче (96) с необходимой точностью. Он входит неявно в решение $\mathbf{p}$ и уничтожается при получении правила (112). Тем не менее, его переоценка может привести к существенному искажению результатов. Чтобы избежать этого, экспериментальным путем мы установили, что начиная с $\Delta r = 0.01$ мкм, дальнейшее уменьшение шага нецелесообразно и наблюдается сходимость результатов с точностью, достаточной для рассматриваемых задач.

На основе полученных соотношений, необходимых при реализации альтернативного метода, сделаем несколько важных замечаний.

1. Правило (138) фактически сводится к вычислению суммы:

$$p_i \approx \sum_{p=1}^{N_O} \varphi_p^i g_p, \quad i=1, 2, \dots, N_p \quad (140)$$

где коэффициенты φ_p^i являются компонентами вектор-строки $\Phi^i = \mathbf{P}_i \mathbf{K}^T (\mathbf{K} \mathbf{K}^T)^{-1}$. Другими словами, параметры аэрозолей представляются в виде линейной комбинации взвешенных оптических данных, поэтому результат их восстановления с помощью рассматриваемого метода можно назвать линейной оценкой (ЛО).

2. Коэффициенты φ_p^i не требуют знания никакой априорной информации, поэтому целесообразно их сохранение в банк данных. В результате линейная оценка параметров аэрозолей (140) с вычислительной точки зрения является очень быстрой операцией и позволяет обрабатывать колоссальное количество наборов оптических данных в реальном времени. Именно по этой причине алгоритм, реализующий исследуемый альтернативный метод, получил название «быстрый».

3. Лидарная система обеспечивает непрерывное во времени измерение профилей оптических данных $g_p(z)$. Это означает, что результатами измерений является карта, или поле оптических данных $g_p(z, \tau)$, распределенных по дистанции зондирования z и времени τ (или траектории движения). Тогда применение быстрой линейной оценки (140) позволяет получить и поле микрофизических параметров аэрозолей, таких как эффективного размера $r_{eff}(z, \tau)$, общей концентрации $n_o(z, \tau)$, площади поверхности $s_o(z, \tau)$ и объема $v_o(z, \tau)$, а также поле КПП $m(z, \tau)$, коэффициентов рассеяния $g_{sca}(z, \tau)$ и поглощения $g_{abs}(z, \tau)$, альбедо однократного рассеяния $\omega(z, \tau)$. Такого рода информация уже дает представление о пространственно-временном поведении частиц и динамике процессов, протекающих в атмосфере.

4. Результатом применения предлагаемого метода является линейная оценка несколько независимых интегральных параметров, характеризующих неизвестное РАР $\mathcal{U}(r)$: n_o , s_o и v_o . Возникает закономерный вопрос, а возможно ли дальнейшее упрощение лидарной системы, которая бы измеряла уменьшенный набор оптических данных, например, $3\beta+1\alpha$, достаточный для оценки указанных параметров с точностью, достигаемой при использовании набора $3\beta+2\alpha$. Подтверждение такой возможности осуществляется путем математиче-

ского моделирования и сравнения с результатами, получаемыми с помощью традиционных методов.

4.5. Численный эксперимент

Проведем численное моделирование применения быстрого алгоритма, реализующего метод линейной оценки микрофизических параметров аэрозолей, тем же образом, как это было сделано в двух предыдущих главах. Как обычно, мы должны проверить применимость метода, его устойчивость, оценить точность восстановления микрофизических параметров частиц. Для генерации оптических данных $\mathbf{g}$ здесь решается прямая задача (96), в которой тестовое РАР задано по мономодальному закону (20), т.е. $i=1$, при двух значениях модального радиуса $r_1=0.2$ и 2 мкм. Оба типа РАР имеют одинаковую дисперсию $\ln \sigma_1 = 0.4$ и описывают соответственно ярко выраженную и грубую моды.

Как обсуждалось в параграфе 4.2, принципиальным вопросом при применении быстрого алгоритма является оценка остаточного члена $\mathbf{v}_\perp$ в выражении (97). Он зависит как от вида РАР, так и от КПП. Выполненное моделирование демонстрирует, что для значений m , удовлетворяющих условиям (25), в оценке параметра v_0 на остаточный член $\mathbf{v}_\perp$ приходится менее 4% при $r_1=0.2$ мкм и 15 % при $r_1=2$ мкм. Поэтому существование «нулевого» пространства не накладывает серьезных ограничений на применение метода ЛО для типичных атмосферных аэрозолей.

Чтобы оценить влияние измерительной погрешности, случайная ошибка e_r вводится в предварительно сгенерированные оптические данные $\mathbf{g}$ и по возмущенным данным $\mathbf{g}^{e_r}$ восстанавливаются интегральные параметры аэрозолей с помощью быстрого алгоритма, изложенного в параграфе 4.3. Процедура повторяется около 1000 раз, в результате чего накапливается мощная статистика. Влияние измерительной погрешности оптических данных на точность алгоритма иллюстрируется на рис. 35 на примере оценки общего объёма аэрозолей. Рис. 35 показывает распределение вероятности ошибки $e_r^{v_0}$ в оценке v_0 для уровней погрешности оптических данных $e_r^{\max} = 10, 20$ и 30%. Каждому значе-

нию $e_r^{v_0}$ на графике соответствует вероятность, с которой данное, или меньшее, значение встречается во всей статистике. Например, из этого рисунка следует, что в 90 % всех случаев, или с вероятностью 90 %, ошибка в оценке общего объёма ниже $e_r^{v_0} = 20\%, 35\%, 50\%$ при уровне погрешности $e_r^{\max} = 10, 20$ и 30% соответственно. Мы рассматриваем показатели, получаемые с такой вероятностью, как восстановительную ошибку метода ЛО. Как видно, ошибка метода ЛО общего объёма увеличивается примерно пропорционально с ростом e_r , и он может обеспечить разумными оценками даже при измерительной погрешности, достигающей $e_r^{\max} = 30\%$.

Результаты моделирования сведены в таблице 10. Она содержит ошибки в оценке общего объёма, площади поверхности и концентрации, эффективного размера и реальной части КПП аэрозолей (с вероятностью не ниже 90 %), распределение по размеру которых включает только грубую или ярко выраженную моду, в зависимости от погрешности оптических данных $e_r^{\max} = 10, 20$ и 30% . В отсутствии возмущений ошибка метода ЛО обусловлена существованием «нулевого» пространства и тем обстоятельством, что КПП неизвестен, как и следует из оценки (131). Минимизация невязки (135) ведет к уменьшению ошибки в общем объёме до 4 % для малых частиц и до 15 % для больших частиц.

Здесь необходимо более подробно остановиться на том, как ведет себя невязка (135) при вариациях КПП. Рис. 36 иллюстрирует её поведение вместе с ошибкой оценки общего объёма в диапазоне всевозможных значений m_R , заданных условием (25), которые порождаются пространством индивидуальных решений, полученных быстрым алгоритмом при обработке одного из наборов невозмущенных оптических данных. Как невязка ρ , так и ошибка $e_r^{v_0}$ имеют минимум при $m_R = 1.5$, соответствующий тестовому (истинному) значению реальной части КПП. Такое поведение невязки согласуется с теоретическими оценками, сделанными в параграфе 4.2 [см. форму (134)]. Кроме того, из этого анализа следует, что минимизация невязки по параметру m_R также обеспечивает минимум ошибки $e_r^{v_0}$. Аналогичные свойства обнаружены при анализе ρ как функции m_I .

На основе полученных результатов можно сделать ряд выводов. Быстрый алгоритм является стабильным при восстановлении интегральных параметров как крупных, так и малых частиц, при этом ошибка в оценке общего объёма составляет менее 45 % даже в случае погрешности оптических данных, достигающей 20 %. Ошибка в оценке эффективного размера, общей площади поверхности и объёма сопоставима для малых частиц, тогда как для крупных частиц их общая площадь является наиболее стабильным параметром в оценке, которая не превышает 30 % даже при погрешности $e_r^{\max} = 20\%$. Наиболее нестабильным параметром при восстановлении выступает общая концентрация частиц, ошибка в оценке которой для грубой моды превышает 100 % при $e_r^{\max} = 20\%$. Реальная часть КПП более точно восстанавливается для больших частиц с ошибкой ± 0.04 и $e_r^{\max} = 20\%$, для малых частиц ошибка увеличивается до ± 0.07 .

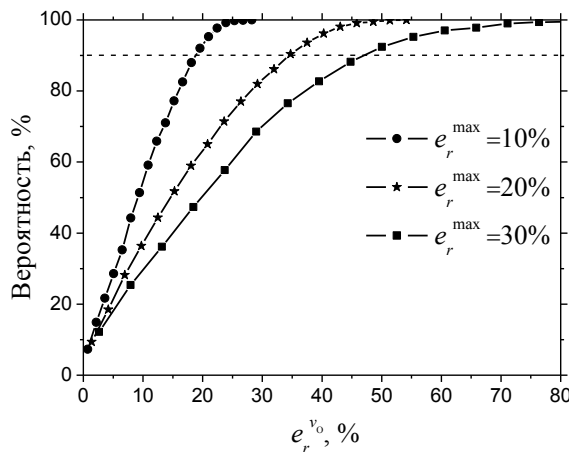


Рис. 35. Вероятность распределения ошибки $e_r^{v_0}$ в оценке общего объёма аэрозолей при уровне погрешности оптических данных $e_r^{\max} = 10, 20$ и 30% . Моделирование проводится для ярко выраженной моды.

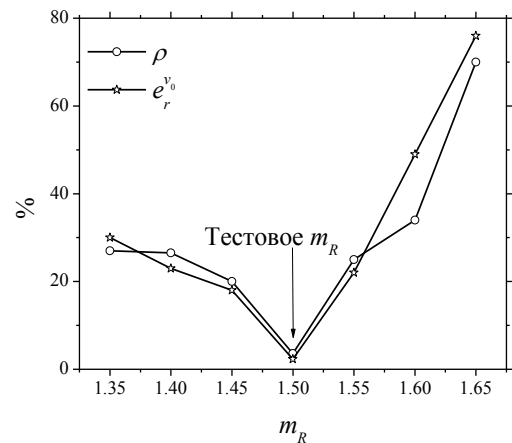


Рис. 36. Зависимость невязки ρ и ошибки оценки общего объёма от реальной части КПП. Тестовое (истинное) значение $m = 1.5 - i0.005$

Как и в случае применения традиционных подходов, наибольшей проблемой при решении рассматриваемой задачи многоволнового лидарного зондирования является оценка мнимой части КПП. Поскольку задача существенно недоопределена, при её решении необходимо привлекать различные ограничения, в частности, на диапазон всевозможных значений КПП (25) в процессе минимизации (135). Чтобы оценить влияние диапазона варьирования мнимой час-

ти КПП на восстановление интегральных параметров частиц, мы выполнили моделирование для трех интервалов:

$$0 < m_I < 0.01, 0 < m_I < 0.02 \text{ и } 0 < m_I < 0.03 \quad (141)$$

в предположении, что погрешность оптических данных достигает $e_r^{\max} = 10\%$, а тестовое значение $m = 1.5 - i0.005$. Результаты, полученные для больших частиц ($r_1 = 2$ мкм), свидетельствуют, что ошибка в оценке m_I для указанных интервалов составляет 50%, 100% и 140% соответственно. Это хорошо согласуется с другими исследованиями, связанными с данным вопросом [81]. Поэтому привлечение априорной информации, необходимой для ограничения «степени свободы» m_I в (25), является исключительно важным условием разумной оценки мнимой части КПП при решении задач многоволнового лидарного зондирования.

Таблица 10.

Ошибка быстрого алгоритма при оценке параметров аэрозолей ярко выраженной и грубой моды в зависимости от погрешности оптических данных

Мода	$e_r^g, \%$	$e_r^{v_0}, \%$	$e_r^s, \%$	$e_r^n, \%^0$	$e_r^{r_{eff}}, \%$	$e_r^{m_R}$
Ярко выраженная	0	5	5	10	5	0.01
	10	20	20	40	25	0.05
	20	45	35	60	40	0.07
Грубая	0	15	2	25	15	0.015
	10	30	10	75	25	0.025
	20	45	30	110	35	0.04

Чтобы проиллюстрировать влияние m_I на оценку других параметров, рис. 37 показывает вероятность, с которой возникают ошибки восстановления быстрым алгоритмом общего объема для больших ($r_1 = 2$ мкм) и малых ($r_1 = 0.2$ мкм) частиц, если ограничивать m_I каким-либо из интервалов (141). Для крупных частиц ошибка $e_r^{v_0}$ увеличивается от 25 до 35 %, когда «степень свободы» m_I растет от 0.01 до 0.03. Для малых частиц восстановление нечувствительно к данным вариациям m_I . Отсюда вытекает, что, несмотря на неопределенность в восстановлении мнимой части КПП, ошибка, которая при этом возникает, имеет небольшое влияние на точность оценки других параметров.

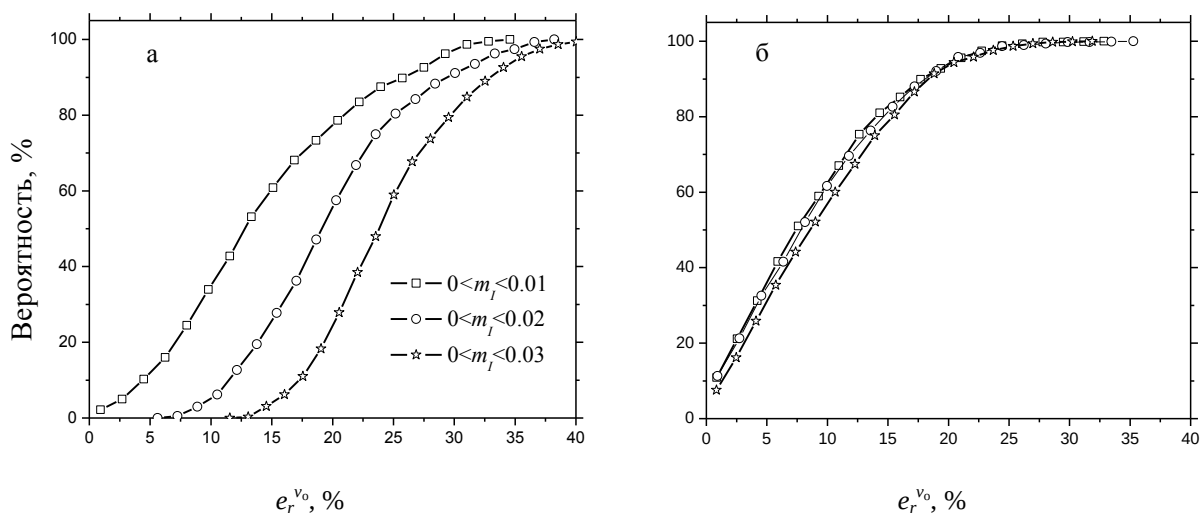


Рис. 37. Вероятность распределения ошибки $e_r^{v_0}$ в оценке общего объёма аэрозолей при уровне погрешности оптических данных $e_r^{\max} = 10\%$ и различных ограничениях на m_l . Моделирование выполнено для крупных (а) и мелких (б) частиц. Тестовое (истинное) значение $m = 1.45 - i0.005$

Представленные результаты были получены при использовании набора оптических данных $3\beta + 2\alpha$. Аналогичные результаты быстрый алгоритм дает при обработке набора данных $3\beta + 1\alpha$, в котором отсутствует коэффициент ослабления на длине волны 532 нм. Это означает, что уменьшенное количество исходной информации и, как следствие, более простая лидарная установка, могут быть использованы для оценки интегральных параметров аэрозолей при лидарном зондировании. Необходимо также отметить, что обработка уменьшенного набора оптических данных $3\beta + 1\alpha$, включающего коэффициент ослабления на длине волны 532 нм вместо коэффициента ослабления на длине волны 355 нм, ведет к существенному увеличению погрешности быстрого алгоритма.

Достоверность результатов, получаемых методом ЛО интегральных параметров аэрозолей, будет продемонстрирована путем их сравнения с результатами традиционных методов в реальном эксперименте (см. гл. 5).

4.6. Семейство методов на базе метода линейной оценки

При построении решения задачи (96) методом ЛО и его реализации с помощью быстрого алгоритма мы обошли вопрос о том, каким образом он может быть использован, если ансамбль аэрозолей представлен смесью сферических и сфероидных частиц. В этом случае элементы $K_p(m, r_t)$ матрицы $\mathbf{K}$ должны вы-

ражаться через соответствующие составляющие $K_p^s(m, r_t)$ и $K_p^{ns}(m, r_t)$, однако если первые легко считаются с помощью теории Ми, то о последних нам известно только взвешенное значение $\langle K_{pl}^{ns}(m) \rangle$ (см. параграф 2.6). Другой вопрос связан с возможностью применения в альтернативном методе идей, которые апробированы в традиционных подходах и привели к хорошим результатам. В частности, обобщение альтернативного метода на двумерный случай может способствовать повышению его точности. Эти и др. вопросы приводят к необходимости, по крайней мере, формализовать несколько подходов, или семейство методов, основанных на применении быстрого алгоритма с учетом задела, созданного при решении задач многоволнового лидарного зондирования традиционными методами.

Одна из таких разновидностей методов уже упоминалась в параграфе 4.2 [см. правило (113)], предполагающая применение регуляризации при нахождении решения задачи (96) альтернативным методом. Разработка подходящего критерия оценки оптимального параметра регуляризации может привести к более стабильным, устойчивым и точным результатам, получаемым с помощью правила (113) по сравнению с «базовым» правилом (112), в котором ковариационная матрица определяется специальным образом (119).

Другая разновидность методов, реализующихся с помощью быстрого алгоритма, должна быть оснащена возможностью использовать банк данных, содержащих взвешенные ядра $\langle K_{pl}^{ns}(m) \rangle$ и $\langle K_{pl}^s(m) \rangle$. Для этого нам нужно уйти от аппроксимации $\nu(r)$ полиномами 0-ого порядка, используемыми в уравнении (96), к аппроксимации полиномами 1-ого порядка типа (16). Тогда уравнение (96) преобразуется в другой дискретный аналог, описываемый уравнением (33). В этом случае по аналогии с (100) разложение теперь уже в ряд по взвешенным ядрам интегрального уравнения с некоторыми коэффициентам y_s функции $\nu(r)$ имеет вид

$$\nu(r_t) = \sum_{s=1}^{N_0} y_s A_{st}(m, \eta) + \xi_{\perp t} \quad t=1, 2, \dots, N_B \quad (142)$$

где остаточный член $\xi_{\Delta t}$ удовлетворяет условию

$$\sum_{t=1}^{N_B} \xi_t \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_p(m, r) B_t(r) dr = \sum_{t=1}^{N_B} \xi_t A_{pt} = 0 \quad (143)$$

или в матрично-векторной форме

$$\mathbf{A}(\eta, m) \boldsymbol{\xi} = \mathbf{0} \quad (144)$$

Оно означает, что вектор-столбец $\boldsymbol{\xi}$, состоящий из элементов $\xi_{\Delta t}$ ортогонален вектор-строкам матрицы $\mathbf{A}(\eta, m)$. Далее, повторяя путь, пройденный в параграфе 4.2 [см. формулы (101)-(112)], мы получим правило для нахождения решения задачи (33) альтернативным методом

$$\mathbf{p} \approx \mathbf{P} \mathbf{A}^T (\mathbf{A} \mathbf{A}^T)^{-1} \mathbf{g} \quad (145)$$

В нем элементы матрицы $\mathbf{P}$ в отличие от правила (112) определяются формулами

$$P_{1t} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{B_t(r)}{r} dr \quad P_{2t} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{3}{r^2} B_t(r) dr \quad P_{3t} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} \frac{3}{4\pi r^4} B_t(r) dr \quad t=1, 2, \dots, N_B \quad (146)$$

$$P_{4t} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_{sca}(\lambda, m, r) B_t(r) dr \quad P_{5t} = \int_{r_{\min}}^{r_{\max}} K_{abs}(\lambda, m, r) B_t(r) dr \quad t=1, 2, \dots, N_B \quad (147)$$

Преимуществом правила (145) является то, оно позволяет решать задачи, в которых аэрозоли состоят из сферических и нерегулярных частиц, при этом матрица $\mathbf{A}$ имеет вид (34) с элементами (32). Очевидно, при его реализации можно привлечь как регуляризацию [см. формулу (113)], так и редуцирование матрицы $\mathbf{A}$ [см. формулу (119)].

Формализуем, наконец, быстрый алгоритм при использовании двумерной математической модели (56). Для определенности зададим аппроксимацию функции $\nu(r)$ полиномами 1-ого порядка. В этом случае возникает N_L уравнений (33), каждое из которых решается по правилу (145):

$$\mathbf{p}^{(l)} \approx \mathbf{P} \mathbf{A}^{(l)T} (\mathbf{A}^{(l)} \mathbf{A}^{(l)T})^{-1} \mathbf{g}^{(l)} \quad l=1, 2, \dots, N_L \quad (148)$$

Решая их одновременно, мы придем к обобщенной системе линейных алгебраических уравнений (59). Её решение альтернативным методом представляется как

$$\mathbf{p} = \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{A}}^T(\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{A}}^T)^{-1}\tilde{\mathbf{g}}, \quad (149)$$

где блочная матрица $\tilde{\mathbf{P}} = \Delta z \begin{pmatrix} \mathbf{P}_{N_p \times N_B} & \mathbf{P}_{N_p \times N_B} & \dots & \mathbf{P}_{N_p \times N_B} \end{pmatrix}_{N_p \times N_B N_L}$, а вектор решений $\mathbf{p}$ состоит здесь из элементов p_i , $i=1, 2, \dots, N_p$, представляющих собой параметры полного профиля, описываемых (69). Полученная модификация альтернативного метода может быть реализована с помощью регуляризации, как одномерной

$$\mathbf{p} = \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{A}}^T(\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{A}}^T + \gamma\tilde{\mathbf{H}})^{-1}\tilde{\mathbf{g}}, \quad (150)$$

так и двумерной

$$\mathbf{p} = \tilde{\mathbf{P}}\tilde{\mathbf{A}}^T(\tilde{\mathbf{A}}\tilde{\mathbf{A}}^T + \gamma\tilde{\mathbf{H}} + \kappa\hat{\mathbf{H}})^{-1}\tilde{\mathbf{g}} \quad (151)$$

Как видно из проведенного анализа, альтернативный метод порождает целое многообразие способов оценки интегральных параметров аэрозолей, которые могут реализовать любые передовые идеи. Мы не останавливаемся на оценке их точности и применимости. Это можно сделать, например, в результате математического моделирования, активно эксплуатируемого в настоящем исследовании, и может служить направлением дальнейшего развития и усовершенствования методики решения задач многоволнового лидарного зондирования.

4.7. Выводы к четвертой главе

Исследован устойчивый метод линейной оценки интегральных параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, альтернативный традиционным методам, использующим регуляризацию решения. Он основан на разложении неизвестного распределения аэрозолей по размерам в ряд по ядрам интегрального уравнения Фредгольма I рода, представляет решение в виде линейной комбинации коэффициентов обратного рассеяния и ослабления, измеряемых лидаром, и не требует восстановления распределения аэрозолей по размерам.

Получены теоретические оценки ошибки восстановления интегральных параметров аэрозолей альтернативным методом, обусловленной существованием остаточного члена при разложении распределения аэрозолей по размерам в

ряд по ядрам интегрального уравнения, неточно заданным показателем преломления и измерительной погрешностью данных лидарного зондирования.

На основе альтернативного метода разработан быстрый алгоритм линейной оценки поля интегральных параметров аэрозолей, таких как эффективного размера, общей концентрации, площади поверхности и объема, а также поля КПП, коэффициентов рассеяния и поглощения, альбедо однократного рассеяния, применимый для обработки большого объема данных лидарного зондирования. Данная информация позволяет исследовать пространственно-временное поведение частиц и динамику процессов, протекающих в атмосфере.

Выполнено полномасштабное численное моделирование применения быстрого алгоритма для оценки его точности и устойчивости. Результаты моделирования демонстрируют его стабильность даже при обработке данных, возмущенных случайной ошибкой, достигающей 30%. В целом точность оценки интегральных параметров аэрозолей быстрым алгоритмом сопоставима с уровнем, достигнутым традиционными методами.

Исследована возможность уменьшения набора оптических данных для оценки интегральных параметров аэрозолей. В результате проведенного моделирования установлено, что обработка быстрым алгоритмом уменьшенного набора оптических данных $3\beta+1\alpha$, включающего коэффициент ослабления только на длине волны 355 нм, приводит к оценке параметров аэрозолей с ошибкой, которая существенно не ухудшает результаты, получаемые при использовании набора $3\beta+2\alpha$. Замена в уменьшенном наборе $3\beta+1\alpha$ коэффициента ослабления на длине волны 355 нм коэффициентом ослабления на длине волны 532 нм ведет к заметному увеличению погрешности метода.

На базе подхода, альтернативного регуляризации, построено семейство методов, реализующих идеи, которые способствовали усовершенствованию традиционных методов. В частности, разработана модификация метода линейной оценки интегральных параметров частиц, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов. Кроме того, линейная оценка может быть выполнена с привлечением двумерного регуляризирующего алгоритма.

Глава 5. ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ. ПРОВЕРКА ДОСТОВЕРНОСТИ РЕЗУЛЬТАТОВ ПРИМЕНЕНИЯ МЕТОДИКИ

В предыдущих трех главах мы разработали алгоритмы решения задач многоволнового лидарного зондирования. При разработке были использованы строгие теоретические методы исследования, проводилось масштабное математическое моделирование, получены оценки их применимости и точности. Однако этого не достаточно в строгом научно-философском смысле. Подтверждение правильности их результатов и достоверности может быть сделано только при проведении реального эксперимента. Настоящая глава посвящена анализу результатов, полученных разработанными алгоритмами при обработке данных лидарного зондирования, приобретенных в ходе крупных экспериментов, в различных географических условиях и для различных источников происхождения аэрозолей. В рамках этих экспериментов одновременно использовались пассивные методы измерений и локальный забор проб. Сравнение результатов, полученных различными методами и инструментами, является объективным подходом проверки корректности и обоснованности идей, реализованных в исследуемых алгоритмах. В случае сходимости результатов, можно сделать вывод об их достоверности, и, как следствие, применимости рассматриваемой методики в решении задач многоволнового лидарного зондирования на практике.

5.1. Эксперимент по измерению минеральной пыли в Африке

Важное условие всесторонней проверки корректности алгоритма, использующего модель случайно ориентированных сфероидов, – это обработка данных, приобретенных вблизи источников возникновения нерегулярных частиц. В этой связи два эксперимента по измерениям минеральной пыли в пустыне Сахара (SAMUM) обеспечивают наилучшими данными, существующими на сегодняш-

ний день [67, 25]. Особенностью этих экспериментов является то, что в них удалось провести измерения одновременно различными инструментами.

Во-первых, во время экспериментов на лидарной площадке работал солнечный радиометр. Как уже отмечалось, сегодня солнечные радиометры образуют целую автоматизированную сеть AERONET по обработке пассивных измерений. Их подробное описание, а также анализ получаемых ими данных приводится в [69, 106]. Они измеряют прямую солнечную радиацию на длинах волн 339, 379, 441, 501, 675, 869, 940, 1021 нм. Сигнал на указанных длинах волн используется для определения оптической толщины $G_\alpha(\lambda)$ и яркости неба. По данной информации восстанавливаются фазовая функция аэрозолей, их распределение по размеру, КПП и пр. в результате применения специально разработанного алгоритма [44]. В [45] описывается модель минеральной пыли, используемая для обработки данных пассивного зондирования, и оцениваются возникающие при этом ошибки. РАР $V(r)$ восстановлено в диапазоне радиусов от 0.05 до 15 мкм. На его основе рассчитаны эффективный радиус, общие концентрация, площадь и объём аэрозолей (69). Спектрально зависимый КПП M оценивается в диапазоне длин волн от 441 нм до 1021 нм и в интервалах 1.33-1.6 для реальной части и $0.0005i$ - $0.5i$ для мнимой части.

Во-вторых, в экспериментах принимал участие исследовательский самолет Falcon, оборудованный измерительными приборами для выполнения локального забора проб (ЛЗП) химических, микрофизических и морфологических свойств частиц [74, 113, 148, 149, 87]. Минеральный анализ частиц на борту самолета также позволил получить оценку КПП. Кроме того, на его борту был установлен лидар высокого спектрального разрешения [50,49]. В результате для нескольких дней накоплен расширенный набор оптической, микрофизической, химической и морфологической информации о пыли, когда самолет барражировал над лидарами наземного базирования.

Таким образом, у нас есть возможность проверить работу алгоритма для оценки параметров нерегулярных пылевых частиц путем сравнения результатов, получаемых при лидарном и пассивном зондировании, а также с помощью ЛЗП.

В первом эксперименте (SAMUM-1) собраны данные, полученные тремя лидарными системами, работавшими в течение 1 месяца около ареала происхождения сахарской пыли в Марокко в мае-июне 2006 г. [131, 50, 55, 66]. К ним относятся лидары BERTHA из института тропосферных исследований, г. Лейпциг [66], POLIS и MULIS из Германского Аэрокосмического Центра, г. Мюнхен [55]. Они располагались на территории аэропорта Оуарзазате (30.93° с.ш., 6.9° з.д., 1133 м над уровнем моря) и измеряли профили оптических данных $3\beta+2\alpha$ от уровня земли до верхней тропосферы, а также профиль деполяризации излучения на длине волны 532 нм, позволяющий сформировать расширенный набор $3\beta+2\alpha+1\delta$. Анализ измеренных данных, методика их обработки и оценка ошибки может быть найдены в нескольких публикациях, связанных с SAMUM-1 [131, 50, 55, 66]. Наблюдаемый в ходе SAMUM-1 пылевой шлейф не был подвержен взаимодействию с загрязнениями антропогенного происхождения. Это подтвердилось в результате химического анализа частиц, отобранных с борта самолета и с поверхности земли в непосредственной близости от лидарной площадки и в значительном удалении от неё [74].

Для анализа мы выбрали три измерительных дня, 18-05-2006 г., 19-05-2006 г. и 04-06-2006 г., которые характеризуются наиболее полными наборами оптических данных, полученных всеми четырьмя лидарными системами, а также оптическими, микрофизическими, химическими и морфологическими свойствами, установленными в результате ЛЗП. Детальные результаты от 19-05-2006 опубликованы в [106].

Второй эксперимент (SAMUM-2) проводился на территории аэропорта Прая в Республике Кабо Верде в январе-феврале 2008 г. (15° с.ш., 23.5° з.д., 75 м над уровнем моря). Как и в 1-ом эксперименте использовался весь спектр описанных инструментов. Почти на протяжении всей кампании SAMUM-2 наблюдалась смесь минеральной пыли с аэрозолями морского происхождения и/или продуктами горения биомассы [133, 61, 134, 62]. В одних случаях аэрозольный слой из смеси продуктов горения биомассы и минеральной пыли располагался над минеральной пылью, погруженной в морской пограничный слой. В других

случаях слой продуктов горения биомассы наблюдался над слоем из смеси морского аэрозоля и пыли. Продукты горения возникли вследствие пожаров в Западной Африке.

Для проведения сравнительного исследования в SAMUM-2 мы выбрали измерения от 22-01-2008 г. и 31-01-2008 г. Эти дни характеризуются аэрозольной смесью из минеральной пыли и продуктов горения биомассы. Результаты ЛЗП с данными об оптических и микрофизических свойствах опубликованы в [149, 114], о минеральном составе частиц и морфологии – в [75].

Перейдем к анализу полученных результатов. На рис. 38а и 39а показаны вертикальные профили коэффициентов обратного рассеяния β и деполяризации излучения δ на длине волны 532 нм от 18-05-2006 г. (измерения проводились ночью) и 19-05-2006 г. (измерения проводились утром). Полный набор измерений подробно исследован в [133]. Пылевой слой распространяется высотой вплоть до 5 км над уровнем моря. В первом случае коэффициент обратного рассеяния остается практически постоянным во всем слое, во втором случае есть небольшие вариации. Деполяризация меняется в пределах 30-35 %. Лидарное отношение R , полученное лидарами наземного и самолетного базирования 18-05-2006 г., в пылевом слое ведет себя спектрально- и высотно-независимо и согласуется друг с другом в пределах измерительной погрешности [131, 50]. 18-05-2006 г. и 19-05-2006 г. не отмечалось его существенного изменения.

Исходя из априорной информации, можно заключить, что в эти дни наблюдалась типичная однослойная система, состоящая только из пыли без примесей. В этом случае мы имеем возможность проверить работу алгоритма при использовании наборов оптических данных $3\beta+2\alpha$, $3\beta+2\alpha+1\delta$ и условии, что известен параметр $\eta=1$, т.е. ансамбль аэрозолей моделируются одними сфероидами. Для расчетов наборы оптических данных формируются на высотных слоях толщиной по $\Delta z=500$ м, центры которых обозначены круглыми маркерами на профилях.

Вертикальные профили микрофизических параметров, восстановленных по наборам $3\beta+2\alpha$, $3\beta+2\alpha+1\delta$ от 18-05-2006 г. и 19-05-2006 г., показаны на

рис. 38б-г и 39б-г. Для сравнения указанные рисунки показывают результаты обработки алгоритмом набора $3\beta+2\alpha$ в предположении сферичности частиц, т.е. $\eta=0$, а также результаты AERONETа обработки данных пассивного зондирования солнечным радиометром.

Для 18-05-2006 г. мы находим, что эффективный радиус r_{eff} , восстановленный алгоритмом, не зависит от высоты. Его значения варьируются около 1 мкм, если применяется сфероидная модель частиц, и около 1.5 мкм при использовании сферической модели. Эффективный радиус, полученный AERONETом, характеризуется общим значением, рассчитанным на основе общего РАР, а также значением, рассчитанным только на основе грубой моды $V(r)$.

Общий объём v_0 остается сравнительно постоянным внутри пылевого слоя. Это хорошо согласуется с высотно-независимым коэффициентом обратного рассеяния. Мы находим гораздо большее значение общего объёма в предположении сферичности частиц. Данные AERONETа [общий объём $V(r)$ и общий объём только грубой моды $V(r)$] согласуется более чем хорошо с результатами обработки алгоритмом данных лидарного зондирования, если применяется сфероидная модель и наборы оптических данных $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+2\alpha+1\delta$. Более строгое сравнение результатов возникает, если воспользоваться соотношением

$$V_0 = \int_0^{\infty} v_0(z) dz \quad (152)$$

Экстраполируя профиль общего объёма на высотах ниже 2 км на таком же уровне, который достигается внутри аэрозольного слоя, мы находим, что общий объём V_0 оценивается около $0.14 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ при обработке набора $3\beta+2\alpha$ и $0.15 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ при обработке $3\beta+2\alpha+1\delta$. Данные AERONETа составляют $0.13 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ и $0.11 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ общего РАР и только его грубой моды соответственно. Как видно, обработка алгоритмом набора $3\beta+2\alpha$ ведет к результатам, имеющим меньшую невязку с данными AERONETа.

18-05-2006

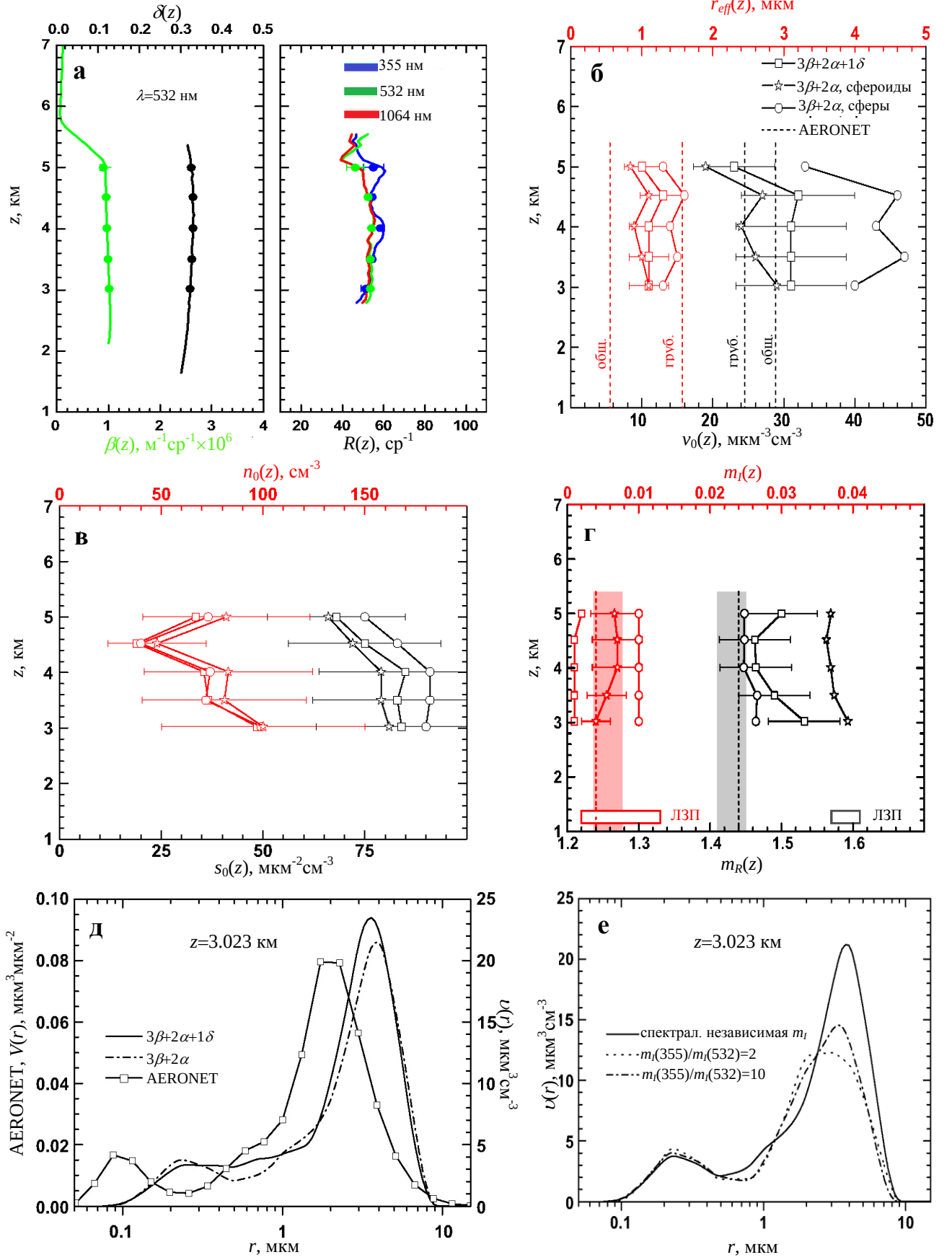


Рис. 38. Измерения, выполненные 18-05-2006 г.. Сравнение результатов, полученных различными методами

19-05-2006

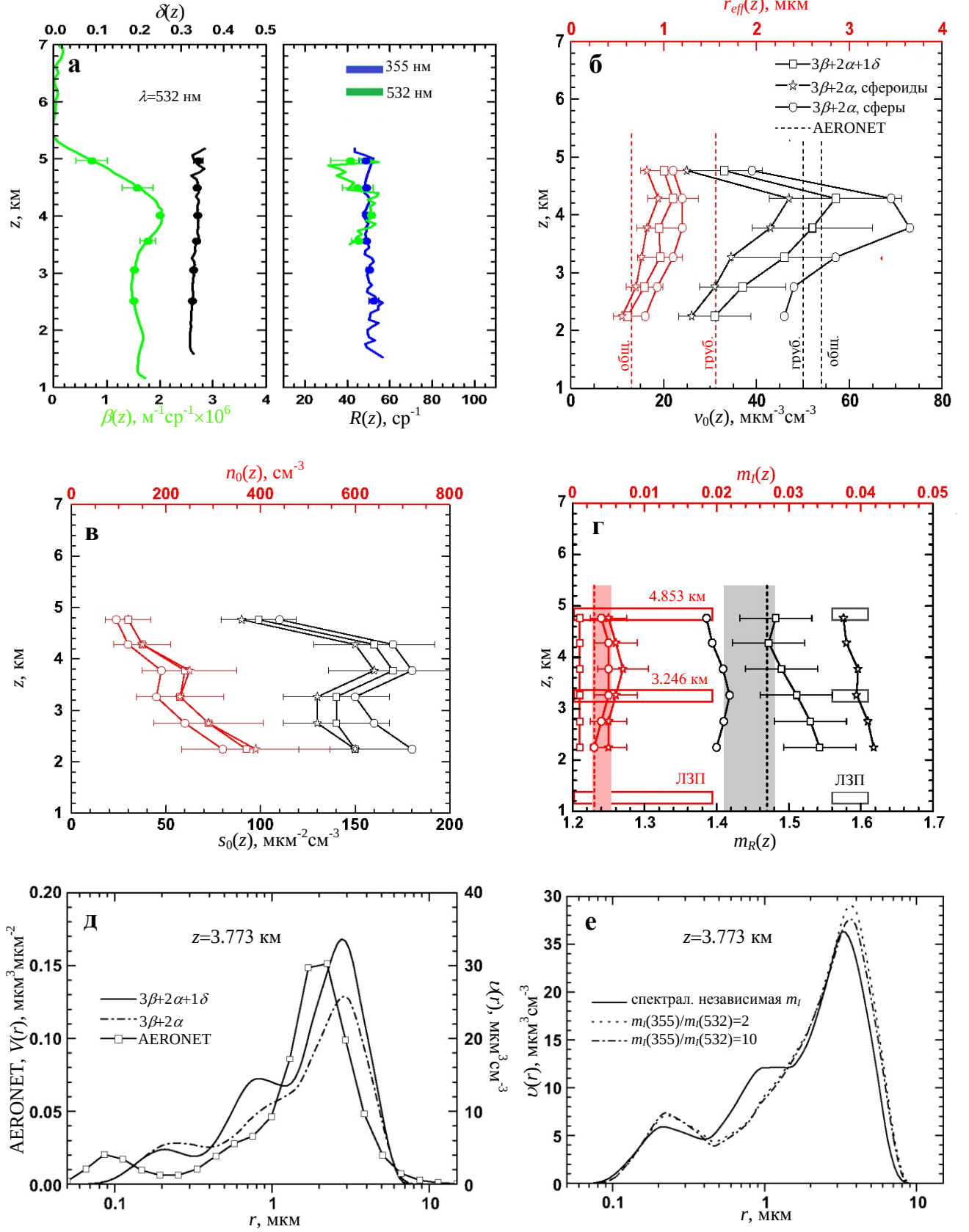


Рис. 39. Измерения, выполненные 19-05-2006 г. Сравнение результатов, полученных различными методами

Однако, принимая во внимание ошибку алгоритма (см. табл. 6), разница в результатах обработки обоих наборов оптических данных незначительна.

Для 19-05-2006 г. общий объём (рис. 39б) увеличивается с высотой, достигая максимума в верхней части аэрозольного слоя на высоте около 4 км. Такое поведение наблюдается при обработке обоих наборов оптических данных, однако профиль, соответствующий набору $3\beta+2\alpha+1\delta$ «сдвинут» на 20-30% к большему значению. Возникающая разница также находится в пределах статистической ошибки алгоритма, достигающей 50 % (см. табл. 6). Мы рассчитали интегральное значение всего профиля (152), предполагая общий объём постоянным ниже 2 км. Оно составляет $0.16 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ для набора $3\beta+2\alpha$ и $0.19 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ для $3\beta+2\alpha+1\delta$. Соответствующее значение AERONETa $0.21 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ для всего PAR и $0.16 \text{ мкм}^3 \text{ мкм}^{-2}$ для грубой фракции. В этом случае результат обработки набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ немного лучше согласуется с данными AERONETa.

Эффективный радиус увеличивается с высотой от 0.6 мкм до 1 мкм для набора $3\beta+2\alpha+1\delta$. Для набора $3\beta+2\alpha$ значения немного выше, но снова в пределах ошибки алгоритма. Интегральное значение, оцениваемое AERONETом, составляет 0.65 мкм для всего PAR, что немного ниже величины, полученной при обработке лидарных данных. Здесь необходимо отметить, что качественные лидарные данные измерены, начиная только с 2.2 км, и поэтому отсутствует информация о эффективном размере частиц ниже этой высоты. Эффективный размер грубой фракции частиц оценивается AERONETом около 1.6 мкм.

Для 19-05-2006 г. эффективный радиус, определенный путем ЛЗП, в два раза превышает уровень, который демонстрирует алгоритм и AERONET [106]. Как правило, такое отличие наблюдается при сравнении результатов AERONETa и ЛЗП и в других исследованиях [101]. Все еще обнаруженная невязка находится в пределах ошибки алгоритма, установленной при моделировании в табл. 6, если принять результаты ЛЗП как достоверные. Подчеркнем, что более аккуратный мониторинг столь крупных частиц требует добавление лидарных каналов, работающих на больших длинах волн, чем 1064 нм.

Рис. 38в и 39в показывает профили общей площади s_0 и концентрации n_0 . Общая площадь частиц обычно является наиболее стабильным параметром в восстановлении, пропорциональным коэффициенту ослабления. Здесь также находим, что она не меняется с высотой, как и коэффициент ослабления. В то же время общая концентрация постепенно уменьшается с высотой. Результаты обработки алгоритмом обоих наборов оптических данных близки в оценке общей концентрации и площади поверхности.

Профили реальной m_R и мнимой m_I части КПП показаны на рис. 38г и 39г. 18-05-2006 реальная часть варьируется от 1.45 до 1.6 в зависимости от того, какой набор оптических данных обрабатывается алгоритмом, и какая предполагается модель аэрозолей: сферическая или сфероидная. С учетом возникающего уровня погрешности она практически не претерпевает изменения по высоте.

AERONET обеспечивает несколькими разновидностями данных о КПП $M=M_R-iM_I$. Серая пунктирная линия соответствует значению на длине волны 675 нм, а серая затененная область – все возможные значения в спектральном диапазоне от 441 до 1021 нм. Напомним, что тестируемый алгоритм предполагает спектрально независимый КПП в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм. Как следует из графиков, результаты AETONETа находятся вблизи минимального уровня, достигнутого алгоритмом при использовании сфероидной и сферической модели.

Серая горизонтальная рамка внизу графика на уровне минимальной высоты представляет реальную часть КПП, полученную при наземных измерениях минералогии частиц, выполненных в Тинфоу[74]. Она «накрывает» значения, восстановленные алгоритмом, использующим сфероидную модель частиц, при обработке набора $3\beta+2\alpha$. Зависимость реальной части от длины волны является незначительной, принимая во внимание погрешность, возникающую в лидарном методе.

19-05-2006 г. реальная часть, восстановленная по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$, слабо снижается с высотой от 1.55 до 1.5. Реальная часть, полученная по измерениям $3\beta+2\alpha$, имеет большие значения, около 1.6, и не меняется внутри аэрозольного

слоя. Как было установлено в параграфе 2.3 (см. рис. 13, 14), её уменьшение при использовании измерений деполяризации в алгоритме обусловлено особенностями сфероидной модели, в которой деполяризация излучения может достигать 30 % только при больших $m_R \sim 1.6$ и малых m_I , близких к 0 [138]. По этой же причине мнимая часть оценивается по измерениям $3\beta+2\alpha$ на уровне $i0.006$, тогда как применение полного набора данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ ведет к $m_I=0.001$. Реальная часть, восстановленная по уменьшенному и полному набору оптических данных, представляется разумной, хотя трудно сделать вывод, какая из них ближе к истинному значению, поскольку результаты AERONETа и ЛЗП до определенной степени противоречивы.

Пассивный метод дает $M_R=1.47$ на длине волны 675 нм, что меньше, чем результат лидарного метода в предположении асферичности частиц. Применение сферической модели в алгоритме ведет к $m_R=1.4$. Учитывая спектральную вариацию реальной части, оцениваемой AERONETом в диапазоне длин волн от 441 до 1021 нм (см. серую затененную рамку), её максимум и минимум совпадает с результатами лидарного метода.

Результат ЛЗП на поверхности земли в Тинфоу приходится на интервал 1.56-1.61 в рассматриваемом здесь спектральном диапазоне [74,106]. В этом случае результаты лидарного метода лежат у нижнего ($3\beta+2\alpha+1\delta$) и у верхнего ($3\beta+2\alpha$) пределов указанного интервала. Отметим, что ЛЗП в это время проводился также с борта самолета на высотах 3.246 и 4.853 км, результаты которого не отличаются от наземных измерений.

Мнимая часть КПП заметно зависит от модели частиц, которая используется алгоритмом для обработки данных, приобретенных 18-05-2006 г. и 19-05-2006г. 18-05-2006 г. наибольшее значение возникает в предположении сферичности частиц. Когда обрабатывается полный набор данных – m_I близка к 0 на всех высотах. Это характерная особенность сфероидной модели, но пока мы не знаем, насколько она корректна.

Мнимая часть, восстанавливаемая AERONETом на длине волны 675 нм ($M_I=0.004$), находится между «лидарными» результатами, полученными по на-

борам $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+2\alpha+1\delta$ с привлечением сфероидной модели частиц. Область значений спектрально зависимой мнимой части КПП иллюстрируется красной затененной рамкой, которая возникает в диапазоне длин волн от 441 до 1021 нм. На длине волны 441 нм достигается максимум $M_I=0.008$.

Для сравнения мы показываем результаты в виде красной горизонтальной рамки для мнимой части, вытекающие из минералогического анализа отдельной частицы, выполненного 18-05-2006 г. на поверхности земли в Тинфоу [74]. Они показывают область значений m_I в спектральном диапазоне от 355 нм (максимум, соответствующий сильному поглощению света) до 1064 нм (минимум, соответствующий слабому поглощению света). Результаты ЛЗП накрывают весь диапазон значений, «найденных» радиометром и лидаром. Наилучшая сходимость наблюдается среди результатов, восстановленных AERONETом и алгоритмом по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$, расположенных в центре измерений ЛЗП.

Что касается 19-05-2006 г., результаты алгоритма почти не отличаются от результатов 18-05-2006 г. В этом случае наибольшая мнимая часть найдена алгоритмом с использованием сфероидной модели по набору $3\beta+2\alpha$, следующая за ней в сторону уменьшения мнимая часть соответствует набору $3\beta+2\alpha$ и сферической модели, наконец, минимальная мнимая часть обнаружена по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$ с использованием сфероидной модели.

Красная пунктирная линия показывает результаты AERONETа на длине волны 675 нм, а красная затененная рамка – область значений в диапазоне длин волн от 441 нм (максимум мнимой части) и до 1021 нм (минимум мнимой части). Красные горизонтальные рамки на рис. 39г описывают полный набор значений m_I , выявленных в результате как наземного минералогического анализа в Тинфоу, так и ЛЗП на борту самолета на высотах 3.246 и 4.853 км.

Подчеркнем еще раз, восстановление мнимой части КПП представляется одной из наиболее трудных проблем рассматриваемых здесь задач лидарного зондирования. Погрешность её оценки зависит от диапазона (25), кроме того, применение сфероидной модели в алгоритме в свою очередь создает трудности при решении. Как мы уже отмечали [138], в этом случае высокая деполяризация

излучения до 30 % достигается только при малых m_I . Поэтому обработка полного набора данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ всегда приводит к значениям мнимой части, близким к 0. Это видно на рис. 38г, 39г, 41г, 42г.

В то же время восстановление без учета деполяризации ($3\beta+2\alpha$) дает $m_I \approx 0.005$. Похожее значение восстанавливается с использованием сферической модели. AERONET снабжает промежуточными величинами, если учитывается спектральная зависимость мнимой части. Высокая погрешность в оценке m_I лидарным методом не позволяет сделать вывод, какой из вариантов ближе к истинному значению, также в связи с тем, что апробируемый алгоритм не может восстановить спектрально зависимую мнимую часть КПП пыли, наблюдаемой над Марокко. Данные ЛЗП достигают уровня $m_I \approx 0.02$. Очевидно, необходимо проведение дальнейших исследований, направленных на подтверждение адекватности сфероидной модели в оценках деполяризации излучения при высоких значениях мнимой части КПП.

Подводя предварительные итоги проведенного анализа результатов, представленных на рис. 38а-г, 39а-г, мы видим, что применение ядер, описывающих рассеяние на сферах, может, действительно, обеспечивать разумными оценками размера и концентрации пыли, хотя их применение ведет к гораздо меньшему значению реальной части КПП.

Алгоритм может быть использован также для восстановления до некоторых пределов основных свойств РАР, как показано на рис. 38д, 39д для одного из высотных слоев измерений от 18-05-2006 г. и 19-05-2006 г. В обоих случаях мы находим больший объем частиц, превосходящих размер в 1 мкм. Грубые моды, полученные при обработке наборов $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, более чем близки. На 38д, 39д также показаны интегральные РАР всего профиля, восстановленные по измерениям AERONETa.

Грубая мода РАР, представляемая радиометром, слегка сдвинута к меньшим размерам по сравнению с результатами лидарных измерений. Кроме того, РАР пассивных измерений содержит ярко выраженную моду с пиком около 0.1 мкм, отсутствующую в результатах обработки лидарных данных. Для иден-

тификации достоверной информации необходимо привлечение дополнительных измерений ЛЗП. Такие измерения будут доступны при анализе экспериментальных данных от 04-06-2006 г.

Рис. 38е, 39е показывают примеры РАР, восстановленных по данным лидарного зондирования от 18-05-2006 г. и 19-05-2006 г. на основе различных предположений о спектральном поведении мнимой части КПП. Мы исследовали три возможных сценария её поведения, в т.ч.:

(а) m_I не зависит от длины волны: $m_I(\lambda)=\text{const}$,

(б) $m_I(355)$ в два раза больше, чем $m_I(532)=m_I(1064)$, когда $m_I(532)=m_I(1064)$ пробегает предварительно заданные значения m_I' в интервале от 0 до 0.01 (см. пример поведения на рис. 16).

(в) $m_I(355)$ в десять раз больше, чем $m_I(532)=m_I(1064)$, когда $m_I(532)=m_I(1064)$ пробегает предварительно заданные значения m_I' в интервале от 0 до 0.01, но не более 0.05 (см. также пример на рис. 16).

Предположения, касающиеся спектрального поведения мнимой части КПП, основаны на наблюдениях минеральной пыли, демонстрирующих сравнительно высокое поглощение в ультрафиолетовом диапазоне длин волн [107,74,101].

Отметим, что все остальные результаты обработки экспериментальных данных, представленные в настоящей работе, получены в предположении спектральной независимости мнимой части КПП. Это связано с тем, что, как правило, мы не располагаем достоверной априорной информацией о поведении m_I как функции длины волны λ . Рис. 38е, 39е дают представление о степени влияния данного фактора на результаты восстановления.

В частности, они показывают, что форма восстановленных РАР не меняется существенно при введении коррекции в алгоритм, учитывающей спектрально зависимую мнимую часть по сценарию (б) и (в). Как было показано в параграфе 2.3 такой вид зависимости m_I от λ влияет только на коротковолновую часть спектра коэффициента обратного рассеяния.

Мы видим, что общий объём в грубой моде заметно больше, когда мнимая часть является спектрально независимой. Так, для измерений от

18-05-2006 г. общий объём частиц составляет $29 \text{ мкм}^3\text{см}^{-3}$ по сценарию (а) и $24 \text{ мкм}^3\text{см}^{-3}$ по сценариям (б) и (в). Эффективный радиус оценивается около 1.10, 0.90 и 0.82 мкм для каждого сценария соответственно. Реальная часть КПП по всем трем сценариям равна 1.6. Как результат, невязка между величинами, восстановленными пассивным и лидарным методами, уменьшается. Аналогичный эффект наблюдался в рамках численного моделирования в гл. 1 (см. рис. 19).

Для измерений от 19-05-2006 г. общий объём частиц составляет 45, 47 и $46 \text{ мкм}^3\text{см}^{-3}$ по сценарию (а), (б) и (в) соответственно. Это означает, что в отличие от измерений 18-05-2006 г. здесь коррекция алгоритма, учитывающая спектрально зависимую мнимую часть, несущественно влияет на оценку общего объёма пыли, хотя она позволяет подавить, скорее всего, ложную моду с радиусом около 1 мкм. Эффективный радиус равен 0.82 мкм по сценарию (а) и 0.93 мкм по сценариям (б) и (в). Реальная часть КПП в зависимости от сценария отличается незначительно и оценивается около 1.62, 1.58 и 1.59 соответственно.

Измерения, проводимые 4-06-2006, были получены одновременно тремя методами, и позволяют провести сравнения, кроме всего прочего, и РАР. В этот день наблюдался пылевой шлейф высотой 4.5 км, в котором деполяризация достигала 35 %. Лидарные данные обрабатывались с высоты $z=3.78$ км. Для восстановления использовались два набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, результаты которого представлены на рис. 40. Оба РАР близки друг к другу и имеют сильно доминирующую грубую моду с модальным радиусом около 4 мкм, хотя для полного набора оптических данных она смещена в сторону меньших размеров. Это согласуется с результатами 1 главы, где отмечалось, что максимум деполяризации (вплоть до 40 %) приходится на частицы размером 1 мкм, при этом реальная часть КПП составляет менее 1.5, а мнимая – близка к 0. Как следствие, КПП оценивается около $m=1.45-i0.001$ и $1.55-i0.007$ для полного и уменьшенного набора оптических данных соответственно.

На рис. 40 также показано РАР, восстановленное по данным, измеренным солнечным радиометром. Как видно, грубые моды, полученные по лидарным и

радиометрическим данным, близки, хотя модальное значение радиуса последней составляет около 2 мкм. КПП по данным солнечного радиометра оценивается около $1.45-i0.003$ на длине волны 675 нм. Результаты обработки данных солнечного радиометра в отличие от лидарных данных указывают на наличие ярко выраженной моды с модальным радиусом около 0.1 мкм. Данное обстоятельство можно объяснить тем, что солнечный радиометр дает интегральную информацию о профиле зондирования в целом, включая малые высоты $z \approx 0$ км, на которых могут сосредоточиться аэрозоли с интенсивной ярко выраженной модой. К сожалению, качественные лидарные измерения, проводимые 4-06-2006 г. на малых высотах, отсутствуют.

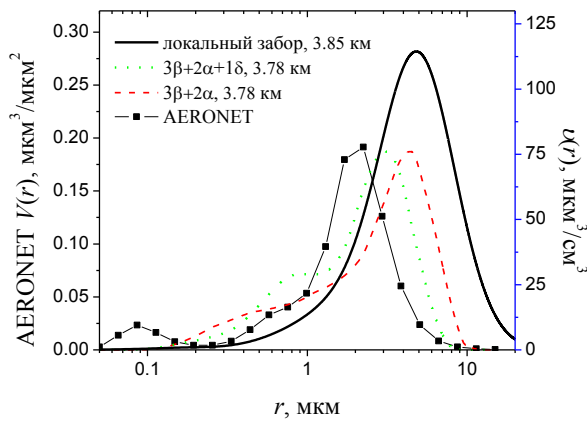


Рис. 40. РАР, полученные путем лидарных измерений по набору оптических данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ (точечная кривая) и $3\beta+2\alpha$ (пунктирная кривая), измерений с помощью солнечного радиометра (кривая с маркером) и локального забора проб (сплошная кривая), проводимых 4-06-2006 г.

ный радиус, восстановленный алгоритмом, составляет около 1.37 мкм, что примерно вдвое меньше значения ЛЗП. Данный эффект уже отмечался и находится в соответствии с ожиданиями. Сравнение результатов обработки измерений, выполненных различными инструментами 4-06-2006 г., демонстрирует их разумную сходимость.

Анализ трех измерительных дней в рамках SAMUM-1 показывает, что мы обнаружили согласованные результаты при обработке алгоритмом полного $(3\beta+2\alpha+1\delta)$ и традиционного $(3\beta+2\alpha)$ наборов оптических данных в случае бес-

Наконец, рис. 40 показывает результаты локального забора проб, сделанных на высоте $z=3.85$ км. Как и в случае с результатами, полученными по лидарным данным, здесь РАР также имеет мощную грубую моду с пиком около 4 мкм, при этом общий объем аэрозолей оценивается около $177 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Аналогичный параметр, восстановленный по лидарным данным, равен $120 \text{ мкм}^3/\text{см}^3$. Эффектив-

примесной минеральной пыли. Мы также показали разумную сходимость результатов нашего алгоритма, AERONETa и ЛЗП.

Условия усложняются, когда аэрозольные слои состоят из смеси пыли и продуктов горения биомассы. Для такого случая в алгоритме предусмотрено моделирование частиц в виде смеси сфер и случайно ориентированных сфероидов, при этом возникает ещё один неизвестный параметр η , характеризующий объёмную долю сфероидной фракции (ОДСФ). В принципе последний может быть оценен по набору $3\beta+2\alpha$, однако тогда ошибка алгоритма существенно увеличивается (см. рис. 22), сфероидная фракция недооценивается, и привлечение деполаризации излучения становится весьма важным в восстановлении. Подчеркнем, что распределение характеристического отношения $\mu(\varepsilon)$ оптимально подобрано так, чтобы моделировать пыль, а не дым или смесь пыли с дымом.

Еще одной проблемой в восстановлении микрофизических параметров смеси «пыль-дым» является то обстоятельство, что каждая из компонент смеси имеет различные мнимые части КПП. Мнимая часть пылевой компоненты вполне мала, около $0.005i$, тогда как у дыма она может превышать $0.02i$ [119]. В ходе нашего исследования мы неоднократно отмечали важность дополнительных ограничений на вариации параметра m_I в условиях (25) в обеспечение минимизации ошибки алгоритма. Поэтому при восстановлении микрофизических параметров отдельно беспримесных пыли и дыма мы бы ограничили его пределы интервалом $(0i; 0.015i)$ и $(0.01i; 0.03i)$ соответственно. В рассматриваемом же случае мы вынуждены принять в расчете как можно более широкую область значений мнимой части КПП. Это не влияет существенно на точность восстановления r_{eff} , v_o , s_o , n_o [138], но ведет к большей неопределенности в оценке m_R .

Чтобы продемонстрировать применение сфероидной модели для распознавания смеси «пыль-дым» мы обработали измерения, выполненные 22-01-2008 г. и 31-01-2008 г. в ходе SAMUM-2 [62,133]. Рис. 41а показывает измерения от 22-01-2008 г. Пыль из северной Африки доминирует на высоте 1 км. Аэрозоли выше 1 км представляют собой смесь минеральной пыли и дыма, возникшего в результате горения продуктов биомассы на севере Западной Африки

[133]. Она распространяется вплоть до высоты 3.5 км. Деполяризация излучения на длине волны 532 нм в этом слое варьируется между 15 и 20 %, что ниже, чем значения для пыли [55]. Лидарное отношение составляет 60 ср в центре шлейфа (между 2 и 3 км) и меняется от 60 до 90 ср, указывая на присутствие сильно поглощающих частиц.

Рис. 41в показывает вертикальные профили общего объёма и эффективно-го размера, восстановленные по наборам $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$. Профиль общего объёма, также как и общей площади поверхности и концентрации (рис. 41б) повторяют поведение профилей коэффициентов обратного рассеяния на рис. 41а. Их минимум достигается на высоте 1.75 км, а максимум наблюдается внутри пыле-дымового слоя на высоте около 2.5 км.

Как мы уже отметили, одной из ключевых проблем в восстановлении является оценка ОДСФ. Мы получили её оценку около 100 % по измерениям $3\beta+2\alpha+1\delta$ на высоте 1.26 км, т.е. внутри беспримесного пылевого слоя. Она слегка снижается с высотой и достигает минимума около 80 % на высоте 2.3 км. Затем η растёт до 95 % на высоте 3.25 км, указывая на то, что выше 2.5 км вклад пыли в общее содержание аэрозольной смеси, вероятно, снова увеличивается.

ОДСФ, определенная по измерениям $3\beta+2\alpha$, составляет около 40 % на всех высотах. Мы наблюдали аналогичную особенность алгоритма при моделировании в параграфе 2.7, когда исключение деполяризации из исходного набора оптических данных вело к более низкой оценке η по сравнению со значением, получаемым по данным $3\beta+2\alpha+1\delta$. В целом, из рис. 41в видно, что профили, восстановленные по полному и традиционному набору оптических данных, близки по форме. Однако обработка набора $3\beta+2\alpha$ даёт оценку общего объёма, превышающую на 20-30 % уровень аналогичного параметра, который мы нашли, используя набор $3\beta+2\alpha+1\delta$. Рис. 41б иллюстрирует, что результаты восстановления профилей общей концентрации и площади поверхности практически не отличаются, какие бы наборы оптических данных или аэрозольные модели мы не привлекали.

Эффективный радиус частиц растет с высотой от 0.35 до 0.60 мкм, если мы решаем задачу лидарного зондирования (11) с правой частью $3\beta+2\alpha+1\delta$. Его значение, восстановленное с правой частью $3\beta+2\alpha$, на 10-20% выше. Эта разница находится в пределах ошибки алгоритма.

Эффективный радиус R_{eff} всего профиля, полученный в результате обработки измерений солнечного радиометра от 22-01-2008 г., составляет около 0.42 мкм для общего РАР всего профиля $V(r)$, включающего фракции частиц и дыма и пыли. Если выделить фракцию грубой моды, то её эффективный радиус будет равен около 1.6 мкм, что очень близко к результатам, наблюдаемым AERONETом в ходе SAMUM-1. Уровень 0.42 мкм общего $V(r)$ хорошо согласуется с решением задачи лидарного зондирования.

Для сравнения мы ограничиваем область значений эффективного радиуса грубой моды беспримесной пыли, восстановленных в течение SAMUM-1, розовой рамкой. Короткая розовая вертикальная линия указывает результат AERONETа от 19-05-2006 г. Вертикальная розовая рамка, растянутая от 0.5 до 4.3 км, «накрывает» область высокой концентрации частиц дыма, иллюстрируя их минимальный и максимальный эффективный размер вдоль трассы зондирования. Комбинированная информация в виде двух рамок, соответствующих данным пассивного зондирования и ЛЗП, демонстрирует, что эффективный радиус, восстановленный в результате лидарного зондирования, является реалистичным.

Рис. 41г показывает сильные колебания КПП. На низких высотах, где смесь представлена, главным образом, пылевой компонентой, реальная часть равна 1.57, если алгоритмом обрабатывается набор $3\beta+2\alpha+1\delta$. На больших высотах, где содержание частиц продуктов горения увеличивается, она снижается до 1.5. Значение m_R , оцениваемое по набору $3\beta+2\alpha$, слегка растет с высотой от 1.45 до 1.52.

По данным радиометрических измерений реальная часть $M_R=1.47$ на длине волны 675 нм. Она варьируется между значениями 1.41 и 1.53 в спектральном диапазоне от 441 до 1021 нм в исследуемом случае и иллюстрируется вертикальной затененной серой областью. Принимая во внимание погрешность алгоритма,

восстановленные профили m_R лежат в пределах указанных значений. Профиль m_R , восстановленный с использованием сферической модели, находится за пределами результатов AERONETa.

Среднее значение m_R , измеренное путем ЛЗП, составляет 1.57-1.58 [75]. Оно наблюдалось в диапазоне длин волн от 441-1021 нм и находится в области вариаций реальной части, изображенной на рис. 41г горизонтальной заполненной серой рамкой и отмечавшейся также в течение SAMUM-1 [101,74]. Оценки сделаны в результате аналогичного минерального анализа пыли с борта самолета Falcon. Полученные результаты ЛЗП характеризуют высоты от 0.6 до 3.6 км и обозначены на 41г вертикальной серой рамкой.

У нас нет данных ЛЗП дымовой компоненты в аэрозольном слое для измерений от 22-01-2008 г. Результаты обработки данных лидарного зондирования беспримесного дыма исследуемого «пыле-дымового» слоя обсуждаются в [134]. Вклад пыли в оптические свойства соответствующего «пыле-дымового» слоя был определен с помощью подхода, представленного в [132]. Согласно расчетам, проведенным таким образом, среднее значение эффективного радиуса частиц дыма составляет 0.22 ± 0.08 мкм в восходящем аэрозольном слое, а среднее значение реальной части КПП – 1.54 ± 0.06 , при этом диапазон всех значений находится в пределах от 1.42 до 1.67. Соответствующие результаты ограничены горизонтальной серой рамкой на рис. 41г. Исследования, выполненные в [43], сообщают о средних значениях реальной части КПП от 1.47 до 1.52 для различных типов продуктов горения биомассы. Накопленные на сегодня данные по дыму характеризуются следующими показателями: 1.5 ± 0.04 для хвойных лесов, 1.47 ± 0.03 для амазонских лесов, 1.52 ± 0.01 для североамериканских лесов и 1.51 ± 0.01 для африканских саванн.

Комплексно анализируя более чем разнородную информацию [132,75,43], учитывающую происхождение частиц, метод мониторинга, данные, интегрированные по высоте и данные с высоким вертикальным разрешением, спектрально зависимые и независимые, мы ожидаем снижение реальной части КПП с увеличением высоты. Поэтому результат обработки алгоритмом набора оптических

данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ лучше согласуется с полученным выводом, чем профиль, восстановленный по набору $3\beta+2\alpha$.

Мы нашли мнимую часть КПП в диапазоне от $i0.002$ до $i0.005$ по измерениям $3\beta+2\alpha+1\delta$. Высокая погрешность препятствует построению достоверной вертикальной вариации m_t . Исключение деполяризации из исходных данных ведет к более высоким значениям мнимой части: $i0.005$ - $i0.012$.

«Лидарная» оценка мнимой части находится у нижней границы значений, восстановленных при пассивном зондировании. Красная вертикальная затененная область показывает на рис. 41г диапазон значений между 441 и 1021 нм. Вертикальная пунктирная линия указывает значение мнимой части на 675 нм.

ЛЗП пыли в ходе SAMUM-2 находит значения мнимой части КПП от $i0.012$ на 441 нм до $i0.0034$ на 1021 нм [75]. Они ограничены на рис. 41г вертикальной красной рамкой. Для сравнения красная горизонтальная заполненная рамка на этом рисунке представляет мнимую часть беспримесной пыли, наблюдаемой в течение SAMUM-1 [101,74].

Что касается дымовой компоненты, мнимая часть варьируется от $i0.014$ до $i0.044$ со средним значением 0.029 ± 0.01 в соответствии с подходом, описанным в [134]. Она показана красной горизонтальной рамкой на рис. 41г. Подчеркнем, что эти результаты являются спектрально независимыми, а диапазон $i0.014$ - $i0.044$ выражает разброс возможных значений для дыма в «пыле-дымовом» слое.

Исследования, выполненные в [43], сообщают о значениях мнимой части КПП между $i0.00093$ - $i0.021$ для различных типов частиц дыма, в т.ч. $i0.0094\pm i0.003$ для хвойных лесов, $i0.00093\pm i0.003$ для амазонских лесов, $i0.015\pm i0.004$ для североамериканских лесов и $i0.021\pm i0.004$ для африканских саванн.

Выполненное сравнение результатов лидарного метода с результатами других методов показывает, что алгоритм может не обеспечивать достоверными оценками мнимой части КПП. Один из открытых вопросов связан с тем, является ли систематическая недооценка мнимой части нашим алгоритмом следствием того, что свойства североафриканской пыли сильно меняются в коротковолновой

области. Существуют другие типы пыли, не содержащие или мало содержащие оксиды железа, вызывающие сравнительно высокое поглощение света в ультрафиолетовом диапазоне длин волн.

Рис. 41д показывает РАР, восстановленные по лидарным данным $3\beta+2\alpha+1\delta$, измеренным 22-01-2008 г, на высотах 1.77, 2.79 и 3.27 км. Они являются бимодальными с сопоставимым вкладом ярко выраженной и грубой моды на всех трех высотах. Грубая мода сдвигается в сторону больших размеров, если мы исключим деполяризацию излучения из обработки, т.е. используем традиционный набор $3\beta+2\alpha$. Для сравнения на этом же рисунке показано интегральное РАР всего профиля $V(r)$, полученное по данным солнечного радиометра. Характерные особенности РАР «лидарного» и «пассивного» методов очень похожи. Однако пик ярко выраженной моды, восстановленной AERONETом, приходится на 0.1 мкм, тогда как соответствующее значение, полученное по данным лидарного зондирования, составляет около 0.2 мкм. Это расхождение может быть обусловлено недостаточным набором оптических данных для более аккуратного извлечения алгоритмом размеров частиц в диапазоне от 0.05 до 10 мкм.

Для дальнейшего исследования применимости алгоритма, использующего сфероидную модель, рассмотрим еще один эксперимент, проведенный 31-01-2008 [133,132,134]. В этот день аэрозоли ниже 1.5 км были представлены в основном минеральной пылью, а выше 1.5 км – смесью минеральной пыли и продуктов горения биомассы.

Рис. 42а показывает вертикальные профили оптических свойств частиц, измеренных лидаром. Деполяризация излучения достигает более 30 % в пылевом слое. Выше 1.25 км она падает до, примерно, 14 %, указывая на то, что вклад дымовой компоненты аэрозольной смеси начинает доминировать. Лидарное отношение в среднем увеличивается от 50-70 ср ниже 3 км до 80 ср выше 3.6 км.

Рис. 42 представляет высотное распределение общей концентрации, площади поверхности, объема и эффективного размера частиц. Поведение микрофизических параметров в вертикальном направлении можно интерпретировать следующим образом. ОДСФ, оцениваемая по набору $3\beta+2\alpha+1\delta$, близка к 100 %

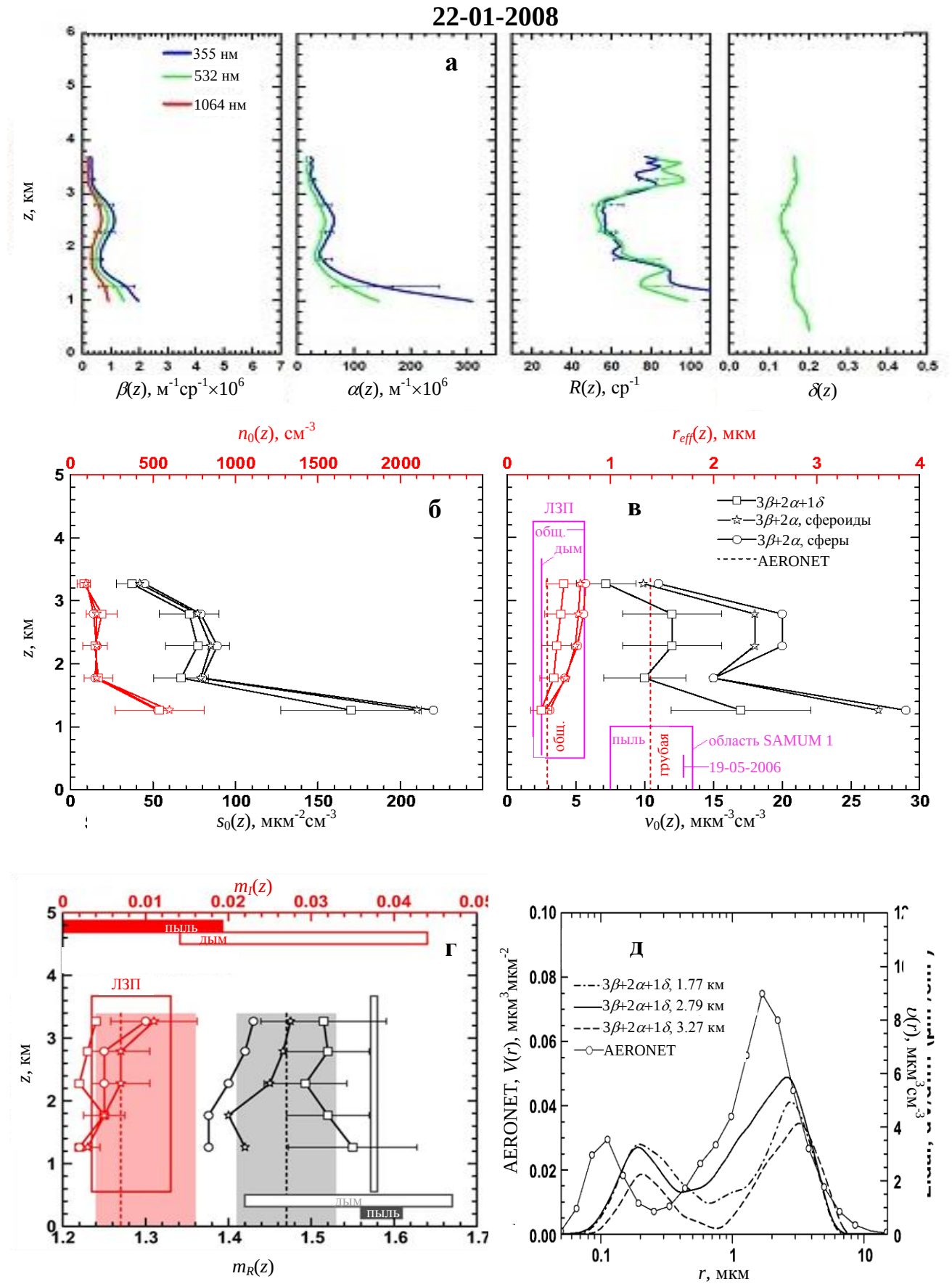


Рис. 41. Измерения, выполненные 22-01-2008 г. Сравнение результатов, полученных различными методами

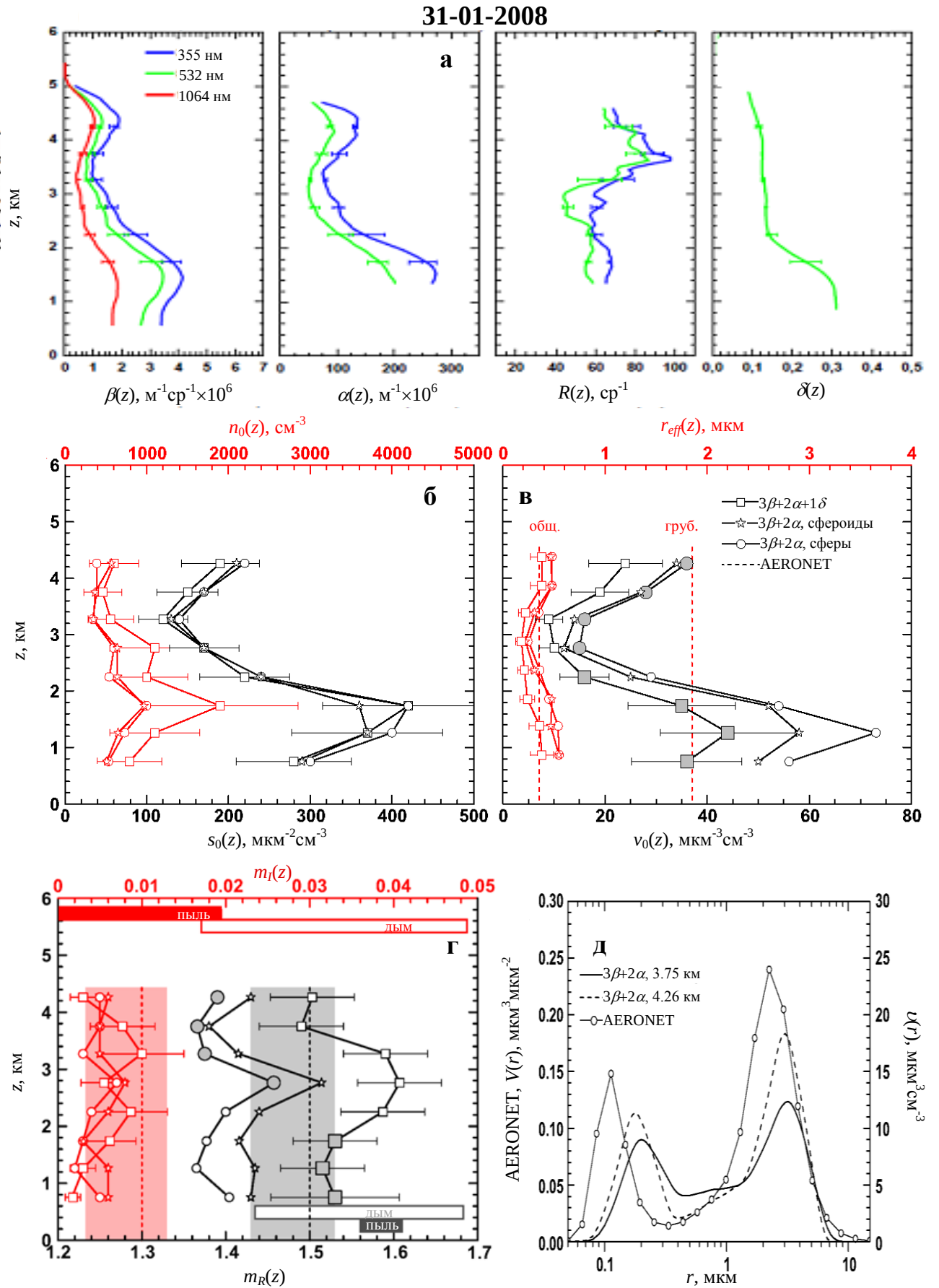


Рис. 42. Измерения, выполненные 31-01-2008 г. Сравнение результатов, полученных различными методами

внутри пылевого слоя и снижается до 85 % на высоте 4.25 км. Её значение составляет около 50 % на всех высотах, если обработать набор $3\beta+2\alpha$. Анализ априорной информации показывает, что если в первом случае мы имеем переоценку η в «пыле-дымовом» слое, то в последнем вполне возможна её недооценка. Поэтому достоверный профиль параметров частиц должен находиться среди результатов, получаемых по наборам $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $\beta+2\alpha$.

Если исходить из этого предположения, наиболее надежные результаты восстановления профиля общего объёма приходятся на нижние три высотных слоя (затененные серые квадраты ниже 2 км на рис. 42в), которые возникают при обработке алгоритмом набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ внутри пылевого слоя. Четвертый высотный слой (затененный серый квадрат на высоте около 2.4 км) представляет собой переходный этап, в котором модель меняется от «пыледоминирующей» (сфероиды) до «дымодоминирующей» (сферы). Параметры для следующих четырех высотных слоев (затененный круг) поэтому формируются из результатов обработки данных $3\beta+2\alpha$ в предположении сферической модели рассеяния внутри слоя дыма. Отметим, что использование сферической модели алгоритмом даёт разумные результаты, когда деполяризация излучения становится менее 10 %.

Общий объём уменьшается с увеличением высоты выше 1.25 км. Он достигает минимума около 2.75 км, а затем снова возобновляет рост. Общая концентрация и площадь поверхности динамично растут в нижней части профиля и достигают максимума на 1.75 км. Общая концентрация остается сравнительно постоянной выше 3 км, а общая площадь поверхности, как и общий объём, снова начинает расти выше 3.3 км. Однако видно смещение примерно на 0.5 км по высоте, где общий объём и площадь поверхности возобновляют рост.

Эффективный радиус находится между 0.4 и 0.6 мкм в нижней части профиля, области с преобладанием пыли. Результаты зависят от набора обрабатываемых оптических данных и используемой модели частиц, сферической и сфероидной. Эффективный радиус уменьшается с высотой, указывая на присутствие большого количества частиц с меньшим размером, что является характерным для продуктов горения биомассы. Минимальное значение 0.2 мкм достигается на

высоте 2.75 км. После этого он увеличивается с высотой до 0.4-0.5 мкм в верхней части профиля.

Для сравнения интегральная оценка AERONETа эффективного радиуса всего профиля составляет 0.36 мкм, если данный параметр вычисляется для общего PAR. Аналогичный параметр, рассчитанный для грубой моды, равен около 1.8 мкм. Это близко к значению, полученному AERONETом в ходе SAMUM-1 при наблюдениях «чистой» пыли. Мы считаем, что средний эффективный радиус, полученный AERONETом, хорошо согласуется с профилем, восстановленным алгоритмом.

Увеличение общих объёма и площади поверхности и эффективного размера выше 3 км можно объяснить гигроскопическим ростом частиц. Во время зондирования формировалось тонкое облако в верхней части аэрозольного слоя (на высоте около 5 км). Это предположение находится в соответствии с тем фактом, что общая концентрация остается сравнительно постоянной выше 3 км.

В данном контексте заслуживает внимания сравнение с данными многоволнового лидарного зондирования шлейфа дыма, подвергшегося старению и принесенного из Западной Канады в Центральную Европу в августе 1998 г. [147]. Деполяризация излучения в шлейфе составляла около 7 %. Лидарные данные обрабатывались с помощью впервые разработанного алгоритма, представленного в [105] и использующего только сферическую модель частиц. В результате обработки эффективный радиус в шлейфе дыма был оценен около 0.24-0.27 мкм с точностью до ± 0.04 мкм и хорошо согласовывался с измерениями ЛЗП с борта самолета, 0.25 мкм [147,142]. Полученная оценка очень близка к среднему значению эффективного радиуса на высотах между 2 и 3 км, обнаруженному в настоящем исследовании.

Рис. 42г показывает, что реальная часть КПП отличается при добавлении деполяризации излучения в исходный набор оптических данных. Величина m_R внутри пылевого слоя составляет около 1.5 ± 0.05 . В «пыле-дымовом» слое обработка набора $3\beta + 2\alpha + 1\delta$ ведет к сравнительно высоким значениям в интервале 1.5-1.6. Оценка m_R по набору $3\beta + 2\alpha$ имеет тенденцию к уменьшению от 1.5 к 1.4.

Реальная часть КПП, установленная в AERONETe, равна 1.5 на длине волны 675 нм. Серая затененная область означает всевозможные вариации в диапазоне длин волн 441-1021 нм.

Мнимая часть КПП, восстановленная по измерениям $3\beta+2\alpha$, составляет около 0.006 ± 0.003 в слое, содержащем пыль и дым. Обработка измерений $3\beta+2\alpha+1\delta$ дает даже большее значение $m_f=0.01$. Аналогичный уровень определен при пассивном зондировании на длине волны 675 нм. Все значения M_I в диапазоне длин волн 441-1021 нм наблюдались в интервале 0.003-0.013.

Вертикальные колебания реальной части КПП, как видно из рис. 42, согласованы с поведением профиля эффективного размера независимо от используемой модели частиц в алгоритме и набора оптических данных. Она увеличивается с высотой от наименьших значений (1.4-1.54 в зависимости от модели и комбинации данных) до максимальных 1.46-1.6 на высоте 2.75 км, где концентрация частиц дыма может достичь максимума по сравнению с концентрацией пыли. На этой высоте эффективный радиус находится у своего минимального значения. Затем реальная часть уменьшается с высотой до 1.38-1.5 в верхней части «пыледымового» шлейфа. Данное уменьшение опять же может быть обусловлено гигроскопическим ростом частиц дыма и в меньшей степени увеличением концентрации пыли. Последнее обстоятельство подтверждается данными о деполяризации излучения, которая постепенно снижается от 15 до 10 % в слое из смеси пыли и дыма.

Данные ЛЗП с борта самолета и других исследований [132,43] о КПП для рассматриваемого случая аналогичны тем, которые приведены на рис. 41г.

Рис. 42д показывает РАР, восстановленные по набору $3\beta+2\alpha$, на двух высотах. Они описываются ярко выраженными и грубыми модами с близкой интенсивностью. Для сравнения на рис. 42д также показано РАР, полученное AERONETом. Как и в случае от 22-01-2008 г. ярко выраженная мода алгоритма немного смещена в сторону больших размеров по сравнению с модой, восстановленной AERONETом. Наиболее хорошо согласуются грубые моды, полученные пассивным методом и при лидарном зондировании на высоте 4.26 км. В це-

лом мы видим, что результаты обоих подходов близки. Обработка алгоритмом набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ приводит к аналогичным результатам при нахождении РАР.

На основе результатов обработки оптических данных, приобретенных за 4 измерительных дня в рамках SAMUM-1 и SAMUM-2, мы построили корреляционные зависимости между некоторыми микрофизическими параметрами и измеренными данными, позволяющие получить представление о качестве решения исследуемых нами задач многоволнового лидарного зондирования (см. рис. 43). Статистика в предлагаемом анализе включает все решения, которые найдены при обработке комбинация данных $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$ с использованием сферической модели частиц. Общепринято в публикуемой литературе, что существует корреляция между экспонентой Ангстрема (5) и эффективным радиусом. Общая площадь поверхности обычно коррелирует с коэффициентом ослабления, а общий объем с коэффициентом обратного рассеяния. Как видно из рис. 43, полученные результаты очень хорошо коррелированы. Коэффициент линейной корреляции между экспонентой Ангстрема и эффективным радиусом составляет 0.85, что является вполне высоким, учитывая высокий уровень погрешностей. Необычно высокая корреляция наблюдается между общей площадью поверхности и коэффициентом ослабления на 355 нм – 0.98. Корреляция общего объема и коэффициента обратного рассеяния не такая хорошая как в случае двух других микрофизических параметров и соответствующих измерений.

Последний факт может быть объяснен следующими обстоятельствами. Во-первых, алгоритм работает в диапазоне радиусов до 10 мкм. Это может повлечь потерю крупных частиц, и как следствие недооценку их общего объема в РАР. Во-вторых, в сложных случаях, таких, как аэрозольная смесь пыли и дыма, мы должны рассматривать результаты двух подмножеств решений независимо друг от друга.

Подводя итоги апробации алгоритма, использующего сферическую и сфероидную модели частиц, мы можем заключить, что он позволяет оценивать микрофизические свойства пыли и её смеси с другими регулярными частицами.

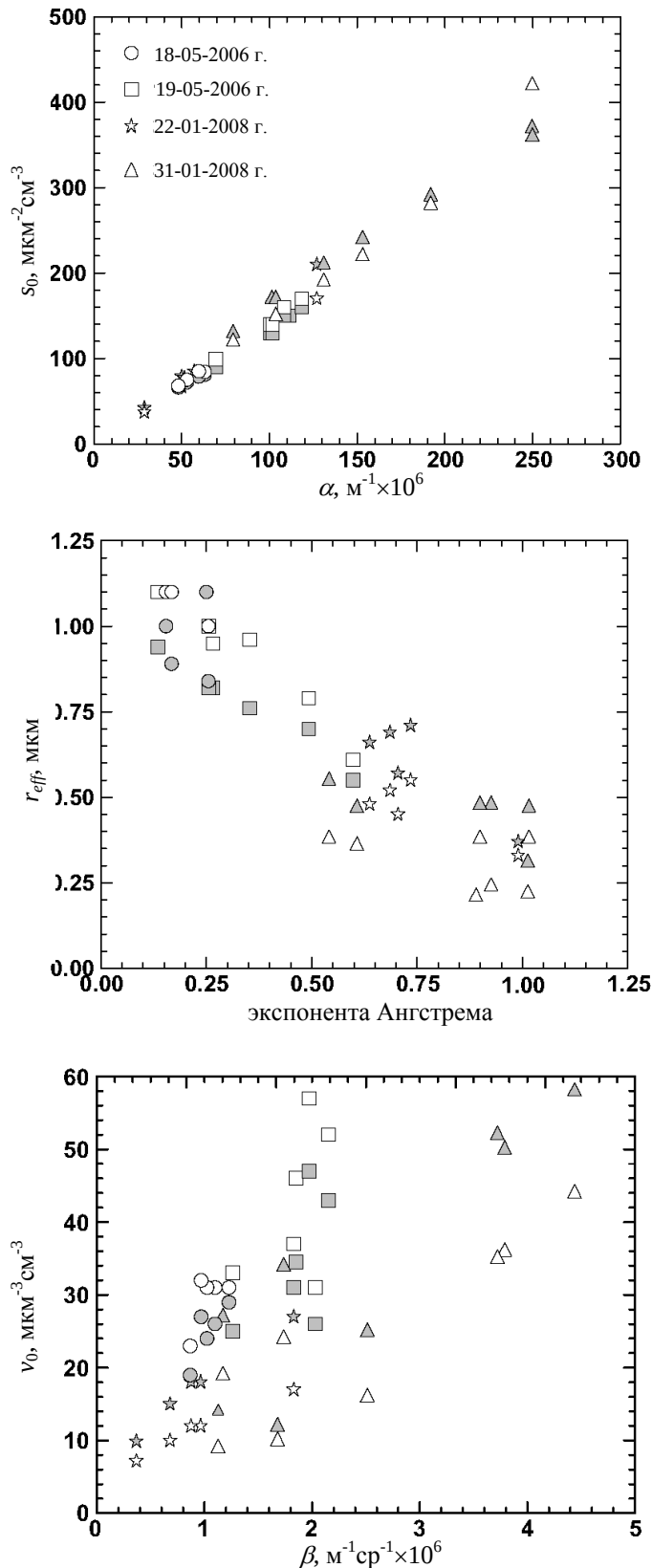


Рис. 43. Корреляция между восстановленными микрофизическими параметрами и измеренными данными. Пустой маркер означает, что решение получено по набору оптических данных $3\beta+2\alpha+1\delta$, залитый маркер – по набору $3\beta+2\alpha$

Наши исследования показывают, что такие микрофизические параметры, как эффективный размер, общие концентрация, площадь и объем подобных аэрозолей могут быть восстановлены с точностью, установленной при разработке алгоритма и численном моделировании (см. табл. 6). Главной проблемой является восстановление КПП, в особенности его мнимой части, которая демонстрирует сильную спектральную зависимость в ультрафиолетовом спектре.

Остается открытым вопрос, насколько полезна информация в виде деполяризации излучения в улучшении результатов восстановления параметров аэрозолей. Углубленный анализ экспериментальных данных показывает, что деполяризация излучения, измеряемая лидаром при зондировании минеральной пыли, представленной в основном крупными частицами, достигает 30 % и более, при этом отмечается сильное поглощение в ультрафиолетовом диапазоне. В то же время используемая нами сфероидная модель способна воспроизводить такой уровень деполяризации только при малых значениях мнимой части КПП, причем он

только при малых значениях мнимой части КПП, причем он

приходится на частицы радиусом не более 1 мкм. Это несоответствие может быть причиной неоднозначности некоторых полученных результатов. К ним относится расхождение в восстановлении КПП, если обрабатывать традиционный набор оптических данных $3\beta+2\alpha$ и набор $3\beta+2\alpha+1\delta$, дополненный деполяризацией. Обработка последнего имеет тенденцию к недооценке размеров и объема крупных нерегулярных частиц. Кроме того, подтверждение достоверности оценки ОДСФ также требует проведения дополнительных исследований и определения роли деполяризации в данной оценке. Моделирование указывает на существенное значение деполяризации в этом вопросе. Необходимо интенсифицировать усилия, связанные с лабораторными измерениями деполяризации излучения в сочетании с исследованиями морфологии (формы) индивидуальных частиц, которые позволили бы моделировать их оптические свойства [122, 111].

5.2. Эксперимент по измерению продуктов горения биомассы в Европе

При разработке двумерного регуляризирующего алгоритма мы отметили его ключевую особенность: в отличие от традиционного подхода он позволяет обрабатывать одновременно весь профиль оптических данных, измеряемых в результате лидарного зондирования с высоким разрешением по высоте. Такой подход обеспечивает ряд преимуществ по сравнению с традиционными лидарными методами. Чтобы продемонстрировать их, мы выполнили независимо обработку лидарных данных, полученных при измерениях 22-07-2004 г., нашим алгоритмом и методом, который до сих пор показывал наиболее надежные результаты [142,141], и сравнили полученные решения с данными ЛЗП. В этот день ЛЗП проводился с борта исследовательского самолета Falcon в рамках эксперимента ICARTT-ITOR [115]. 22-07-2004 г. над Западной Европой наблюдался протяженный аэрозольный шлейф, образованный продуктами горения биомассы и претерпевший старение, поэтому мы можем принять $\eta=0$, включить в расчеты только сферическую модель частиц и применить не только испытуемый здесь алгоритм, но и проверенный ранее подход [142,141].

Профиль наблюдаемого шлейфа над Западной Европой состоял из двух частей, каждый из которых происходил из одного и того же источника, находящегося в Канаде. Поэтому мы предполагаем, что оптические и микрофизические свойства частиц существенно не варьируются в этом шлейфе. Более того, он претерпел продолжительное старение при переносе в течение нескольких дней с момента возникновения в Канаде до момента проведения эксперимента в Европе, где проводились ЛЗП и лидарные измерения.

Лидарные измерения осуществлялись в Лейпциге, удаленном на несколько сотен километров от западного побережья Европы, над которым одновременно курсировал исследовательский самолет для сбора проб. Учитывая особенности шлейфа, расположившегося над Западной Европой, можно ожидать, что такие микрофизические параметры, как эффективный размер, КПП, альbedo однократного рассеяния (AOP) не менялись существенно между областью проведения самолетных измерений и лидарной станцией, удаленных друг от друга на сравнительно небольшое расстояние. Однако нельзя исключать, что общие концентрация, площадь поверхности и объём аэрозолей могут изменяться при переносе. Несмотря на имеющийся «разброс» измерительных инструментов в рассматриваемом ареале, мы считаем, что сравнение лидарных и самолетных данных является корректным, и оно позволит сделать вывод о возможностях апробируемой методики.

22-07-2004 г. оптические данные были получены с помощью многоволнового рамановского лидара MARTHA [88], установленного в главном здании Института Тропосферных Исследований (51.3° с.ш., 12.4° в.д.). Он используется для измерений, выполняемых в рамках EARLINET [36]. Лидар генерирует лазерные импульсы на 355, 532 и 1064 нм. По упруго рассеянному сигналу и сигналу, неупруго рассеянному на молекулах азота и воды, определяются коэффициенты обратного рассеяния на 355, 532 и 1064 нм и коэффициенты ослабления на 355 и 532 нм [23,29], т.е. набор $3\beta+2\alpha$. На их основе лидарное отношение на длинах волн 355 и 532 нм и параметр Ангстрема на паре длин волн 355/532 нм определяются автоматически. Относительная погрешность e_r^β измерения коэф-

коэффициентов обратного рассеяния распределена в пределах 5-15 %, погрешность коэффициентов ослабления e_r^α – 15-20%. Кроме того, MARTHA обеспечил измерениями деполяризации излучения частиц. Наряду с оптическими данными также был вычислен профиль относительной влажности по измерениям радиозонда, запущенного приблизительно в 40 км к северо-западу от Лейпцига в тот же день.

Для идентификации территориального источника происхождения аэрозольного шлейфа, наблюдаемого над Лейпцигом и исследованного самолетом, мы воспользовались результатами, которыми обеспечивает модель FLEXPART [129,128]. FLEXPART позволяет моделировать перенос на большие расстояния, осаждение и рассеивание воздушных загрязнений, выброшенных объёмными источниками, а также источниками, ограниченными контуром малого радиуса, вытянутыми вдоль какого-либо направления. Адвекция, конвекция и турбулентная диффузия воздушных масс рассчитывается на основе анализа траектории движения большого числа частиц под воздействием ветра и других факторов [128,53]. Модель FLEXPART оперировала данными Европейского Центра Среднесрочного Прогнозирования Погоды и Национального Центра Экологического Глобального Прогнозирования.

В нашем эксперименте модель использовалась для определения источника происхождения, траектории движения исследуемых воздушных масс на различных высотах, времени прибытия аэрозольного шлейфа к месту дислокации лидарной системы и области, где барражировал самолет. Полный анализ можно найти по ссылке <http://www.esrl.noaa.gov/csd/ICARTT/analysis/index.html>. Рис. 44 показывает слой, прибывший в Лейпциг на высоте 4-5 км с высоким содержанием угарного газа. В соответствии с картой, изображенной на этом рисунке, шлейф дыма происходит в результате пожаров, которые имели место на Аляске и в северо-западной Канаде приблизительно за 7-10 дней до эксперимента.

22-07-2004 г. исследовательский самолет Falcon барражировал над западным побережьем Западной Европы. Рис. 45 иллюстрирует траекторию его полета сплошными линиями, на которых символами обозначаются места, где образцы

проб указывали на наличие дыма, возникшего вследствие лесного пожара в Канаде [115]. Как видно из рис. 44 и 45, самолет осуществлял забор в одной из частей шлейфа дыма, переносимого в восточном направлении к лидарной площадке. По этой причине мы предполагаем, что лидар зондировал аналогичный аэрозольный слой, другими словами, происхождение шлейфа дыма, наблюдаемого лидаром и самолетом, является одним и тем же. Тем не менее, мы не можем ожидать полного соответствия микрофизических и оптических свойств, сравниваемых в данном эксперименте. К сожалению, самолет не был оборудован лидаром, поэтому нет возможности сопоставить поведение профиля коэффициента обратного рассеяния обоих методов.

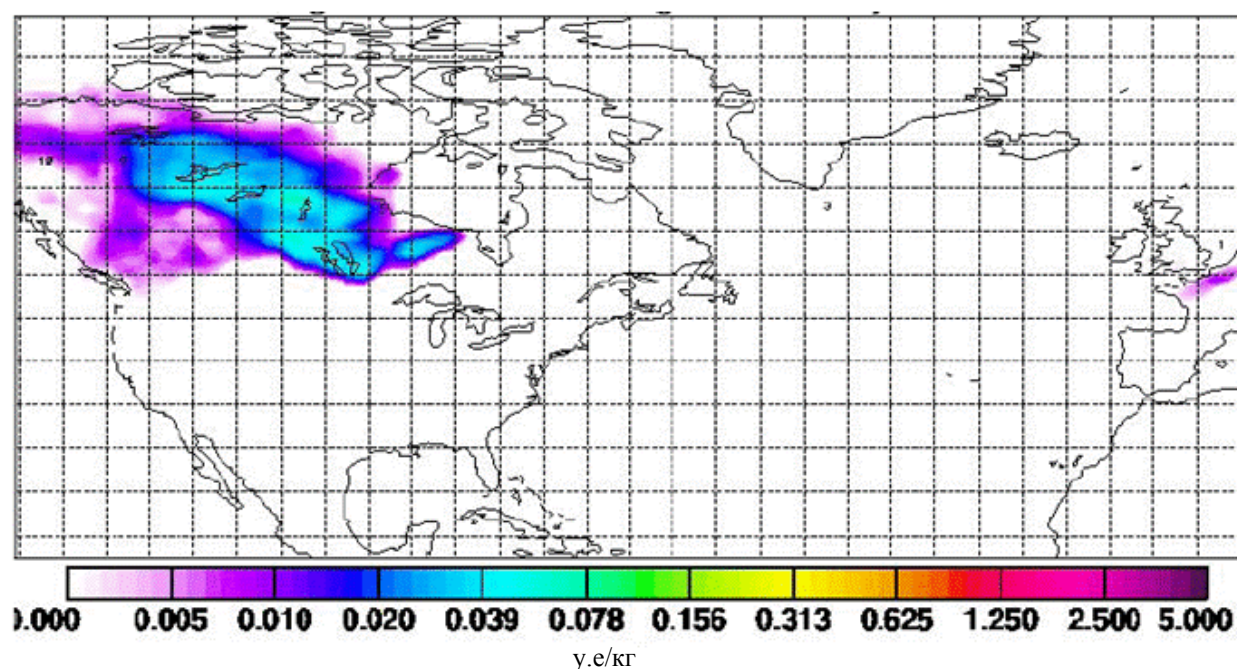


Рис. 44. Результаты расчетов модели FLEXPART, выполненных для эксперимента А. Стохлом (Норвежский Исследовательский Институт Атмосферы, <http://www.nilu.no>).

Учитывая особенности в условиях проведения сравнительного эксперимента, мы еще раз отметим, что профили эффективного радиуса, КПП и АОР, определяемые локальным и лидарным методами, скорее всего, будут лучше согласовываться, нежели профили общего объема, концентрации или площади поверхности.

Рис. 46 показывает профили обратного рассеяния, ослабления, деполяризации излучения и экспоненты Ангстрема, измеренные лидаром в шлейфе дыма, наблюдаемом 22-07-2004 г. Основная часть шлейфа приходилась на свободную

тропосферу (выше 2-х км), достигающую 9 км по высоте. Экспонента Ангстрема варьируется между 0.6 и 1.0, указывая на сравнительно крупные частицы. Для аэрозолей антропогенного загрязнения Северной Америки аналогичный показатель превышает 1.0 [102]. Профиль деполяризации излучения подтверждает, что частицы являются околосферическими. Её профиль колеблется между 1.5 и 3.0 %, что также характерно для «зрелого» смога из Северной Америки [103]. Отметим, что для подобных шлейфов также свойственна сравнительно низкая относительная влажность [103]. По данным радиозонда она составляла ниже 25 % в средней части шлейфа (3-7 км). Примечательно, что в нижней (на высоте до 2-х км) и верхней (на уровне 6-7 км) части профиля относительная влажность достигала вплоть до 75 % и 50 % соответственно. Из анализа профилей измеренных данных мы видим, что исследуемая система состоит, по крайней мере, из трех аэрозольных слоев и представляет собой достаточно сложную структуру.

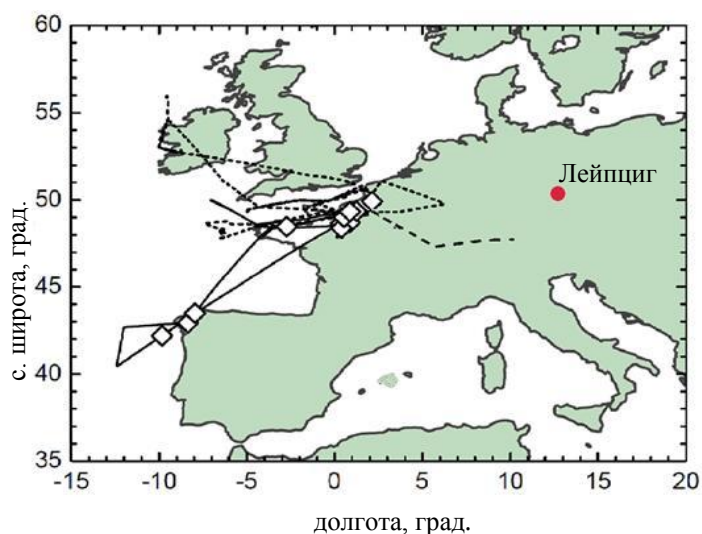


Рис. 45. Траектория полета самолет Falcon 22-07-2004 г. при проведении ЛЗП

Рис. 46 также показывает микрофизические профили, восстановленные с помощью двумерного регуляризирующего алгоритма и для сравнения – одномерным алгоритмом [141]. Напомним, что разница между двумя алгоритмами состоит в том, что первый в отличие от второго использует ограничение «гладкости» вдоль дистанции зон-

дирования. Это означает, что во втором случае регуляризация осуществляется последовательно на каждом из имеющихся высотном слое ($N_L=20$ раз в общей сложности) независимо от других высотных слоев. Такой подход является общепринятым для традиционных, одномерных, методов, требует больше времени для обработки данных и не позволяет учитывать корреляцию между высотными слоями, следующими друг за другом.

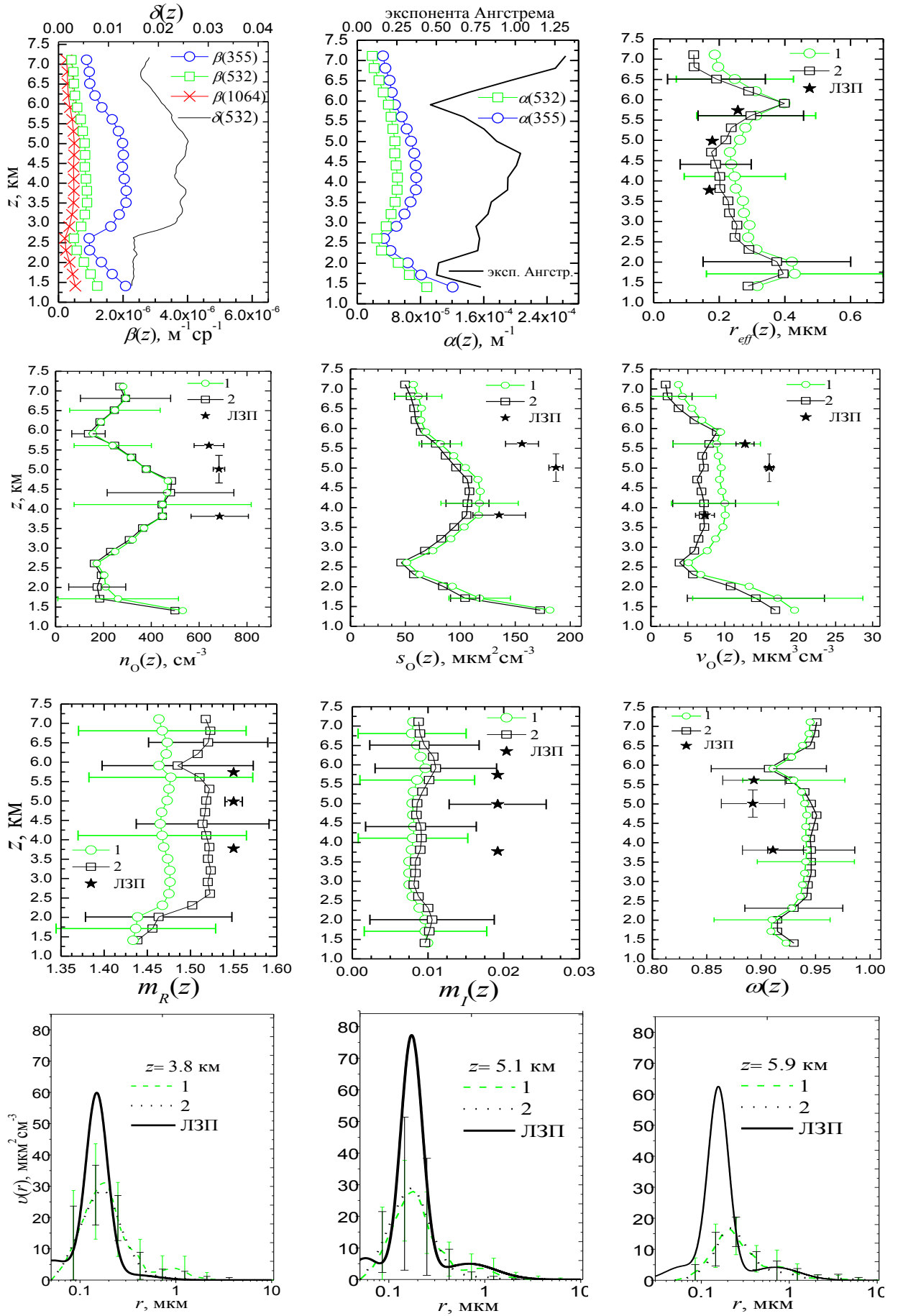


Рис. 46. Измерения, выполненные 22-07-2004 г. Сравнение результатов, полученных различными методами

Экспонента Ангстрема динамично снижается на 6 км, что может быть как артефактом в результате извлечения оптических коэффициентов из данных лидарного зондирования (см. параграф 1.2), так и реальным физическим явлением. Такое резкое её падение может вызвать скачок у микрофизических параметров на высоте около 6 км. Поэтому нельзя исключать, что на высоте 6 км микрофизические параметры имеют ошибку, большую, чем та, которую устанавливает соответствующая планка погрешности.

Если мы сравним профили микрофизических параметров, то увидим, что двумерный (2) и одномерный (1) алгоритмы сходятся к близким результатам. Однако в последнем случае их погрешность, и, как следствие, неопределенность, достигает больших значений. По нашему мнению, это связано с тем, что не используется корреляция между высотными слоями, которая автоматически предусмотрена в двумерном алгоритме. У двумерного алгоритма мы находим погрешность в пределах $\pm 50\%$ для всех параметров, кроме мнимой части КПП.

Необходимо также подчеркнуть, чтобы оптимизировать время расчетов, мы при обработке пространства решений одномерным алгоритмом использовали модифицированную процедуру усреднения, описанную в параграфе 3.4 и специально разработанную для двумерного алгоритма. Если следовать «классической» процедуре усреднения пространства решений каждого высотного слоя отдельно [142,141], наблюдается заметная осцилляция микрофизических параметров внутри аэрозольных слоев, хотя и в пределах погрешности [98]. Чтобы учесть корреляционную информацию при таком подходе, требуется колоссальное время для сравнения «вручную» градиента микрофизических параметров и его соотношения с градиентом оптических данных.

Среднее значение эффективного радиуса варьируется около 0.20-0.25 мкм в центре шлейфа. В нижней (до 2 км) и верхней (около 6 км) части профиля мы находим сильный рост размеров частиц. Подобное увеличение размеров частиц может быть вызвано сильным ростом относительной влажности, пиковые значения которой совпадают с высотами до 2 и на 6-7 км. Профили общей concentra-

ции, площади поверхности и объёма достигают максимального значения на 4-5 км.

Реальная и мнимая части КПП слабо меняются с высотой. Погрешность оценки одномерным алгоритмом реальной части составляет ± 0.10 , двумерным алгоритмом снова меньше – около ± 0.07 . Ошибка оценки мнимой части КПП обоими алгоритмами достигает 100%.

Среднее значение профиля АОР, восстановленное двумерным алгоритмом, равно 0.94 ± 0.05 , что немного больше по сравнению с результатом одномерного алгоритма. Как и в случае других параметров, меньшая погрешность АОР получена двумерным алгоритмом.

Рис. 46 показывает, что наилучшим образом согласованы профили, полученные лидарным и локальным методами, которые соответствуют эффективному размеру частиц. Причем результат двумерного алгоритма лучше согласован, чем результат одномерного алгоритма.

Три других профиля общей концентрации, площади поверхности и объёма, восстановленные лидарным методом, имеют тенденцию к недооценке данных, вытекающих из ЛЗП. К сожалению, самолет осуществлял отбор только на трех высотных слоях, расположенных относительно близко друг от друга: около 4, 5 и 6 км. В указанных слоях наблюдается высотная зависимость рассматриваемых параметров. Максимум у общего объёма и площади поверхности приходится на высоту около 5 км. Максимум, детектируемый лидаром, находится на несколько сотен метров ниже. Это соответствует результатам анализа траектории движения воздушных масс, которые указывают на нисходящий тренд в направлении Центральной Европы.

Рис. 46 показывает, что реальная часть КПП, измеренная по данным ЛЗП, более чем близка к «лидарным» результатам. Мнимая часть КПП по данным ЛЗП превосходит значения, восстановленные при решении задачи лидарного зондирования. В среднем двумерный алгоритм демонстрирует лучшую сходимость, чем одномерный алгоритм. Учитывая сложности, возникающие при определении КПП лидарным методом из-за недоопределенности задачи, и, как след-

ствие, высокой погрешности его оценки, мы не можем рассчитывать на лучшую сходимость с данными ЛЗП.

Рис. 46 показывает результаты ЛЗП АОР на длине волны 532 нм. Результаты на длинах волн 440, 550 и 600 нм представлены в [115]. Применение алгоритма ведет к большему ω , поскольку восстановленная им мнимая часть меньше, чем аналогичный параметр, определяемый ЛЗП. Однако невязка около 0.05 находится в пределах ошибки, которую мы ожидаем от алгоритма (см. табл. 7).

Рис. 46 также показывает примеры РАР, полученные различными подходами. Мы находим близкую форму РАР, полученных при ЛЗП и лидарным методом. Как видно, модальные значения радиусов, полученные тремя подходами на двух нижних высотных слоях, практически совпадают. В верхнем высотном слое алгоритм демонстрирует модальное значение радиуса, соответствующее большим размерам частиц. Максимум РАР, измеренный по данным ЛЗП, превосходит пиковое значение, восстановленное алгоритмом.

Различия между РАР, найденными двумя измерительными инструментами, может быть обусловлено несколькими причинами. Во-первых, имеет место ошибка алгоритма. Во-вторых, расстояние между измерительными инструментами составляет несколько сотен километров. Также необходимо отметить, что диапазоны размеров частиц, к которым чувствительны оба инструмента, различны. Как видно из рис. 46, ЛЗП способен детектировать очень малые частицы размером до 0.03 мкм. При решении задач многоволнового лидарного зондирования мы вынуждены ограничиваться областью для $r_{\min}$, установленной условиями (25). Этот вопрос подробно исследован в [140].

Для подведения итогов сравнительного анализа результатов измерений от 22-07-2004 г., выполненных локальным и дистанционным методами, мы свели восстановленные параметры аэрозолей на высоте около 4 км в табл. 11. Общая концентрация, оцененная одномерным и двумерным алгоритмами, на 35 % меньше уровня, полученного по данным ЛЗП. Разница в лидарных и локальных измерениях общей площади поверхности и объема частиц составляет 14 и 37 % соответственно при использовании одномерного алгоритма, и еще меньше при

использовании двумерного алгоритма – 22 и 2 % соответственно. Эффективный радиус, найденный двумерным алгоритмом, также лучше согласуется с результатами ЛЗП. Разница составляет 25 %, тогда как для одномерного алгоритма она достигает 55 %. Восстановление АОР обоими алгоритмами ведет к сопоставимому результату, который отличается от «локального» значения не более чем 0.05. В целом двумерный алгоритм демонстрирует лучшую сходимость с результатами ЛЗП. Мы отметили знаком «+» параметры в табл. 11, которые удовлетворяют этому выводу. Кроме того, параметры, восстановленные двумерным алгоритмом, характеризуются меньшей неопределенностью по сравнению с одномерным алгоритмом.

Аналогичные выводы следуют из сравнения результатов, соответствующих двум другим высотным слоям. Подчеркнем, что при построении и тестировании двумерного алгоритма в гл. 3 нами были предсказаны полученные результаты, что свидетельствует о корректности и строгости примененных подходов.

Таблица 11.

Сравнение параметров аэрозолей, полученных по данным ЛЗП и лидарных измерений от 22-07-2004 г. на высоте около 4 км

Параметр	ЛЗП	Одномерный алгоритм		Двумерный алгоритм		+/-
		Значение	Ошибка	Значение	Ошибка	
r_{eff} , мкм	0.16	0.25±0.16	55%	0.20±0.12	25%	+
n_0 , см ⁻³	686±120	447±382	35%	447±248	35%	
s_0 , мкм ² /см ⁻³	135±24	117±35	14%	106±19	22%	-
v_0 , мкм ² /см ⁻³	7.3±1.3	10.1±7.3	37%	7.1±4.5	2%	+
m_R	1.55±0.01	1.47±0.10	5%	1.52±0.07	2%	+
m_I	0.02±0.006	0.01±0.007	59%	0.01±0.007	53%	+
$\omega(532)$	0.90±0.03	0.94±0.04	4%	0.95±0.04	5%	-

5.3. Эксперимент по измерению урбанистического аэрозоля в Северной Америке и в Европе

Проведем экспериментальную проверку быстрого алгоритма. Чтобы подтвердить достоверность результатов, получаемых на его основе, и продемонстрировать новые возможности, мы используем следующую стратегию. Прежде

всего, мы обрабатываем с помощью быстрого алгоритма экспериментальные данные от 15-08-2006 г., измеренные в ходе летне-осенней кампании 2006 г. [143] многоволновым рамановским лидаром, установленным в ЦКП НАСА (38.99°с.ш., 76.84°з.д.). Этот лидар на основе Nd:YAG лазера с генератором третьей гармоники обеспечил измерениями $3\beta+2\alpha$. Они были обработаны традиционным, регуляризующим, методом [141]. Полученные результаты продемонстрировали согласованность с данными AERONETa. Детальный анализ восстановленных микрофизических параметров представлен в [143]. Сравнение результатов обработки экспериментальных данных от 15-08-2006 г. традиционным и быстрым алгоритмами позволит сделать вывод о потенциале последнего. В случае сходимости результатов мы вправе считать обоснованным его применение для обработки различных данных многоволнового лидарного зондирования. Такая возможность будет показана на примере обработки высотно-временных лидарных наблюдений, проведенных 20-05-2010 г. при исследовательском центре TUBITAK в окрестности Стамбула. Там действует многоволновой рамановский лидар, позволяющий получать оптические данные $3\beta+2\alpha+3\delta$.

Рис. 47а показывает профили $3\beta+2\alpha$, измеренные 15-08-2006 г. Коэффициенты обратного рассеяния имеют максимумы на высотах 1.25 км и 1.9 км. РАР в этот день было представлено главным образом частицами ярко выраженной моды [143]. Общий объем, эффективный радиус и реальная часть КПП, восстановленные регуляризующим и быстрым алгоритмами при обработке данных от 15-08-2006 г. хорошо согласуются друг с другом (см. рис. 47). Поскольку распределения по высоте коэффициентов обратного рассеяния и общего объема имеют близкую форму профилей, следует ожидать слабую зависимость размера частиц и КПП от высоты. Восстановленный эффективный размер, как видно из рис. 47в, составляет около 0.22 ± 0.06 мкм на всех высотах. Отметим, что его профиль, полученный БА, осциллирует меньше, чем профиль, который мы нашли традиционным методом, предполагая тем самым более стабильное исполнение. Реальная часть КПП слегка увеличивается с высотой от 1.37 ± 0.05 до 1.43 ± 0.05 , мнимая часть не превышает 0.005 на всех высотных слоях.

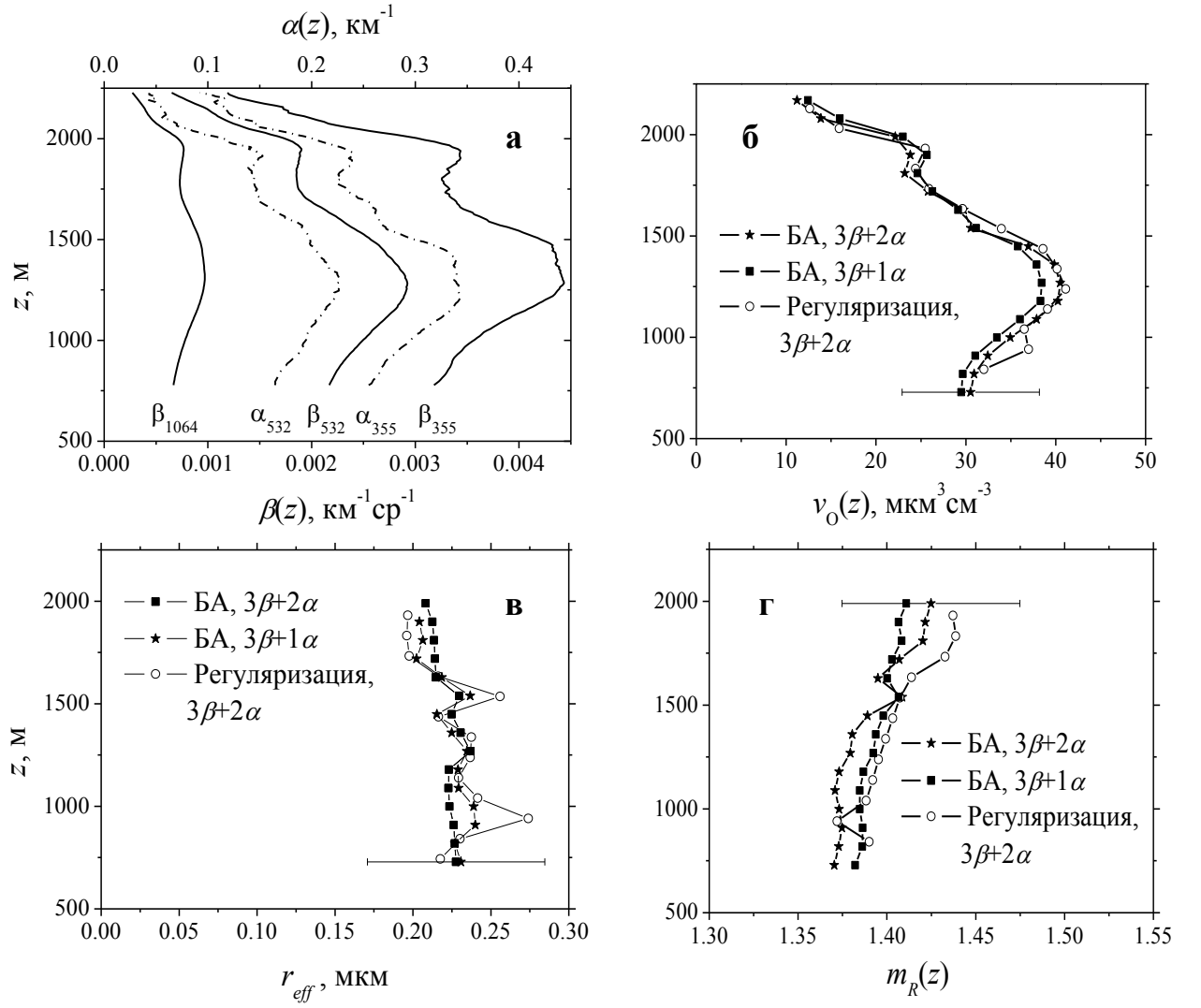


Рис. 47. Измерения, выполненные 15-08-2006 г. Сравнение результатов, полученных регуляризующим и быстрым алгоритмами.

Как мы обсуждали в предыдущей главе, набор оптических данных может быть уменьшен, когда оцениваются только интегральные параметры частиц. Чтобы проверить это, мы обработали БА набор оптических данных $3\beta+1\alpha$, в котором нет коэффициента ослабления на 532 нм. Соответствующие результаты также показаны на рис. 47. Обработка как полного набора $3\beta+2\alpha$, так и уменьшенного $3\beta+1\alpha$ ведет к близким решениям задачи лидарного зондирования, подтверждая результаты численного моделирования.

Проведенное сравнение традиционного и быстрого алгоритмов демонстрирует, что БА может обеспечивать достоверными оценками параметров частиц. Одновременно высокая скорость расчетов, основанных на ЛО, делает БА предпочтительным для определения поля микрофизических параметров по пространственно-временным данным лидарного зонирования.

Чтобы проверить возможность ЛО поля микрофизических параметров частиц мы обработали БА данные, измеренные 20-05-2010 г. в окрестности Стамбула. Зондирование проводилось в период, когда слабый слой пепла, образованный вследствие извержения вулкана Ияфьалайокул в Исландии, достигал Турцию. Эволюция деполяризации излучения на 355 нм в ночное время 20-21 мая показана на рис. 48. Сильно деполяризованный вулканический слой с максимальным значением деполяризации около 20 % появился в 22:00 и наблюдался в течение примерно 4 ч на высоте 2-3 км. Её уровень не достигает 40 %, измеренных над Северной Европой [26], скорее всего, по той причине, что пепел может смешиваться с аэрозолями локального происхождения. Одновременно ниже 2-х км деполяризация не превышала 5 %. Учитывая данное обстоятельство, мы можем принять $\eta=0$ и использовать в расчетах сферическую модель частиц.

Эволюция в течение того же времени коэффициента ослабления на 355 нм показана на рис. 49а. Сравнивая рис. 48 и 49а, мы приходим к заключению, что оптическая толщина слоя пепла достаточно мала (менее 0.05). Экспонента Ангстрема, вычисленная по коэффициентам ослабления на 355 и 532 нм, составляет около 1.8 на высоте 0.8-2 км, свидетельствуя, что частицы имеют относительно малые размеры.

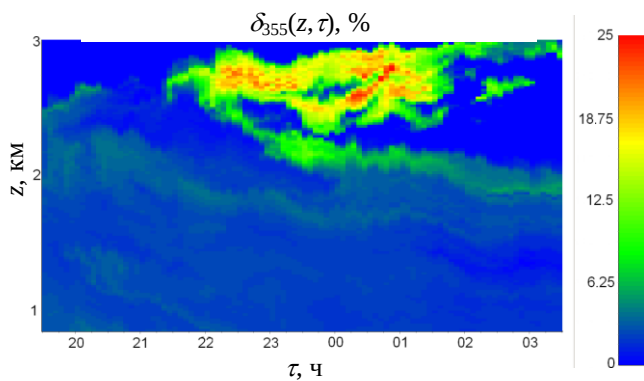


Рис. 48. Деполяризация излучения частиц, измеренная 20-05-2010 г. в окрестности Стамбула

Для оценки поля микрофизических параметров частиц мы использовали набор $3\beta+1\alpha$, т.к. погрешность измерения коэффициента ослабления на 532 нм была слишком высокой для заданного временного разрешения. Это позволяет апробировать БА в условиях,

когда известен только минимальный набор измерений. Рис. 49б показывает поле общего объёма частиц, которое напоминает пространственно-временное поведение коэффициента ослабления (см. рис. 49а). Для наглядности их наиболее интенсивные области ограничены одинаковым контуром, чтобы проиллюстриро-

вать наблюдаемое совпадение. Такое совпадение двух пространственно-временных распределений свидетельствует о том, что в соответствующей области эффективный размер и КПП существенно не меняются.

Действительно, на высотах от 0.8 до 2 км эффективный размер оценивается около 0.22 мкм и остается неизменным в течение ночи (см. рис. 49в). Мы видим его некоторое увеличение в окрестности слоя пепла. Однако напомним, что в этих расчетах мы приняли $\eta=0$, поэтому сфероидная модель не используется. В то же время частицы пепла являются нерегулярными, поэтому на высотах более 2-х км мы ожидаем большую погрешность в наших оценках.

Реальная часть КПП, показанная на рис. 49г, варьируется в пределах 1.39-1.45. Область, очерченная контуром, характеризуется значением $m_R=1.4$, указывая на высокое содержание воды в аэрозолях. На низких высотах наблюдается её увеличение до 1.45 после полуночи. Выше 2 км реальная часть, скорее всего, недооценена, как это следует из результатов применения сферической модели в случае, когда частицы являются нерегулярными. Мнимая часть КПП оценена при 0.006 ± 0.003 . Её увеличение до 0.01 наблюдалось в слое пепла, однако для более точных оценок необходимо привлечение модели, позволяющей описывать свойства вулканических частиц.

Подводя итоги результатов обработки данных от 20-05-2010 г., мы видим разумные оценки БА и приходим к заключению, что лежащий в его основе метод ЛО обеспечивает нахождение поля микрофизических параметров аэрозолей и их динамику по пространственно-временным измерениям оптических данных. Успешное применение быстрого алгоритма линейной оценки поля параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, полученным в эксперименте, демонстрирует его мощный потенциал и позволяет реализовать требование глобальности мониторинга аэрозолей.

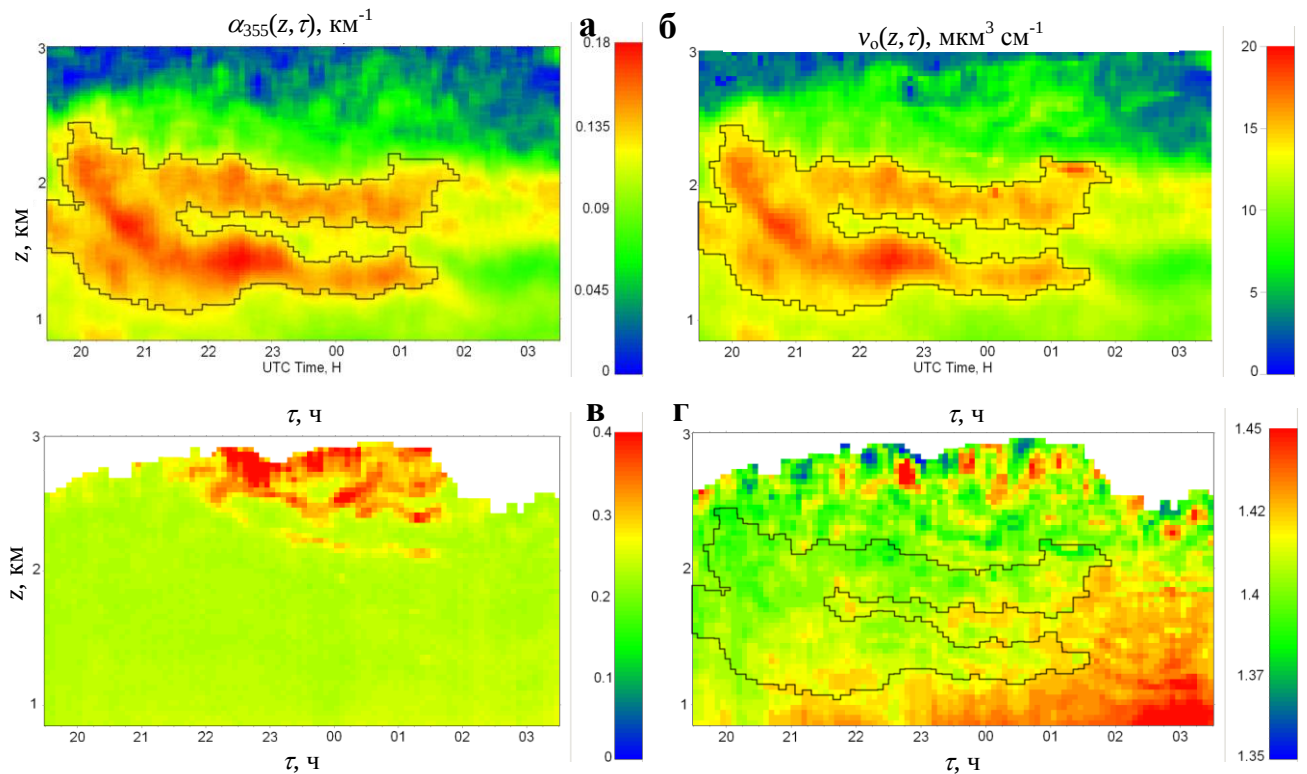


Рис. 49. Восстановление на основе набора оптических данных $3\beta+1\alpha$ от 20-05-2010 г. поля общего объёма, эффективного размера, реальной части КПП аэрозолей с помощью быстрого алгоритма.

5.4. Деятельность по разработке, внедрению и применению методики

На основе всей проделанной работы, связанной с разработкой, внедрением и всесторонней проверкой методики, описываемой в настоящей работе, можно сделать ключевое замечание. Проведенные до сих пор масштабные сравнительные эксперименты подтверждают достоверность результатов, полученных при её применении [142,98,139,104]. Она получила широкое распространение при использовании в многочисленных институтах и научных организациях для решения задач многоволнового лидарного зондирования [112,57,144,145], которые связаны не только с мониторингом параметров атмосферных аэрозолей, но и с изучением их влияния на радиационный баланс земли, с исследованиями физико-химических процессов, протекающих в атмосфере, с определением источников загрязнения [78,109,143]. Это способствует дальнейшему накоплению практических результатов и признанию предложенных идей и методов в научном сообществе.

Внедрение методики обеспечивает получение результатов, которые превосходят существующие аналоги по точности, устойчивости и скорости расче-

тов. Все это стало возможным благодаря совместным усилиям научного коллектива, основанного под руководством д. ф-м. наук И.А. Веселовского на базе ЦФП ИОФ РАН. Коллектив объединяет ученых, аспирантов, инженеров, занятых в различных направлениях деятельности от проектирования и изготовления современных образцов лидарной техники [4,6], разработки программно-математического обеспечения [70,12] до её применения при проведении научных экспериментов и мониторинге окружающей среды [14,20] с последующей обработкой измеряемых данных и их физической интерпретацией [78,112,57].

Наличие такой полной «технологической» цепочки создает необходимые условия для разработки изложенных в диссертации научных методов, подходов и алгоритмов, как неотъемлемой части любой методики по решению сложных задач, и реализации на их основе автоматизированных программных комплексов. Это позволяет тиражировать разработанное таким образом программно-математическое обеспечение с учетом технических характеристик систем дистанционного зондирования потенциального потребителя. Программные комплексы обеспечивают автоматизированную обработку большого объема лидарных данных в реальном времени, позволяют моделировать различные факторы, влияющие на оптические свойства аэрозолей и точность восстановления их микрофизических параметров. Возможны экспертный режим работы, допускающий углубленный анализ пространства решений, и оптимизированный режим, служащий для быстрой обработки большого массива измерений. В результате данное направление также концентрирует значительные интеллектуальные ресурсы. В настоящее время в разработке, внедрении, тестировании и реализации методики задействованы М. Коренский, Э. Чемякин, А. Романов, А. Суворина и др.

Перечисленные выше доводы свидетельствуют о создании нового уникального направления деятельности, в рамках которого сформирована научная школа. Молодые ученые и аспиранты, занятые в этой работе, участвуют в различных международных проектах, тем самым подчеркивая актуальность и востребованность проводимых ими исследований [20,70,38,81]. Их деятельность

способствует становлению научной школы, динамичному развитию лидарной техники и оперативному реагированию на современные вызовы.

5.5. Выводы к пятой главе

Выполнена апробация методики, основанная на применении разработанных алгоритмов восстановления параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, приобретенных в рамках крупных экспериментов. Экспериментальные данные получены в разнообразных условиях, которые обеспечили наблюдение «чистой» минеральной пыли, смеси пыли и продуктов горения биомассы, включают измерения сложных профилей, а также профилей, распределенных во времени. Обработка имеющихся экспериментальных данных позволила провести всестороннюю проверку методики.

Сделаны оценки различных параметров аэрозолей, представленных нерегулярными частицами (минеральной пылью), по лидарным измерениям $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, выполненным в ходе эксперимента SAMUM-1. Проведено сравнение полученных результатов с данными солнечного радиометра и локального забора проб. Продемонстрирована сходимость параметров аэрозолей, определяемых лидарным, пассивным и локальным методами. Оценки получены с точностью, установленной при моделировании. Обработка набора $3\beta+2\alpha+1\delta$ ведет к оценке реальной части КПП, которая лучше согласуется с данными ЛЗП. Мнимая часть КПП восстановлена в интервале, который установлен ЛЗП в диапазоне длин волн от 355 до 1064 нм.

Сделаны оценки различных параметров сложных аэрозольных смесей из нерегулярных (минеральной пыли) и сферических (продуктов горения биомассы) частиц по лидарным измерениям $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$, выполненным в ходе эксперимента SAMUM-2. Проведено сравнение полученных результатов с данными солнечного радиометра и локального забора проб. Как и в случае бесприимесной пыли продемонстрирована сходимость результатов лидарного, пассивного и локального методов. Однако при восстановлении КПП лидарным методом

по измерениям $3\beta+2\alpha+1\delta$ и $3\beta+2\alpha$ обнаружена большая неопределенность, чем ожидалось при моделировании.

Исследованы причины большей неопределенности в оценке КПП сложных аэрозольных смесей. Установлено, что если лидарные измерения деполяризации излучения достигают 30 % при высоких значениях мнимой части КПП в ультрафиолетовом спектре, то сфероидная модель воспроизводит такой уровень деполяризации лишь при малых значениях мнимой части КПП. Несоответствие экспериментальных и моделируемых данных объясняет негативный эффект. По этой же причине мы не обнаружили явного улучшения в оценке ОДСФ при добавлении деполяризации излучения к традиционному набору лидарных измерений $3\beta+2\alpha$. Необходимы дополнительные исследования, связанные с лабораторными измерениями деполяризации излучения и морфологии (формы) индивидуальных частиц, которые позволили бы моделировать их оптические свойства, адекватные экспериментальным данным.

Применение сферической модели для оценки параметров нерегулярных частиц по данным лидарных измерений в экспериментах SAMUM-1 и SAMUM-2 ведет к разумным оценкам эффективного размера и концентрации аэрозолей, однако при этом возникает недооценка реальной части КПП и переоценка общего объема.

Сделаны оценки высотного распределения микрофизических параметров аэрозолей с большим разрешением по трассе зондирования путем обработки сложных профилей оптических данных $3\beta+2\alpha$, измеренных 22-07-2004 г. в ИТИ, двумерным регуляризирующим алгоритмом. Проведено сравнение полученных результатов с результатами обработки тех же измерений $3\beta+2\alpha$ одномерным алгоритмом, а также с данными ЛЗП, выполненных в ходе эксперимента ICARTT-ITOR. Продемонстрирована сходимость микрофизических параметров аэрозолей, определяемых двумерным алгоритмом и локальными измерениями с борта самолета. Получено экспериментальное подтверждение выводов, сделанных при разработке и тестировании двумерного регуляризирующего алгоритма: он превосходит по точности и устойчивости одномерный регуляризирующий алгоритм.

Выполнена обработка лидарных данных $3\beta+2\alpha$, измеренных в ходе летне-осенней кампании 2006 г. в ЦКП НАСА, быстрым алгоритмом, основанным на применении метода, альтернативного регуляризации. Сравнение восстановленных микрофизических параметров аэрозолей с результатами обработки тех же оптических данных традиционным, регуляризирующим, алгоритмом демонстрирует сходимость обоих подходов в оценке интегральных параметров аэрозолей.

Показано, что уменьшение традиционного набора оптических данных $3\beta+2\alpha$ является допустимым для восстановления интегральных параметров аэрозолей. Сравнение результатов решения задачи многоволнового лидарного зондирования с использованием набора $3\beta+2\alpha$ и $3\beta+1\alpha$ демонстрирует, что исключение коэффициента ослабления на 532 нм существенно не искажают интегральные оценки.

Высокая скорость расчетов, основанных на использовании метода ЛО, обеспечивает анализ большого объема данных лидарного зондирования. В результате применения быстрого алгоритма обработки временного ряда данных лидарного зондирования, выполненного 20-05-2010 г. в окрестности Стамбула, получено поле микрофизических параметров аэрозолей, описывающее пространственно-временное поведение частиц и их динамику. Успешное применение быстрого алгоритма линейной оценки поля параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, полученным в эксперименте, демонстрирует его мощный потенциал и позволяет реализовать требование глобальности мониторинга аэрозолей.

Создано новое направление деятельности по разработке, внедрению, тестированию и реализации методики решения задач многоволнового лидарного зондирования, в рамках которого сформирована научная школа. Её деятельность способствует динамичному развитию лидарной техники и оперативному реагированию на современные вызовы.

Заключение

1. Построена математическая модель для задач многоволнового лидарного зондирования аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов. Она связывает оптические свойства частиц, такие как коэффициенты ослабления и обратного рассеяния, поляризованного параллельно и перпендикулярно падающему излучению, с их распределением по размеру интегральным преобразованием, ядром которого служат соответствующие сечения ослабления и обратного рассеяния.

2. В рамках построенной математической модели исследованы прямая и обратная задачи. Адекватность используемой математической модели подтверждена сходимостью результатов решения прямой задачи и лидарных измерений оптических свойств аэрозолей нерегулярной формы. Одномерная математическая модель обобщена на двумерный случай, в котором учитывается распределение аэрозолей как по размеру, так и по дистанции зондирования.

3. Разработан одномерный регуляризирующий алгоритм решения обратной задачи по восстановлению распределения по размерам аэрозолей, представляющих собой смесь частиц сферической и нерегулярной формы, из данных многоволнового лидарного зондирования, включающих, наряду с коэффициентами обратного рассеяния и ослабления, деполяризацию излучения. Одномерная регуляризация обобщена на двумерный случай, при этом двумерный регуляризирующий алгоритм восстановления профиля параметров аэрозолей позволяет дополнительно повысить устойчивость и точность решения в результате его стабилизации в двух направлениях одновременно: по размеру частиц r и дистанции зондирования z .

4. Достигнуто существенное повышение скорости обработки данных лидарного зондирования в результате разработки алгоритма, альтернативного регуляризации, в котором осуществляется линейная оценка непосредственно интегральных параметров аэрозолей путем представления неизвестного распределения аэрозолей по размерам в ряд по ядрам интегрального уравнения. Разработанный быстрый алгоритм обеспечивает нахождение поля микрофизических па-

раметров аэрозолей, описывающего пространственно-временное поведение частиц и их динамику.

5. Исследовано влияние показателя преломления, зависящего от длины волны падающего излучения, на результаты решения задачи многоволнового лидарного зондирования. Разработан подход с учетом соответствующей коррекции решения рассматриваемых задач, основанный на использовании априорной информации о спектральном поведении показателя преломления исследуемых аэрозолей.

6. Исследована возможность упрощения лидарной системы за счет сокращения используемых каналов. Показано, что быстрый алгоритм линейной оценки интегральных параметров аэрозолей может быть применен, если обычный набор измеряемых оптических данных уменьшить до трех коэффициентов обратного рассеяния и одного коэффициента ослабления.

7. С помощью разработанных алгоритмов получены результаты обработки данных лидарного зондирования различных типов аэрозолей, измеренных в ходе экспедиций в Северной Африке, З. Европе, С. Америке. Проведенные эксперименты были связаны с измерениями минеральной пыли, характеризующимися высокой деполяризацией излучения вследствие нерегулярной формы частиц, продуктов горения биомассы, состоящих из поглощающих аэрозолей, и аэрозолей антропогенного происхождения с преобладающим содержанием малых частиц. Достоверность полученных результатов подтверждается их сходимостью с результатами локального забора проб и результатами, полученными при измерениях солнечным радиометром.

8. На основе разработанных алгоритмов создан программный комплекс по мониторингу параметров аэрозолей в результате обработки данных многоволнового лидарного зондирования. Комплекс находится на вооружении в крупнейших специализированных научно-исследовательских организациях, таких как ЦФП ИОФАН, ИТИ, НАСА и др. Разработка, внедрение, тестирование и применение ПМО является новым уникальным направлением деятельности, в рамках

которой сформирована научная школа, способствующая динамичному развитию лидарной техники и оперативному реагированию на современные вызовы.

Библиографический список используемой литературы

1. Применение регуляризирующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных в условиях отсутствия информации об ошибке измерения. / В.И. Алехнович, М.Ю. Коренский, С.Ю. Тюменцев, А.В. Колготин. // Измерительная техника. – 2005. – № 10. – С. 8–14.
2. Бахвалов Н.С. Численные методы. – М.: Наука, 1973. – 631 с.
3. Борн М., Вольф Э. Основы оптики. – М.: Наука, 1973. – 719 с.
4. Веселовский И.А. Многоволновая и рамановская дистанционная лазерная диагностика аэрозольных и газовых составляющих атмосферы: Диссертация на соискание степени д.ф-м. н. – М, 2005. – 273 с.
5. Виноградов А.М. Конспект лекций по линейной алгебре. – М: МГТУ им. Баумана, 1992. – 250 с.
6. Волков Н.Н. Многоволновая лидарная система для определения физических параметров тропосферного аэрозоля: методика расчёта параметров и анализа данных: Автореферат диссертации кандидата технических наук. – М., 2013. – 24 с.
7. Захаров В.М., Костко О.К., Хмелевцов С.С. Лидары и исследование климата. – Ленинград: Гидрометиздат, 1990. – 180 с.
8. Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. – Ленинград: Гидрометиздат, 1983. – 166 с.
9. Лазерное зондирование промышленных аэрозолей/ В.Е. Зуев, Б.В. Кауль, И.В. Самохвалов и др. – Новосибирск: Наука, 1986. – 186 с.
10. Ивлев Л.С., Андреев С.Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. – Ленинград: ЛГУ, 1986. – 125 с.
11. Оптико-электронные системы экологического мониторинга природной среды/ В.И. Козинцев, В.М. Орлов, М.Л. Белов и др. – М.: МГТУ им. Баумана, 2002. – 528 с.

12. Колготин А.В. Математическое моделирование процесса восстановления параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования: Диссертация на соискание степени к.т. н. – М, 2003. – 150 с.
13. Специальный принцип отбора решений при использовании регуляризующего алгоритма Тихонова для обработки многоволновых лидарных данных. / А.В. Колготин, В.И. Алехнович, М.Ю. Коренский, К.Н. Камша, // Измерительная техника. – 2005. – №10. – С. 14–19.
14. Коренский М.Ю. Дистанционное лазерное определение параметров атмосферного аэрозоля и облаков с использованием методов многоволнового зондирования и явлений многократного рассеяния излучения: Диссертация на соискание степени кандидата технических наук. – М, 2007. – 147 с.
15. Краснов М.Л. Интегральные уравнения. – М.: Наука, 1975. – 304 с.
16. Креков Г.М., Кавкьянов С.И., Крекова М.М. Интерпритация сигналов оптического зондирования атмосферы. – Новосибирск: Наука, 1987. – 184 с.
17. Межерис С. Лазерное дистанционное зондирование. – М.: Мир, 1987. – 550 с.
18. Тихонов А.Н., Арсенин В.Я. Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1974. – 224 с.
19. Фихтенгольц Г.Н. Курс дифференциального и интегрального исчисления. – М.: Наука, 1966. – 2064 с.
20. Two years operation of multiwavelength aerosol lidar in turkey/ K. R. Allakhverdiev, M. F. Huseyinoglu, Z. Yu. Salaeva, A. Secgin, I. Veselovskii, M. Korenskii, N. Volkov. –ILRC 26. – Porto Heli (Greece), June 2012. – P. 167-170.
21. Scanning 6-wavelength 11-channel aerosol lidar/ D. Althausen, D. Müller, A. Ansmann, U.Wandinger, et al.// J. Atmos. and Oceanic Technol. – 2000. – №17. – P. 1469 – 1482.
22. Objective algorithms for the aerosol problem/ U. Amato, M. F. Carfora, V. Cuomo, and C. Serio//Appl. Opt. – 1995. – №34. – P. 5442–5452.

23. A. Ansmann and D. Müller. Lidar and atmospheric aerosol particles in “Lidar. Range-Resolved Optical Remote Sensing of the Atmosphere”. – New York: Springer, 2005. – pp. 105-141.
24. Ansmann A., Riebesell M., Wandinger U. Combined Raman elastic-backscatter lidar for vertical profiling of moisture, aerosols extinction, backscatter, and lidar ratio// Appl. Phys. – 1992.–№ 55. – P.18-28.
25. Saharan Mineral Dust Experiments SAMUM-1 and SAMUM-2: What can be learned from these dust closure field campaigns?/A. Ansmann, A. Petzold, K. Kandler, I. Tegen, M. Wendisch, D. Müller, B. Weinzierl, T. Müller, and J. Heintzenberg//Tellus. – 2011. – № B 63. – P. 403-429.
26. The 16 April 2010 major volcanic ash plume over central Europe: EARLINET lidar and AERONET photometer observations at Leipzig and Munich, Germany/ A. Ansmann, M. Tesche, S. Groß, V. Freudenthaler, P. Seifert, A. Hiebsch, J. Schmidt, U. Wandinger, I. Mattis, D. Müller, and M. Wiegner//Geophys. Res. Lett. – 2010. – №37. – L13810.
27. European pollution outbreaks during ACE 2: lofted aerosol plumes observed with Raman lidar at the Portuguese coast/ A. Ansmann, F. Wagner, D. Althausen, D. Müller, A. Herber, and U. Wandinger//J. Geophys. Res. – 2001. – №106. –P. 20725–20733.
28. European pollution outbreaks during ACE 2: optical particle properties inferred from multiwavelength lidar and star/Sun photometry/ Ansmann A., F. Wagner, D. Müller, D. Althausen, A. Herber, W. v. Hoyningen-Huene, and U. Wandinger//J. Geophys. Res. – 2002. – №107. – P. 4259.
29. Independent measurement of extinction and backscatter profiles in cirrus clouds by using a combined Raman elastic-backscatter lidar/ A. Ansmann, U. Wandinger, M. Riebesell, C. Weitkamp, and W. Michaelis//Appl. Opt. – 1992. –№31. –P. 7113–7131.
30. A. Ben-David, B. M. Herman, and J. Reagan. Inverse problem and the pseudoempirical orthogonal function method of solution. 2: Use//Appl. Opt. – 1988. – №27. – P. 1243–1254.

31. Böckmann C. Hybrid regularization method for ill-posed inversion of multiwavelength lidar data in the retrieval of aerosol size distributions.// *Appl. Opt.* – 2001. – №40. – P. 1329 – 1342,
32. Microphysical aerosol parameters from multiwavelength lidar/C. Böckmann, I. Miranova, D. Müller, L. Scheidenbach, and R. Nessler// *Journal of Optical Society of America.* – 2005. –№ 22. – P. 518–528.
33. Bohren F. B. and Huffman D. R. Absorption and scattering of light by small particles. New York: John Wiley, 1983. – 496 c.
34. Bohren, C. F., and S. B. Singham. Backscattering by nonspherical particles—a review of methods and suggested new approaches// *J. Geophys. Res.* – 1991. – №96. – P. 5269–5277.
35. Light absorption by primary particle emissions from a lignite burning plant/ T. C. Bond, M. Bussemer, B. Wehner, S. Keller, R. J. Charlson, and J. Heintzenberg//*Environ. Sci. Technol.* – 1999. – №33. – P. 3887–3891.
36. EARLINET: A European Aerosol Research Lidar Network to Establish an Aerosol Climatology/ J. Bösenberg, V. Matthias, A. Amodeo, V. Amoiridi, A. et. al. – Max Planck Institute for Meteorology: Tech. Rep., 2003. – 348 P.
37. Chaikovskii A.P., and Shcherbakov V.N. Linear estimate of the parameters of the microstructure of an aerosol from spectral measurements of the characteristics of the scattered radiation. // *Journal of Applied Spectroscopy.* – 1985. – №42 (5). – DOI: 10.1007/BF00661408. – P. 564-568.
38. Automated, unsupervised inversion of multiwavelength raman lidar data: statistical analysis of microphysical parameters/ Eduard Chemyakin, Alexei Kolgotin, Anton Romanov, Detlef Müller. –ILRC 26. – Porto Heli (Greece), June 2012. – P. 265-267.
39. E. Chemyakin, A. Kolgotin, D. Müller. Analytical error analysis scheme to be used in the inversion of multiwavelength Raman lidar data: first results for microphysical parameters. –ILRC 25. – St.-Petersburg, July 2010. – P. 94-97.

40. Donovan D. P. and Carswell A. I. Principal component analysis applied to multiwavelength lidar aerosol backscatter and extinction measurements// *Appl. Opt.* – 1997. – № 36. – P. 9406-9424.
41. Draine, B. T., and J. P. Flatau. Discrete-dipole approximation for scattering calculations//*J. Opt. Soc. Am. A Opt. Image Sci. Vis.*. – 1994. – №11. – P. 1491-1499.
42. Non-spherical aerosol retrieval method employing light scattering by spheroids/ O. Dubovik, B. N. Holben, T. Lapyonok, A. Sinyuk, M. I. Mishchenko, P. Yang, and I. Slutsker//*Geophys. Res. Lett.* – 2002a. – №29(10). – P. 1415
43. Variability of absorption and optical properties of key aerosol types observed in worldwide locations/ O. Dubovik, B. Holben, T. F. Eck, A. Smirnov, Y. J. Kaufman, M. D. King, D. Tanré, and I. Slutsker // *J. Atmos. Sci.* – 2002b. – №59. – P. 590–608.
44. O. Dubovik, and M. D. King. A flexible inversion algorithm for retrieval of aerosol optical properties from Sun and sky radiance measurements// *J. Geophys. Res.* – 2000. – №105. – P. 20 673-20 696.
45. Dubovik, O., et al. Application of spheroid models to account for aerosol particle nonsphericity in remote sensing of desert dust. // *Journal of Geophysical Research.* – 2006. – №111. – D11208. – doi:10.1029/2005JD006619.
46. Accuracy assessments of aerosol optical properties retrieved from AERONET Sun and sky radiance measurements/ O. Dubovik, A. Smirnov, B. N. Holben, M. D. King, Y. J. Kaufman, T. F. Eck, and I. Slutsker//*J. Geophys. Res.* – 2000. – №105. – P. 9791–9806.
47. Columnar aerosol optical properties at AERONET sites in central eastern Asia and aerosol transport to the tropical midPacific/ Eck, T. F., et al. // *J. Geophys. Res.* – 2005. – № 110. – P. 6202.
48. Airborne high spectral resolution lidar for measuring aerosol extinction and backscatter coefficients/ M. Esselborn, M. Wirth, A. Fix, M. Tesche, and G. Ehret//*Applied Optics.* – 2008. – №47(346). – P. 346-358.

49. Saharan dust and biomass burning aerosol characterization: airborne high spectral resolution lidar observations over the Cape Verde Islands during SAMUM 2008/ M. Esselborn, M. Wirth, A. Fix, P. Mahnke, and G. Ehret. – 24th International Laser Radar Conference (ILRC). – Boulder (USA), 23-27 June, 2008. – P. 490-493.
50. Spatial distribution and optical properties of Saharan dust observed by airborne high spectral resolution lidar during SAMUM 2006/ M. Esselborn, M. Wirth, A. Fix, B. Weinzierl, K. Rasp, M. Tesche, A. Petzold, and G. Ehret// *Tellus*. – 2009. – № B 61. – P. 131-143.
51. Ferrare R. A., Melfi S. H., Whiteman D. N. Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering, 2. Derivation of aerosol real refractive index, single-scattering albedo, and humidification factor using Raman lidar and aircraft size distribution measurements// *J. Geoph. Res.* –1998a. – № 103, D16. – P. 19.673 – 19.689.
52. Ferrare R. A., Melfi S. H., Whiteman D. N. Raman lidar measurements of aerosol extinction and backscattering, 1. Methods and comparisons// *J. Geoph. Res.* –1998b. – № 103, D16. – P. 19.663 – 19.672.
53. Transport of boreal forest fire emissions from Canada to Europe/ C. Forster, U. Wandinger, G. Wotawa, P. James, I. Mattis, D. Althausen, P. Simmonds, S. O'Doherty, S. G. Jennings, C. Kleefeld, J. Schneider, T. Trickl, S. Kreipl, H. Jäger, and A. Stohl//*J. Geophys. Res.* – 2001. – №106. –P. 22887–22906.
54. Optical properties of the Indo-Asian haze layer over the tropical Indian Ocean/ K. Franke, A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, C. Venkataraman, M. S. Reddy, F. Wagner, and R. Scheele//*J. Geophys. Res.* – 2003. – №108. – P. 4059.
55. Depolarization-ratio profiling at several wavelengths in pure Saharan dust during SAMUM 2006/ V. Freudenthaler, M. Esselborn, M. Wiegner, B. Heese, M. Tesche, A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, M. Wirth, A. Fix, G. Ehret, P. Knippertz, C. Toledano, J. Gasteiger, M. Garhammer, and M. Seefeldner// *Tellus*. – 2009. – № B 61. – P. 165-179.

56. Comparisons between POLDER 2 and MODIS/Terra aerosol retrievals over ocean/ B. Gérard, J. L. Déuze, M. Herman, Y. J. Kaufman, P. Lallart, C. Oudard, L. A. Remer, B. Roger, B. Six, and D. Tanré //J. Geophys. Res. – 2005. – №110. – P. 24211.
57. Raman lidar observations of a Saharan dust outbreak event: Characterization of the dust optical properties and determination of particle size and microphysical parameters/ Paolo Di Girolamo, Donato Summa, Rohini Bhawar, Tatiana Di Iorio, Marco Cacciani, Igor Veselovskii, Oleg Dubovik, Alexey Kolgotin//Atmospheric Environment. – 2012. – № 50. – P. 66-78.
58. Golub G. H., Heath M., and Wahba G. Generalized cross-validation as a method for choosing a good ridge parameter// Technometrics. – 1979. – № 21. – P. 215-223.
59. Joint retrieval of surface reflectance and aerosol optical depth from MSG/SEVIRI observations with an optimal estimation approach: 1. Theory/ Govaerts, Y. M., S. Wagner, A. Lattanzio, and P. Watts //J. Geophys. Res. – 2010. – №115. – P. 2203.
60. M. de Graaf, D. Donovan, A. Apituley. Refractive index and integral aerosol properties retrieval from Raman lidar data using principle component analysis. – 24th ILRC. – Boulder (USA), 23-27 June 2008, P. 11-14.
61. Characterization of the planetary boundary layer during SAMUM-2 by means of lidar measurements/ S. Gross, J. Gasteiger, V. Freudenthaler, M. Wiegner, A. Schladitz, C. Toledano, K. Kandler, M. Tesche, A. Ansmann, and A. Wiedensohler//Tellus. – 2011. – №B63. – P. 695-705.
62. Characterization of Saharan dust, marine aerosols and mixtures of biomass-burning aerosols and dust by means of multi-wavelength depolarization and Raman lidar measurements during SAMUM 2/ S. Gross, M. Tesche, V. Freudenthaler, C. Toledano, M. Wiegner, A. Ansmann, D. Althausen, and M. Seefeldner//Tellus. – 2011. – №B63. – P. 706-724.
63. Hadamard J. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. – Bull. Univ. Princeton 13, 1902. –P. 49–52.

64. Airborne high-spectral-resolution lidar for profiling aerosol optical profiles/ J. W. Hair, C. A. Hostetler, A. L. Cook, D. B. Harper, R. A. Ferrare, T. L. Mack, W. Welch, L. R. Izquierdo, and F. E. Hovis//Appl. Opt. – 2008. – №47. – P. 6734-6752.
65. Radiative properties and direct radiative effect of Saharan dust measured by the C-130 aircraft during SHADE: 1. Solar spectrum/Haywood, J., P. Francis, S. Osborne, M. Glew, N. Loeb, E. Highwood, D. Tanré, G. Myhre, P. Formenti, and E. Hirst//J. Geophys. Res. – 2003. – №108(D18). – P. 8577.
66. Vertically resolved dust optical properties during SAMUM: Tinfou compared to Ouarzazate/ B. Heese, D. Althausen, T. Dinter, M. Esselborn, T. Müller, M. Tesche, and M. Wiegner//Tellus. – 2009. – № B 61. – P. 195-205.
67. J. Heintzenberg. The SAMUM-1 experiment over Southern Morocco: Overview and introduction// Tellus. 2009. – №B 61. – P. 2-11.
68. Hinds W. C. Aerosol technology. New York: John Wiley, 1982. – 424 p.
69. AERONET: A federated instrument network and data archive for aerosol characterization/ B. N. Holben, T. F. Eck, I. Slutsker, D. Tanre, J. P. Buis, A. Setz-er, E. Vermote, J. A. Reagan, Y. J. Kaufman, T. Nakajima, F. Lavenue, J. I, and A. Smirnov//Remote Sens. Environ. – 1998. – №66. – P. 1-16.
70. High spectral resolution lidar developments and applications at NASA Langley Research Center/ Chris A. Hostetler, Richard A. Ferrare, Johnathan W. Hair, Anthony L. Cook, David B. Harper, Terry Mack, Craig S. Cleckner, Sharon P. Burton, Raymond R. Rogers, Michael D. Obland, Richard J. Hare, Amy Jo Scarino, Carolyn Butler, Yongxiang Hu, Detlef Müller, Eduard Chemyakin, Dong Liu. –ILRC 26. – Porto Heli (Greece), June 2012. – P. 431-434.
71. Third Assessment Report of Working Group I of the Intergovernmental Panel on Climate Change/ J. Houghton, Y. Ding, D. Griggs, et al. – Cambridge: Cambridge University, 2001.
72. Hulst H. C. Light scattering by small particles. New York: Dover Publications, Inc., 1981. – 532 p.

73. Kahnert, M. Reproducing the optical properties of fine desert dust aerosols using ensembles of simple model particles//J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2004. – №85. – P. 231-249.
74. Size distribution, mass concentrations, chemical and mineralogical composition, and derived optical parameters of the boundary layer at Tinfou, Morocco, during SAMUM 2006/ K. Kandler, L. Schutz, C. Deutscher, M. Ebert, H. Homan, R. Jaenicke, P. Knippertz, K. Lieke, A. Petzold, A. Schladitz, B. Weinzierl, A. Wiedensohler, and S. Weinbruch//Tellus. – 2009. – № B 61. – P. 32-50.
75. Ground based off-line measurements at Praia, Cape Verde, during the Saharan Mineral Dust Experiment: Microphysical properties and mineralogy/ K. Kandler, L. Schutz, S. Jackel, K. Lieke, C. Emmel, D. Müller -Ebert, M. Ebert, D. Scheuven, A. Schladitz, B. Segvic, A. Wiedensohler, and S. Weinbruch//Tellus. – №B 63. – P. 201.
76. Klett D. Lidar inversion with variable backscatter/extinction rations// Appl. Opt. – 1985. – №31. – P. 1638-1643.
77. Klett D. Stable analytical inversion solution for processing lidar returns// Appl. Opt. – 1981. – № 20. – P. 211-220.
78. Optical, microphysical, mass and geometrical properties of aged volcanic particles observed over Athens, Greece, during the Eyjafjallajokull eruption in 21-24 April 2010 through synergy of Raman lidar and sunphotometer measurements/ P. Kokkalis, A. Papayannis, V. Amiridis, R. E. Mamouri, I. Veselovskii, A. Kolgotin, G. Tsaknakis, N. I. Kristiansen, A. Stohl, and L. Mona//Atmos. Chem. Phys. – 2013. – revised .
79. A. Kolgotin, D. Müller. Theory of inversion with two-dimensional regularization: profiles of microphysical particle properties derived from multiwavelength lidar measurements//Appl. Opt. – 2008. – №25 (Vol. 47). – P. 4472-4490.
80. A. Kolgotin, I. Veselovskii, D. Müller. Regularization algorithm for retrieval of particle properties from multiwavelength lidar measurements using the sun photometer data as a constraint. –ILRC 24. – Boulder, June 2008. – P. 959-962.

81. Influence of the uncertainty of the imaginary part of the refractive index on the retrieval accuracy of particle scattering and absorption coefficients and single scattering albedo: numerical simulations for the case of multiwavelength Raman lidar data/ A. Kolgotin, E. Chemyakin, A. Romanov, D. Müller. –ILRC 26. – Porto Heli (Greece), June 2012. – P. 269-272.
82. Kovalev V. Lidar measurement of the vertical aerosol extinction profiles with range dependent backscatter-to-extinction ratios// Appl. Opt. – 1993. – №31. – P. 6053-6065.
83. Vladimir A. Kovalev, A. Kolgotin. Comparison of alternative techniques for extracting the extinction coefficient and the lidar ratio from optical depth and backscatter coefficient profiles. –ILRC 24. – Boulder (USA), June 2008. – P. 155-158.
84. Experimental method for the examination of systematic distortions in lidar data/ Vladimir A. Kovalev, Wei Min Hao, Cyle Wold, and Mariana Adam//Appl. Opt.– 2007. – №46 – P. 6710-6718.
85. Levy, R., L. Remer, and O. Dubovik. Global aerosol optical models and application to MODIS aerosol retrieval over land// J. Geophys. Res. – 2007. – №112. – P. 13210.
86. Improvements for ground-based remote sensing of atmospheric aerosol properties by additional polarimetric measurements/ Z. Li, et al. //J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. – 2009. – №110. – P. 1954–1961.
87. Particle chemical properties in the vertical column based on aircraft observations in the vicinity of Cape Verde Islands/ K. Lieke, K. Kandler, D. Scheuvs, C. E. andd C. Von Glahn, A. Petzold, B. Weinzierl, A. Veira, M. Ebert, S. Weinbruch, and L. Schutz//Tellus. – 2011. – №B63. – P. 497-511.
88. Relative-humidity profiling in the troposphere with a Raman lidar/ I. Mattis, A. Ansmann, D. Althausen, V. Jaenisch, U. Wandinger, D. Müller, Y. F. Arshinov, S. M. Bobrovnikov, and I. B. Serikov//Appl. Opt. –2002. – №41. – P. 6451-6462.

89. Unexpectedly high aerosol load in the free troposphere over central Europe in spring/summer 2003/I. Mattis, A. Ansmann, U. Wandinger, and D. Müller//*Geophys. Res. Lett.*– 2003. – №30. P. 2178.
90. Melfi S.H., Evans K.D., Whiteman D. Observation of Raman scattering by cloud droplets in the atmosphere// *Appl.Opt.* – 1997. – № 36. – P. 3551-3559.
91. Min, M., J. W. Hovenier, and A. de Koter. Modeling optical properties of cosmic dust grains using a distribution of hollow spheres// *Astron. Astrophys.* – 2005. – №432. – P. 909–920.
92. Accurate Monitoring of Terrestrial Aerosols and Total Solar Irradiance. Introducing the Glory Mission/ Michael I. Mishchenko, Brian Cairns, Greg Kopp, Carl F. Schueler, Bryan A. Fafaul, James E. Hansen, Ronald J. Hooker, Tom Itchkawich, Hal B. Maring, And Larry D. Travis// *American Meteorological Society.* – May 2007. – P. 677-691.
93. Nonsphericity of dust-like tropospheric aerosols: Implications for aerosol remote sensing and climate modeling/ M. I. Mishchenko, A. A. Lacis, B. E. Carlson, and L. D. Travis // *Geophys. Res. Lett.* – 1995. – №22. – P. 1077–1080.
94. M. I. Mishchenko and L. D. Travis. T-matrix computations of light scattering by large spheroidal particles.// *Opt. Commun.* – 1994. – №109. – doi:10.1016/0030-4018(94)90731-5. – P. 16–21.
95. M. I. Mishchenko, J. W. Hovenier, and L. D. Travis. *Light Scattering by Nonspherical Particles.* – San Diego: Academic, Calif, 2000.
96. M. I., Mishchenko, L. D. Travis and A. A. Lacis. *Scattering, Absorption, and Emission of Light by Small Particles.* – Cambridge, U. K: Cambridge Univ.Press, 2002,.
97. Modeling phase functions for dustlike tropospheric aerosols using a mixture of randomly oriented polydisperse spheroids./ M. I. Mishchenko, L. D. Travis, R. A. Kahn, and R. A. West// *Journal of Geophysical Research.* – 1997. – №102. – doi:10.1029/96JD02110. – P. 16 831–16 847.
98. Vertical profiles of microphysical particle properties derived from inversion with two-dimensional regularization of multiwavelength Raman lidar data: ex-

- periment/ D. Müller, A. Kolgotin, I. Mattis, A. Petzold, and A. Stohl//Appl. Opt. – 2011. – №14(Vol. 50). – P. 2069-2079.
99. Physical particle properties of the Indian aerosol plume derived from six-wavelength lidar observations on 25 March 1999 of the Indian Ocean Experiment/ D. Müller, F. Wagner, D. Althausen, U. Wandinger, and A. Ansmann// Geophys. Res. Lett. – 2000. – №27. –P. 1403–1406.
 100. Comprehensive particle characterization from three-wavelength Raman-lidar observations/ D. Müller, U. Wandinger, D. Althausen, and M. Fiebig// Appl. Opt. – 2001. – №40. – P. 4863–4869.
 101. Comparison of optical and microphysical properties of pure dust Saharan mineral dust observed with AERONET Sunphotometer, Raman lidar, and in situ instruments during SAMUM 2006/ D. Müller, K.-H. Lee, J. Gasteiger, M. Tesche, B. Weinzierl, K. Kandler, T. Müller, C. Toledano, S. Otto, D. Althausen, and A. Ansmann//J. Geophys.Res. – 2012. – №117. – P. 112).
 102. Multiwavelength Raman lidar observations of particle growth during long-range transport of forest-fire smoke in the free troposphere/ D. Müller, I. Mattis, A. Ansmann, U. Wandinger, C. Ritter, and D. Kaiser//Geophys. Res. Lett. – 2007 – №34. – L05803.
 103. Raman lidar observations of aged Siberian and Canadian forest-fire smoke in the free troposphere over Germany in 2003: microphysical particle characterization/ Müller D., I. Mattis, U. Wandinger, A. Ansmann, D. Althausen, and A. Stohl//J. Geophys. Res. – 2005. – №110. – D17201.
 104. Vertical Profiles of Pure Dust (SAMUM 2006) and Mixed-Smoke-Dust Plumes (SAMUM 2008) Inferred From Inversion of Multiwavelength Raman Lidar Data and Comparison to AERONET Retrievals. / D. Müller, I. Veselovskii, A. Kolgotin et al.// Appl. Opt., accepted 14-Feb-13.
 105. Müller D., Wandinger U., and Ansmann A. Microphysical particle parameters from extinction and backscatter lidar data by inversion with regularization: theory// Appl. Opt. – 1999. – № 38. – P. 2346-2357.

106. Mineral dust observed with AERONET Sun photometer, Raman lidar, and in situ instruments during SAMUM 2006: Shape-independent particle properties/ D. Müller, B. Weinzierl, A. Petzold, K. Kandler, A. Ansmann, T. Müller, M. Tesche, V. Freudenthaler, M. Esselborn, B. Heese, D. Althausen, A. Schladitz, S. Otto, and P. Knippertz//J. Geophys. Res. – 2010. – №115 P. 3210.
107. Spectral absorption coefficients and imaginary parts of refractive indices of Saharan dust during SAMUM-1/ T. Müller, A. Schladitz, A. Massling, N. Kaaden, K. Kandler, and A. Wiedensohler//Tellus. – 2008. – №6B. – P. 79–95.
108. Characterization of Asian dust and Siberian smoke with multi-wavelength Raman lidar over Tokyo, Japan in spring 2003/ T. Murayama, D. Müller, K. Wada, A. Shimizu, M. Sekigushi, and T. Tsukamoto//Geophys. Res. Lett. – 2004. – №31. – L23103.
109. Characterization of fresh and aged biomass burning events using Multi-wavelength Raman Lidar and mass spectrometry/ D. Nicolae, A. Nemuc, C. Talianu, J. Vasilescu, L. Belegante, D. Müller, A. Kolgotin// Journal of Geophysical Research. –2013. – revised .
110. Aerosol lidar characteristics measured by a multi-wavelength Raman lidar system at Anmyeon island, Korea/ Y. M. Noh, Y. J. Kim, B. C. Choi, and T. Murayama//Atmos. Res. – 2007. – №68. – P. 316–319.
111. T. Nousiainen Optical modeling of mineral dust particles: A review// J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer. –2009. – № 110. – P. 29.
112. Optical-microphysical properties of Saharan dust aerosols and composition relationship using a multi-wavelength Raman lidar, in situ sensors and modelling: a case study analysis / A. Papayannis, R. E. Mamouri, V. Amiridis, E. Remoundaki, G. Tsaknakis, P. Kokkalis, I. Veselovskii, A. Kolgotin, A. Nenes, and C. Fountoukis//Atmos. Chem. Phys. – 2011. – №11. – P. 25473–25516.
113. Saharan dust refractive index and optical properties from aircraft-based observations during SAMUM 2006/ A. Petzold, K. Rasp, B. Weinzierl, M. Esselborn, T. Hamburger, A. Dornbrack, K. Kandler, L. Schutz, P. Knippertz, M. Fiebig, and A. Virkkula//Tellus. – 2009. – № B 61. – P. 118-130.

114. Mixing of mineral dust with urban pollution aerosol over Dakar (Senegal): impact on dust physico-chemical and radiative properties/ A. Petzold, A. Veira, S. Mund, M. Esselborn, C. Kiemle, B. Weinzierl, T. Hamburger, G. Ehret, K. Lieke, and K. Kandler//Tellus, –2011. – №B 63. – P. 619-634.
115. Perturbation of the European free troposphere aerosol by North American forest fire plumes during the ICARTT-ITOP experiment in summer 2004/ A. Petzold, B. Weinzierl, H. Huntrieser, A. Stohl, E. Real, J. Cozic, M. Fiebig, J. Hendricks, A. Lauer, K. Law, A. Roiger, H. Schlager, and E. Weingartner//Atmos. Chem. Phys. – 2007. – № 7. – P. 5105–5127.
116. Phillips D. L. A technique for the numerical solution of certain integral equations of the first kind// J. Assoc. Comput. Mach. – 1962. – №9. – P. 84–97).
117. Numerical simulation of the retrieval of aerosol size distribution from multiwavelength laser radar measurements/ P.Qing, H. Nakane, Y. Sasano, and S. Kitamura//Appl. Opt. – 1989. – №28. – P. 5259–5265.
118. Characterization of African dust transported to Puerto Rico by individual particle and size segregated bulk analysis/ E. A. Reid, J. S. Reid, M. M. Meier, M. R. Dunlap, S. S. Cliff, A. Broumas, K. Perry, and H. Maring //J. Geophys. Res. – 2003. – №108(D19). – P. 8591.
119. A review of biomass burning emissions, part3. Intensive optical properties of biomass burning particles/ J. S. Reid, T. F. Eck, S. A. Christopher, R. Koppmann, , O. Dubovik, D. P. Eleuterio, B. N. Holben, E. A. Reid, and J. Zhang//Atmos. Chem. Phys. – 2005. –№ 5. –P. 827-849.
120. Comparison of size and morphological measurements of coarse mode dust particles from Africa/ J. S. Reid, et al.//J. Geophys. Res. – 2003. – №108(D19). – P. 8593.
121. Ritter C., A. Kirsche, and R. Neuber. Tropospheric aerosol characterized by a Raman lidar over Spitsbergen. –22nd International Laser Radar Conference (ILRC). – Matera (Italy), 2004. – P. 459–462.

122. Backscattering linear depolarization ratio measurements of mineral, sea-salt, and ammonium sulfate particles simulated in a laboratory chamber/ T. Sakai, T. Nagai, Y. Zaizen, and Y. Mano// *Appl. Opt.* – 2010. – №49. – P. 4441-4449.
123. Sassen, K. The polarization lidar technique for cloud research: A review and current assessment// *Bull. Amer. Meteor. Soc.* – 1991. – №72. – P. 1846-1866.
124. R. M. Schotland, K Sassen, and R. Stone. Observation by lidar of linear depolarization ratios for hydrometeors// *J. Appl. Meteor.* – 1971. – № 10. – P. 1011-1017.
125. High spectral resolution lidar to measure optical scattering properties of atmospheric aerosols: 1: Theory and instrumentation/ S. T. Shipley, D. H. Tracy, E. W. Eloranta, J. T. Trauger, J. T. Sroga, F. L. Roesler, and J. A. Weinman// *Appl. Opt.* – 1983. – №22. – P. 3717–3724.
126. Sinyuk, A., O. Torres, and O. Dubovik. Combined use of satellite and surface observations to infer the imaginary part of refractive index of Saharan dust// *Geophys. Res. Lett.* – 2003. – № 30(2). – P. 1081.
127. Sokolik, I. N. and Toon, O. B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths// *J. Geophys. Res.* – 1999. – №104. – P. 9423–9444,.
128. A. Stohl and D. J. Thomson. A density correction for Lagrangian particle dispersion models// *Boundary-Layer Meteorol.* –1999. – №90. – P. 155–167.
129. A. Stohl, M. Hittenberger, and G. Wotawa. Validation of the Lagrangian particle dispersion model FLEXPART against large scale tracer experiment data// *Atmos. Environ.* – 1998. – №32. – P. 4245–4264.
130. Measurement and modeling of the Saharan dust radiative impact: Overview of the Saharan Dust Experiment (SHADE)/Tanré, D., J. Haywood, J. Pelon, J. F. Leon, B. Chatenet, P. Formenti, P. Francis, P. Goloub, E. J. Highwood, and G. Myhre//*J. Geophys. Res.* – 2003. – №108(D18). – P. 8574.
131. Vertical profiling of Saharan dust with Raman lidars and airborne HSRL in southern Morocco during SAMUM/ M. Tesche, A. Ansmann, D. Müller, D. Al-

- thausen, I. Mattis, B. Heese, V. Freudenthaler, M. Wiegner, M. Esselborn, G. Pisani, and P. Knippertz//*Tellus*. – 2009. – № B 61. – P. 144-164.
132. Vertically resolved separation of dust and smoke over Cape Verde using multiwavelength Raman and polarization lidars during Saharan Mineral Dust Experiment 2008/Tesche, M., A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, R. Engelmann, V. Freudenthaler, and S. Groß // *J. Geophys. Res.* – 2009b. – №114. – D13202.
133. Profiling of Saharan dust and biomass-burning smoke with multiwavelength polarization Raman lidar at Cape Verde/ M. Tesche, S. Gross, A. Ansmann, D. Müller, D. Althausen, V. Freudenthaler, and M. Esselborn//*Tellus*. – 2011. – №B63. – P. 649-676.
134. Optical and microphysical properties of smoke over Cape Verde inferred from multiwavelength lidar measurements/ M. Tesche, D. Müller, S. Gross, A. Ansmann, D. Althausen, V. Freudenthaler, B. Weinzierl, A. Veira, and A. Petzold//*Tellus*. – 2011. – №B63. – P. 677-694.
135. Thomason L.W., Osborn M.T. Lidar conservation parameters derived from SAGE II extinction measurements. // *Geophys. Res. Lett.* – 1992. – № 19 (16). – P. 1655–1658.
136. Twomey S. Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Direct Measurements. New York: Elsevier, 1977. – 243 p.
137. Veselovskii I.A., Cha H.K., Kim D.H. Raman lidar for the study of liquid water and water vapor in troposphere// *Appl. Phys.* – 2000. – № 71. – P.113-117.
138. Application of randomly oriented spheroids for retrieval of dust particle parameters from multiwavelength lidar measurements/ I. Veselovskii, O. Dubovik, A. Kolgotin, T. Lapyonok, P. D. Girolamo, D. Summa, D. N. Whiteman, M. I. Mishchenko, and D. Tanre//*J. Geophys. Res.* – 2010. – №115. – D21203.
139. Linear estimation of particle bulk parameters from multi-wavelength lidar measurements/ I. Veselovskii, O. Dubovik, A. Kolgotin, M. Korenskiy, D. N. Whiteman, K. Allakhverdiev, and F. Huseyinoglu// *Atmospheric Measurement Techniques*. – 2012. – №5. –P. 1–30.

140. Information content of multiwavelength lidar data with respect to microphysical particle properties derived from eigenvalue analysis/ Veselovskii I., Kolgotin A., Müller D., Whiteman D. N. // *Appl. Opt.* – 2005. – №44. – P. 5292-5303).
141. Inversion of multi-wavelength Raman lidar data for retrieval of bimodal aerosol size distribution/ I. Veselovskii, A. Kolgotin, V. Griaaznov, D. Müller, K. Franke, and D. N. Whiteman// *Appl. Opt.* – 2004. – № 43. – P. 1180-1195.
142. Inversion with regularization for the retrieval of tropospheric aerosol parameters from multiwavelength lidar sounding/ I. Veselovskii, A. Kolgotin, V. Griaaznov, et al// *Appl. Opt.* – 2002. – №41. – P.3685-3699.
143. Demonstration of Aerosol Property Profiling by Multiwavelength Lidar under Varying Relative Humidity Conditions/ I. Veselovskii, D.N. Whiteman, A. Kolgotin, E. Andrews, M.Korenskii// *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology.* –2009. – № 26. – P. 1543-1557.
144. Retrieval of height-temporal distributions of particle parameters from multiwavelength lidar measurements during DISCOVER-AQ 2011 campaign / I. Veselovskii, D. N. Whiteman, A. Kolgotin, M. Korenskiy, D. Perez-Ramirez. *ILRC* 26. – Porto Heli (Greece), June 2012. – P. 419-422.
145. Retrieval of height-temporal distributions of particle parameters from multiwavelength lidar measurements using linear estimation technique and comparison results with AERONET/ I. Veselovskii, D.N. Whiteman, M. Korenskiy, A. Kolgotin, O. Dubovik, and D. Perez-Ramirez//2013 reviewing .
146. Scattering matrices of mineral aerosol particles at 441.6 nm and 632.8 nm. / H. Volten, O. Munoz, E. Rol, J. F de Haan, W. Vassen, J. W. Hovenier, K. Muinonen.// *Journal of Geophysical Research.* – 2001. – №106. – doi:10.1029/2001JD900068. – P. 17,375–17,401.
147. Optical and microphysical characterization of biomass-burning and industrial-pollution aerosols from multiwavelength lidar and aircraft measurements/ U. Wandinger, D. Müller, C. Bockmann, D. Althausen, V. Matthias, J. Bosenberg, V. Weiss, M. Fiebig, M. Wendisch, A. Stohl, and A. Ansmann//*J. Geophys. Res.* –2002 – №107. – P. 8125.

148. Airborne measurements of dust layer properties, particle size distribution and mixing state of Saharan dust during SAMUM 2006/ B. Weinzierl, A. Petzold, M. Esselborn, M. Wirth, K. Rasp, K. Kandler, L. Schutz, and M. Fiebig//Tellus. – 2009. – № B 61. – P. 96-117.
149. Microphysical and optical properties of dust and tropical biomass burning aerosol layers in the Cape Verde region: An overview of the airborne in situ and lidar measurements during SAMUM-2/B. Weinzierl, D. Sauer, M. Esselborn, A. Petzold, A. Veira, M. Rose, S. Mund, M. Wirth, A. Ansmann, M. Tesche, S. Gross, and V. Freudenthaler//Tellus. – 2011. – №B63. – P. 589-618.
150. Numerical simulations of optical properties of Saharan dust aerosols with emphasis on lidar applications/ Wiegner M., J.Gasteiger, K.Kandler, B.Weinzierl, K.Rasp, M. Esselborn, V.Freudenthaler, B.Heese, C.Toledano, M.Tesche, D. Althausen// Tellus. – 2009. – №61B. – P. 180-194.
151. W. J. Wiscombe and A. Mugnai. Single scattering from nonspherical Chebyshev particles. – NASA: Ref. Publ., 1157, 1986. – 284 pp.
152. Efficient finite-difference time-domain scheme for light scattering by dielectric particles: Application to aerosols/ P. Yang, K. N. Liou, M. I. Mishchenko, and B. C. Gao//Appl. Opt. – 2000. – №39. – P. 3727–3737.
153. Modeling of the scattering and radiative properties of nonspherical dust-like aerosols/ P. Yang, Q. Feng, G. Hong, G. W. Kattawar, W. J. Wiscombe, M. I. Mishchenko, O. Dubovik, I. Laszlo, and I. N. Sokolik //J. Atmos. Sci. –2007. – №38(10). – P. 995–1014.
154. A study of the effect of non-spherical dust particles on the AVHRR aerosol optical thickness retrievals/ T. X.-P. Zhao, I. Laszlo, O. Dubovik, B. N. Holben, J. Sapper, D. Tanré, and C. Pietras // Geophys. Res. Lett. – 2003. – № 30(6). – P. 1317.
155. Zuev V.E. and Naats I.E. Inverse Problems of Lidar Sensing of the Atmosphere. – Berlin: Springer-Verlag, 1983. – 220 p.

Приложение

УТВЕРЖДАЮ

Директор ООО «Оптосистемы»
Коваленко Ю.А.
Дата 12 04 2013 г.



АКТ

о внедрении (использовании) результатов

докторской диссертационной работы

Колготина Алексея Викторовича

Настоящий Акт подтверждает, что результаты, полученные Колготиним А.В. в ходе выполнения диссертационной работы «Методика решения задач многоволнового лидарного зондирования в применении к глобальному мониторингу параметров атмосферных аэрозолей», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук, были внедрены при разработке программно-математического обеспечения лидарных систем, создаваемых ООО «Оптосистемы» по контрактам с:

1. Turkish Scientific and Technological Research Council, Турция. Договор № 61-ЛД/10 от 14.06.2010 г.
2. ОАО «Экспериментальный машиностроительный завод им. В.М.Мясищева», г. Жуковский. Договор № 126-ЛД/10 от 30.12.2010 г., № 127-ЛД/10 от 30.12.2010 г.
3. ООО НПП «Лазерные системы», г. Санкт-Петербург. Договор № 112-ЛД/11 от 05.10.2011 г.

В частности, при разработке программно-математического обеспечения использовались:

- представленный в диссертации алгоритм восстановления параметров аэрозолей, состоящих из сфер и случайно ориентированных сфероидов;
- быстрый алгоритм линейной оценки поля микрофизических параметров аэрозолей по данным многоволнового лидарного зондирования, представленный в диссертации.

Начальник лидарной группы,
д.ф-м.н. Веселовский И.А.

