

На правах рукописи

ВАСИЛЬЕВ АЛЕКСАНДР ВЛАДИМИРОВИЧ

УДК. 551.521.3

**МОДЕЛИ АЭРОЗОЛЯ И ПОЛЯ РАССЕЯННОГО
ИЗЛУЧЕНИЯ В ЗАДАЧАХ ДИСТАНЦИОННОГО
ЗОНДИРОВАНИЯ АТМОСФЕРЫ**

Специальность: 25.00.29 – физика атмосферы и гидросферы

Автореферат

диссертации на соискание ученой степени
доктора физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Работа выполнена на физическом факультете Санкт-Петербургского государственного университета.

Научный консультант доктор физико-математических наук,
профессор Ивлев Лев Семенович

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор Горчаков Геннадий Ильич,

доктор физико-математических наук,
профессор Покровский Олег Михайлович,

доктор физико-математических наук,
профессор Фарафонов Виктор Георгиевич.

Ведущая организация: Институт оптики атмосферы СО РАН им.
В.Е. Зуева, г.Томск.

Защита состоится « ____ » _____ 2011 г. в ____ часов на заседании совета по защите докторских и кандидатских диссертаций Д 327.005.01 при государственном учреждении «Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова» по адресу:
194021, Санкт-Петербург, ул. Карбышева, д.7.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ГУ «ГГО».

Автореферат разослан « ____ » _____ 2011 г.

Ученый секретарь совета по защите
докторских и кандидатских диссертаций,
доктор географических наук

А.В. Мещерская

Общая характеристика работы.

Обоснование актуальности работы.

В настоящее время оптическое дистанционное зондирование стало основным методом изучения и мониторинга газового и аэрозольного состава атмосферы Земли и других планет.

Аэрозоль является важным, но и наиболее сложным компонентом атмосферы, поскольку включает частицы различной формы, размера, структуры и химического состава, характеризуется широким диапазоном вариации концентрации, значительной пространственной и временной изменчивостью. Эта необходимость описания атмосферного аэрозоля целым комплексом параметров порождает существенные проблемы при его дистанционном зондировании.

Указанные трудности предопределили общее направление развития экспериментов по дистанционному зондированию аэрозоля: от определения простейших оптических характеристик (аэрозольной оптической толщины) в первых работах до достаточно сложных обратных задач по одновременному определению нескольких параметров аэрозоля в ряде современных исследований.

Для извлечения новой информации об атмосферном аэрозоле необходимо измерение и модельный, численный анализ поля рассеянного излучения в атмосфере, поскольку для аэрозоля (в отличие от газов) именно рассеяние является основным специфическим механизмом взаимодействия с излучением.

Таким образом, на современном этапе необходимы как собственно модели рассеяния излучения атмосферными аэрозолями, так и взаимосвязанные с ними модели оптических измерений в аэрозольной рассеивающей атмосфере. При этом, в связи с отмеченными трудностями задач дистанционного зондирования аэрозолей, важным этапом их решения становится предварительное теоретическое, модельное исследование как самой возможности определения из измерений параметров аэрозоля, так и выбор этих параметров.

Приведем общую схему решения современных задач дистанционного зондирования аэрозоля – рис.1. К отмеченной выше части теоретического исследования отнесем задачи создания априорных аэрозольных моделей, задачи параметризации аэрозольных моделей, задачи генерации оптических аэрозольных моделей, задачи моделирования оптических измерений и задачи создания решающего оператора. Охарактеризуем кратко каждые из них.

Как известно, априорная информация об исследуемом объекте необходима для решения любых обратных задач атмосферной оптики. Более того, классические схемы решения обратных задач требуют информацию не только о средних значениях атмосферных параметров, но и о диапазонах их вариаций. То есть статистику вариаций. В этом смысле

аэрозольные модели, отражающие указанную статистику и именуются в диссертации “статистическими”.

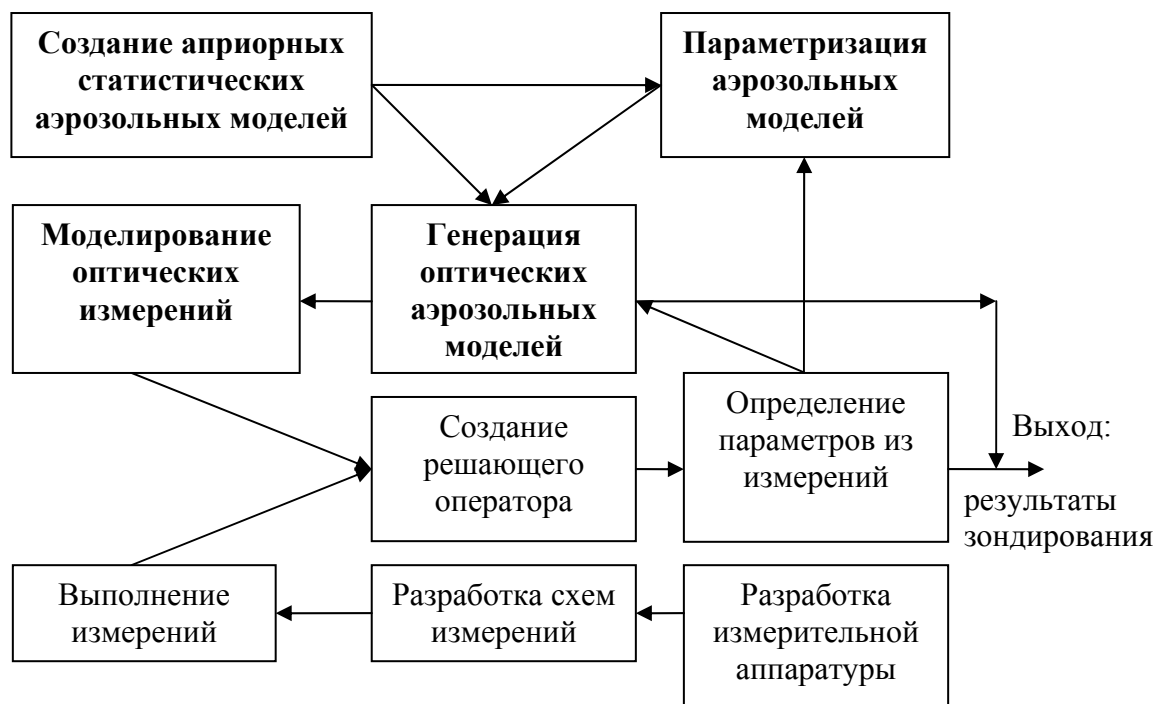


Рис.1. Общая схема решения задач интерпретации оптических дистанционных измерений параметров атмосферного аэрозоля. Круг задач, рассматриваемых в данной диссертации, выделен жирным шрифтом.

В качестве исходных аэрозольных моделей в настоящее время обычно используются модели микрофизических параметров. Это порождает задачу генерации из них оптических аэрозольных характеристик, необходимых для моделей переноса излучения и оптических измерений в атмосфере.

При решении обратных задач, как отмечалось выше, невозможно восстановить весь комплекс параметров, описывающих атмосферный аэрозоль. Это приводит к весьма специфической задаче параметризации аэрозольной модели, то есть определения набора параметров, с одной стороны адекватно отражающих реальность, но с другой – допускающих возможность их определения из данных дистанционного зондирования.

Необходимость физико-математического моделирования дистанционных оптических измерений в атмосфере обусловлена тем, что любые схемы решения обратных задач оптики атмосферы основаны на сравнении (явном, либо косвенном) данных натурных измерений и результатов их математического моделирования.

С этим сравнением связаны и задачи создания решающего оператора, однако, они являются по сути уже чисто математическими и в диссертации

ции не рассматриваются (хотя автор имеет определенный опыт и в этой области).

Таким образом, ограничимся кругом из четырех задач, непосредственно относящихся к отмеченной выше стадии теоретического, модельного исследования обратных задач дистанционного зондирования аэрозолей: создание априорных статистических аэрозольных моделей, генерация из них оптических аэрозольных моделей, их параметризация (микрофизических или (и) оптических), моделирование оптических измерений.

Можно утверждать, что до настоящего времени этот комплекс задач ставился и решался индивидуально, исходя из конкретных схем и особенностей дистанционных измерений. При таком подходе приходится каждый раз затрачивать немало усилий на описанном этапе теоретического исследования задачи. Возникла необходимость обобщения приемов и методов подобных исследований, выработки основ решения указанных классов задач. Это и является общей целью диссертационной работы, определяющей ее актуальность.

Общая цель работы.

Разработка единого комплекса физико-математических моделей оптических измерений в атмосфере и моделей атмосферных аэрозолей, включая теоретические, методические основы их генерации, для исследования и решения широкого круга различных задач дистанционного зондирования аэрозолей, который позволяет извлекать из данных зондирования новую, скрытую в рамках использования прежних моделей информацию.

Постановка конкретных задач работы.

Как следует из формулировки цели работы, комплекс моделей предназначен в первую очередь для этапа научного исследования задач дистанционного зондирования, определения возможности извлечения из данных измерений новой информации об аэрозоле.

Специфика исследовательского этапа предъявляет к указанным моделям два основных требования: универсальности и гибкости.

Универсальность означает, что в идеале разработанный комплекс моделей должен быть применим к любым задачам дистанционного зондирования аэрозолей. Идеал, разумеется, недостижим, реально следует стремиться к как можно более широкому кругу задач. То есть необходимы модели оптических измерений, включающие рассеяние излучения на аэрозольных образованиях, для любой геометрии освещения и визирования, как в плоской, так и сферической атмосфере, для любого оптического диапазона (от ультрафиолетового до микроволнового), в облачной и безоблачной атмосфере и т.д.

Требование гибкости вытекает из самой сущности этапа теоретического исследования задач дистанционного зондирования. Модель долж-

на позволять легко варьировать значения самых различных параметров, выбирать различные схемы решения задач, сопоставлять их, определять наиболее подходящую для решения конкретной задачи. Так, например, для моделей поля рассеянного излучения часто необходим анализ возможностей использования различных приближений (однократного рассеяния и т.п.), поскольку точный расчет может занимать недопустимо большое время при обработке данных натурных измерений.

Конечно, собственно модели аэрозоля и полей излучения создаются уже давно. Однако отмеченные выше особенности, совершенствование аппаратуры и схем измерений диктуют необходимость их непрерывного развития и улучшения. Кроме того, из общей цели работы вытекает необходимость придания новым моделям свойств универсальности и гибкости, которыми существующие модели как правило не обладают.

Число имеющихся в настоящее время аэрозольных моделей весьма велико. Но в большинстве из них вариации аэрозольных параметров осуществляются детерминировано. Для задач же дистанционного зондирования необходимы прежде всего стохастические модели вариаций, при этом должна учитываться корреляция параметров. Одна из задач диссертации – разработка общей методики создания подобных моделей.

В задачах генерации оптических аэрозольных моделей, исходя из изложенных выше принципов, требуется, во-первых, снять любые ограничения на параметры расчетов для одиночных частиц (размеры, структуру, форму, значения комплексного показателя преломления), во-вторых, довести до полного автоматизма методики расчетов оптических свойств ансамблей частиц (автоматический выбор пределов и сетки интегрирования опять же для любых функций распределения по размерам, форме и структуре). В этом плане до работ автора диссертации можно было говорить о завершенности методик лишь для простейшего случая ансамбля однородных частиц, хотя и здесь автор претендует на некоторую новизну своих алгоритмов. Случаи более сложной структуры и формы частиц требовали и требуют соответствующего полного решения.

Наконец, как отмечалось выше, задачи параметризации аэрозольных моделей являются наиболее сложными. Хотя первой параметрической моделью индикатрисы явилась предложенная в 1940-х годах известная функция Хэньи-Гринштейна, в полном объеме задачи параметризации встали лишь в последнее время в связи с необходимостью извлекать из данных пассивного дистанционного зондирования, включая поля рассеянного излучения, вертикальные профили различных аэрозольных параметров. В данной области сложно говорить о какой-то завершенности и возможности обобщения. Для этого следует выделить основные общие и эффективные приемы решения задач параметризации аэрозольных моделей.

Задачи работы.

В соответствии с вышеизложенным сформулируем основные задачи диссертационной работы.

1) Разработка комплекса физико-математических моделей оптических измерений в атмосфере, обладающих необходимыми для исследования задач дистанционного зондирования аэрозолей по измерениям полей рассеянного солнечного и равновесного теплового излучений свойствами: отсутствие ограничений на оптический диапазон, тип атмосферы (безоблачная – облачная), геометрию переноса излучения, освещения и визирования; аппроксимация вертикальных параметров атмосферы непрерывными функциями; учет различных типов отражающих поверхностей; вычисление производных от моделируемых величин по любым входным параметрам атмосферы и поверхности.

2) Разработка универсальных (без ограничений на параметры) алгоритмов расчета оптических характеристик ансамблей аэрозольных частиц, а также физических моделей образования указанных ансамблей.

3) Разработка методики генерации стохастических аэрозольных моделей.

4) Разработка методов моделирования и моделей атмосферного аэрозоля, позволяющих адекватно (с требуемой точностью) описывать его оптические характеристики малым числом подлежащих определению из дистанционных измерений параметров (параметрические аэрозольные модели).

Научная новизна работы.

Следующие результаты диссертационной работы обладают принципиальной научной новизной и получены впервые.

1. Предложена новая модель отражения от идеальной зеркальной поверхности для сферической геометрии переноса излучения в рассеивающей атмосфере.

2. Разработан единый комплекс моделей оптических измерений в рассеивающей атмосфере, предназначенный для научно-исследовательских задач дистанционного зондирования от коротковолнового до микроволнового диапазонов для произвольной геометрии освещения и визирования, с учетом различных отражающих поверхностей, как в безоблачной, так и в облачной атмосфере при непрерывном изменении параметров атмосферы с высотой. Часть указанных моделей реализована в новом компьютерном коде. Помимо собственно моделирования измерений поля излучения, код также вычисляет производные от них по любым входным параметрам атмосферы и поверхности, включая параметры индикатрисы рассеяния, вещественную и мнимую части показателя преломления вещества зеркально отражающей поверхности.

3. Предложена система тестов для моделей (компьютерных кодов) переноса рассеянного солнечного излучения.

4. Разработана новая модель переноса рассеянного теплового излучения с учетом его поляризации при отражении от поверхности.

5. Предложена новая модель оптических измерений с учетом спектрального интегрирования с аппаратной функцией прибора, аналогичная по сути известному k-методу, но не требующая громоздких предварительных расчетов.

6. Созданы и реализованы в виде компьютерных кодов новые универсальные алгоритмы расчета оптических характеристик (включая коэффициенты разложения в ряд по полиномам Лежандра) однородной сферической аэрозольной частицы без ограничений на размеры и значение комплексного показателя преломления вещества и расчета оптических характеристик ансамблей подобных частиц с автоматическим выбором сетки и пределов интегрирования.

7. Получено полное решение задачи расчета оптических характеристик двухслойной аэрозольной частицы с однородными ядром и оболочкой: предложен и реализован в виде компьютерного кода новый алгоритм расчета оптических характеристик указанных частиц без ограничений на их размеры и значения комплексного показателя преломления веществ ядра и оболочки.

8. Разработана феноменологическая теория образования ансамблей двухслойных аэрозольных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой.

9. В рамках применения указанной теории предложен принцип моделирования ансамблей двухслойных сферических аэрозольных частиц, сводящий задачу вычисления их оптических свойств к известным схемам интегрирования однородных сферических частиц. Создан соответствующий компьютерный код.

10. Разработана методика генерации статистических (стохастических) аэрозольных моделей.

11. В плане прикладной реализации указанной методики впервые предложены стохастические аэрозольные модели стратосферного и тропосферного (нескольких типов, включая приземный слой) аэрозолей.

12. Обобщены принципы параметризации индикатрисы рассеяния как функции угла: аналитические, эмпирические и микрофизические.

13. В плане прикладной реализации указанного обобщения впервые предложены три новые параметрические модели индикатрисы рассеяния: аналитическая, эмпирическая и микрофизическая.

14. Предложен новый подход к параметризации общей оптической модели аэрозоля (включая характеристики рассеяния, в частности, индикатрису) в случае доминирования в его составе одного вещества. Принципом указанной параметризации является применение кусочно-линейной аппроксимации с автоматическим (оформление в виде компь-

ютерной базы данных) выбором сетки дискретизации по микрофизическим параметрам, обеспечивающей требуемую точность.

Научная и практическая ценность. Применение результатов работы.

Разработанные автором диссертации общие схемы генерации моделей аэрозолей и поля рассеянного излучения для научного исследования задач дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля могут быть использованы для решения широкого круга задач оптики атмосферы и интерпретации данных ее дистанционного зондирования.

Конкретные модели поля рассеянного излучения и атмосферных аэрозолей, созданные автором диссертации на основе указанных общих теоретических положений в рамках решения прикладных задач дистанционного зондирования, а также соответствующие им компьютерные коды, могут быть использованы, уже были использованы и используются в настоящее время, при решении весьма широкого круга задач оптики атмосферы и интерпретации данных дистанционного зондирования.

Модель переноса излучения в сферической рассеивающей аэрозольной атмосфере (и соответствующий компьютерный код) использовалась в Институте физики Санкт-Петербургского государственного университета (НИИФ СПбГУ) для оценок информативности спутниковых измерений горизонта Земли. В настоящее время она используется в Институте космических исследований РАН (ИКИ РАН, г. Москва) в задачах моделирования поля излучения планет и интерпретации дистанционных измерений соответствующих характеристик поля излучения. Также эта модель (код) используется в Научно-исследовательском центре экологической безопасности РАН (НИЦЭБ РАН) в задачах моделирования поля излучения Земли для оценок влияния антропогенных аэрозольных и газовых примесей на энергетику и световой режим атмосферы.

Модель (и соответствующие компьютерные коды) расчета оптических характеристик ансамблей однородных и двухслойных сферических частиц применялась и применяется на физическом факультете СПбГУ, в том числе и в учебном процессе (выполнение курсовых и дипломных работ). Также эти модели (коды) используются в задачах моделирования оптических свойств атмосферных аэрозолей: в ИКИ РАН в целях расчета полей излучения планет и интерпретации дистанционных измерений поля излучения; в НИЦЭБ РАН в целях оценки влияния антропогенных аэрозолей на энергетику и световой режим атмосферы; в центре интегрирования информационных систем (ЦИИС) Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева (ИОА СО РАН) для решения различных задач; в лаборатории оптики и микрофизики аэрозоля Института физики атмосферы им. А.М. Обухова РАН (ИФА РАН) в задачах моделирования оптических свойств атмосферных аэрозолей в целях расчета радиационных

эффектов аэрозоля и интерпретации дистанционных измерений характеристик полей рассеянного излучения.

Статистическая аэрозольная модель стратосферы была использована в НИИФ СПбГУ для параметризации спектральной зависимости объемного коэффициента аэрозольного ослабления в рамках работ по обработке данных спутниковых измерений спектрометром “Озон-Мир” (борт российской орбитальной станции “Мир”). Там же (НИИФ СПбГУ) использовались статистические модели тропосферного аэрозоля, а также параметрические модели индикатрис рассеяния, в частности, автором диссертации при интерпретации данных самолетных измерений спектральных полусферических потоков солнечного излучения. В настоящее время одна из статистических моделей тропосферного аэрозоля (приземный слой) используется при разработке алгоритмов интерпретации данных лидарного зондирования в совместных работах Физического факультета СПбГУ и Белорусского государственного университета (БГУ).

Алгоритм параметризации спектральной зависимости оптических характеристик ансамблей полидисперсных аэрозольных сферических частиц с использованием кусочно-линейной аппроксимации по сетке микрофизических параметров реализован в виде компьютерных кодов и используется в ИКИ РАН в задачах анализа и учета оптических свойств атмосферных аэрозолей при интерпретации дистанционных измерений характеристик поля излучения планет.

Ряд разработанных моделей используются в учебном процессе. В частности, модель расчета оптических характеристик ансамблей однородных сферических частиц реализована в рамках соответствующего компьютерного кода в наборе студенческих вычислительных лабораторных работ.

Следует заметить, что все предложенные в диссертации теоретические разработки, модели и алгоритмы опубликованы в научной печати, следовательно, являются общедоступными для применения.

Следующие конкретные реализации моделей в настоящее время свободно (бесплатно) доступны в сети Интернет: средства расчета оптических характеристик ансамблей однородных сферических частиц реализованы в рамках программного обеспечения сайта “Атмосферный аэрозоль” ИОА СО РАН; адаптированный в ИКИ РАН к задачам моделирования полей излучения планет код переноса излучения в сферической атмосфере, а также реализация модели параметризации спектральной зависимости оптических характеристик аэрозоля в виде компьютерных кодов, созданных в ИКИ РАН доступны на сайте ИКИ РАН.

Достоверность результатов.

Научная обоснованность и достоверность полученных результатов (разработанных методов и моделей) подтверждается теоретической строгостью использованных в их алгоритмах формул, уравнений и соот-

ношений, разнообразным тестированием алгоритмов и соответствующих компьютерных кодов, включая проверку по специальным системам тестов (в том числе и разработанных автором диссертации), а также сравнением с результатами аналогичных независимых расчетов. При определении конкретных цифровых параметров аэрозольных моделей наряду с общепринятыми литературными источниками использовались и результаты их прямых измерений из архива Лаборатории физики аэрозолей (руководитель – Ивлев Л.С.) физического факультета СПбГУ, достоверность указанных результатов подтверждается высокой точностью измерений и тщательностью калибровок. На этом основании можно говорить о соответствии разработанных моделей экспериментальным данным.

Использование разработанных автором диссертации моделей в ряде конкретных задач интерпретации данных дистанционного зондирования явилось прямой практической проверкой их достоверности, подтвержденной сопоставлением полученных результатов с общепринятыми физическими представлениями, независимыми модельными данными и экспериментальными измерениями. С другой стороны, достоверность моделей автора диссертации предопределила и достоверность полученных результатов задач интерпретации.

Основные результаты и положения диссертационной работы, выносимые на защиту.

1. Разработанные алгоритмы комплекса моделей оптических измерений интенсивности поля рассеянного (солнечного и теплового) излучения в сферической атмосфере при различном отражении от поверхности при кусочно-линейной аппроксимации вертикальных профилей параметров атмосферы для любой геометрии визирования и освещения, включая расчет производных от интенсивности по любым входным параметрам атмосферы и поверхности.

2. Полученные формулы и соответствующий алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных аэрозольных частиц с однородными ядром и оболочкой, снимающие все ограничения на значения радиусов и комплексных показателей преломления ядра и оболочки.

3. Предложенная феноменологическая теория образования ансамблей аэрозольных двухслойных частиц с однородными ядром и оболочкой, формализующая методы расчета их оптических характеристик.

4. Разработанная методика генерации статистических (стохастических) микрофизических и оптических аэрозольных моделей.

5. Результаты реализации методики генерации статистических аэрозольных моделей в конкретных моделях стратосферы и тропосферы.

6. Разработанные различные варианты решения задачи параметризации индикатрисы, как функции угла рассеяния, и соответствующие им конкретные модели индикатрис.

7. Сформулированные принципы (общие алгоритмы) параметризации оптических характеристик атмосферных аэрозолей (включая индикатрису) при доминировании в составе аэрозолей определенного вещества.

Личный вклад.

Результаты (теоретические разработки, модели и алгоритмы) диссертационной работы получены автором лично. Для частей работы, выполненных с соавторами, в тексте диссертации конкретно указан личный вклад автора и соавторов. Так, в ряде случаев определенные числовые данные для моделирования были получены совместно с Ивлевым Л.С. (гл.3 и 4). В диссертации приведены примеры применения разработанных автором моделей. В этих случаях, когда работы нередко осуществлялись в рамках больших научных коллективов, лично автору диссертации принадлежит разработка алгоритмов моделирования переноса излучения и оптических характеристик аэрозолей. Части работ, связанные с их применением к конкретным задачам выполнялись обычно соавторами (Поляков А.В., Майоров Б.С.). Опять же, в соответствующих местах текста диссертации, а также ниже в автореферате, все подобные случаи соавторства подробно описаны.

Апробация работы.

Основные результаты работы, выполнявшейся в течении примерно 20 лет, докладывались на следующих международных и российских научных конференциях:

Первая рабочая группа "Аэрозоли Сибири". Томск, 21-23 ноября 1994г.

Третий межреспубликанский симпозиум "Оптика атмосферы и океана". Томск, 2-5 июля 1996г.

23rd European meeting on atmospheric studies by optical methods. Kiev, Ukraine, 2-6 september 1996.

Пятый международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана". Томск, 15-18 июня 1998г.

Пятая рабочая группа "Аэрозоли Сибири". Томск, 24-27 ноября 1998г.

Шестой международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана". Томск, 23-26 июня 1999г.

Международный симпозиум стран СНГ "Атмосферная радиация". Санкт-Петербург, 12-15 июля 1999г.

Вторая международная конференция "Естественные и антропогенные аэрозоли". Санкт-Петербург, 27 сентября – 1 октября 1999г.

Седьмой международный симпозиум "Оптика атмосферы и океана". Томск, 16-19 июля 2000г.

Международная конференция "Прикладная оптика 2000", Санкт-Петербург, 17 – 19 октября 2000г.

Седьмая рабочая группа "Аэрозоли Сибири". Томск, 28 ноября - 1 декабря 2000г.

Третья международная конференция “Естественные и антропогенные аэрозоли”. Санкт-Петербург, 24 – 27 сентября 2001г.

Международный симпозиум стран СНГ "Атмосферная радиация" (МСАР-04). Санкт-Петербург, 21-23 июня 2002г.

International Radiation Symposium IRS2004. Current Problems in Atmospheric Radiation. August 23-28, 2004, Busan, Korea.

Международная конференция памяти В.И. Мороза. ИКИ, Москва, 16, 19 октября 2006.

European Planetary Science Congress 2008. 21-26 September 2008, Munster Germany.

Шестая международная конференция “Естественные и антропогенные аэрозоли, Санкт-Петербург, 7-10 октября 2008г.

Восьмая международная научно-техническая конференция по квантовой электронике. 13-15 октября 2008г., г.Минск.

Публикации.

Все авторские материалы, включенные в диссертацию, опубликованы в научной печати – 35 работ, из них – 12 без соавторов. По основным результатам диссертации опубликована монография [1] (в соавторстве с Мельниковой И.Н.), впоследствии изданная на английском языке [2] (изд-во Springer), и 22 статьи [3-24] в журналах, включенных в перечень ведущих рецензируемых научных журналов и изданий, рекомендованных ВАК.

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из пяти глав, введения, заключения, двух приложений и списка литературы. Общий объем работы составляет 397 страниц, включая 20 рисунков и 11 таблиц. Список литературы содержит 408 наименований.

Содержание работы.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, формулируется общая цель работы, ставятся вытекающие из нее задачи работы. Здесь же приводятся основные результаты работы, отмечается их научная и практическая ценность, формулируются основные положения, выносимые на защиту, указывается личный вклад автора в полученные результаты, дается информация об апробации работы и публикациях ее основных результатов.

1. Теоретические основы моделирования поля рассеянного излучения в атмосфере.

Первая глава является вводной. В ней приводятся известные понятия и соотношения, широко используемые в дальнейших главах и являющиеся базовыми для излагаемых в диссертации моделей переноса излучения. При этом, однако, материал первой главы изложен в виде, адап-

тированном для непосредственного применения в задачах моделирования переноса излучения в атмосфере, в чем состоит элемент новизны.

Приводятся определения основных понятий, используемых при моделировании оптических измерений в атмосфере: интенсивности и потока излучения. Вводится сферическая геоцентрическая система координат для описания как собственно поля излучения, так и его измерений оптическими приборами. Осуществляется переход к приближению плоской параллельной атмосферы. На основе указанных понятий формулируется математическая модель оптического измерительного прибора (свертка монохроматической интенсивности с аппаратной функцией), приводится набор стандартных спектральных аппаратных функций.

Формулируется задача моделирования переноса излучения в атмосфере, как определения трансформации его интенсивности по пути от источника к измерительному прибору. Приводится дифференциальное уравнение переноса излучения и связанные с ним понятия функции пропускания, оптического расстояния, функции источников. Определяется трасса распространения излучения в сферической атмосфере и приводятся все необходимые для ее описания геометрические соотношения. Рассматривается явление атмосферной рефракции и алгоритмы ее учета при расчете трасс распространения излучения. Производится переход к приближению плоской атмосферы и приводится необходимая сводка формул моделирования переноса излучения для нее. Рассматривается перенос равновесного теплового излучения в атмосфере.

Приводятся понятия, связанные с моделированием рассеяния излучения и уравнение переноса для рассеянного солнечного излучения в атмосфере. Рассматривается приближение однократного рассеяния солнечного излучения для плоской и сферической атмосферы, в последнем случае подробно расписываются все необходимые геометрические формулы и алгоритмы для общего случая произвольного расположения источника (солнца) и измерительного прибора. Для анализа общего случая многократного рассеяния применяется операторный подход, удобный именно с точки зрения математического моделирования переноса рассеянного излучения.

Рассматривается явление поляризации излучения и необходимые для моделирования переноса и рассеяния поляризованного излучения понятия. Приводятся общие и конкретные модели отражения излучения от подстилающей поверхности (изотропная и идеальная зеркальная), а также модели собственного излучения поверхности. Характеристики взаимодействия излучения с веществом атмосферы и поверхности вводятся и рассматриваются как внешние входные данные, необходимые для моделирования переноса излучения, кратко формулируется задача их определения и расчета.

Описание методов учета поверхности в моделях переноса излучения начинается с рассмотрения частных, но практически важных случаев пренебрежения рассеянием для теплового излучения и приближений однократного рассеяния и отражения для солнечного излучения.

В последнем случае для модели идеально зеркально отражающей поверхности имеем соотношение

$$I(z, \vartheta, \varphi) = I^{(2)}(z, \vartheta, \varphi) + I^{(3)}(z, \vartheta, \varphi) + I^{(4)}(z, \vartheta, \varphi) + I^{(5)}(z, \vartheta, \varphi) \quad (1)$$

где $I(z, \vartheta, \varphi)$ – искомая интенсивность излучения, зависящая от высоты z , зенитного угла ϑ и азимута φ . Четыре компоненты, составляющие $I(z, \vartheta, \varphi)$ есть: $I^{(2)}(z, \vartheta, \varphi)$ – однократно рассеянное в атмосфере излучение; $I^{(3)}(z, \vartheta, \varphi)$ – излучение, отраженное от поверхности после однократного рассеяния; $I^{(4)}(z, \vartheta, \varphi)$ – излучение, однократно рассеянное после отражения от поверхности; $I^{(5)}(z, \vartheta, \varphi)$ – излучение, отраженное от поверхности, до этого однократно рассеянное после отражения от поверхности (два отражения).

В приближении плоской атмосферы моделирование и вычисление четырех указанных компонент несложно (соответствующие формулы подробно расписаны в диссертации). В сферическом случае предлагается следующая новая модель, точно учитывающая все особенности сферической геометрии при любых положениях источника излучения (солнца) и прибора.

Для каждой локальной точки трассы распространения излучения необходимо индивидуальное моделирование геометрии отражения. Поэтому компоненты рассеяния $I^{(2)}(z, \vartheta, \varphi)$ и отражения $I^{(4)}(z, \vartheta, \varphi)$ вычисляются совместно, что приводит к набору формул

$$\begin{aligned} I^{(2+4)}(z, \eta, \varphi) &= \frac{F_0}{4\pi} \int_{l_1}^{l_2} \sigma(z(l)) P(l) (x(z(l), \chi_0(l)) P_0(l) + \\ &+ \Theta(\eta_0(l) - \eta''(l)) x(z(l), \chi_0'(l)) r(\eta_0''(l)) P_0'(l) P'(l)) dl, \\ I^{(2+4)}(z, \vartheta, \varphi) &= I^{(2)}(z, \vartheta, \varphi) + I^{(4)}(z, \vartheta, \varphi), \quad \eta''(l) = \frac{\sqrt{(2R + z(l) + z_0)(z(l) - z_0)}}{R + z(l)}, \\ \chi_0'(l) &= -\eta_0'(l) \eta(l) + \sqrt{(1 - (\eta_0'(l))^2)(1 - \eta^2(l))} \cos(\varphi - \varphi_0(l)), \\ \eta_0''(l) &= \frac{\sqrt{(R + z_0)^2 - (R + z(l))^2 (1 - (\eta_0'(l))^2)}}{R + z_0}, \\ P_0'(l) &= \exp \left(- \int_{(R+z_0)\eta_0'(l)}^{\sqrt{(R+z_0)^2 - (R+z_0)^2 (1 - (\eta_0''(l))^2)}} \alpha(\sqrt{(l')^2 + (R + z_0)^2 (1 - (\eta_0''(l))^2)} - R) dl' \right), \\ P'(l) &= \exp \left(- \int_{-(R+z(l))\eta_0'(l)}^{-\sqrt{(R+z_0)^2 - (R+z(l))^2 (1 - (\eta_0'(l))^2)}} \alpha(\sqrt{(l')^2 + (R + z(l))^2 (1 - (\eta_0'(l))^2)} - R) dl' \right). \end{aligned} \quad (2)$$

Здесь $\eta = \cos \vartheta$, F_0 – внеатмосферный спектральный поток солнечного излучения, l_1, l_2 – пределы интегрирования, определяемые освещенным участком трассы распространения рассеянного излучения, l – координата вдоль этой трассы, $\sigma(z)$ – объемный коэффициент рассеяния, $P(l)$ – функция пропускания от точки рассеяния до прибора, χ_0 – косинус угла рассеяния, $x(z, \chi_0)$ – индикатриса рассеяния, $P_0(l)$ – функция пропускания от точки рассеяния до верхней границы атмосферы (“солнца”), $\eta_0(l)$ – косинус зенитного угла солнца, $\eta''(l)$ – предельное значение $\eta_0(l)$ при котором возможно отражение, $\Theta(t)=1$, если $t \geq 0$ и $\Theta(t)=0$, если $t < 0$ (функция Хэвисайда), $\chi_0'(l)$ – косинус угла рассеяния для отраженного от поверхности излучения, $\eta_0''(l)$ – косинус зенитного угла солнца (он же – угла падения и отражения) в точке отражения от поверхности, $r(\eta_0''(l))$ – коэффициент (зеркального) отражения поверхности, $P_0'(l)$ – функция пропускания на трассе от точки отражения до верхней границы атмосферы (“солнца”), R – радиус Земли, z_0 и z_∞ – высоты нижней и верхней границ атмосферы, $\eta(l)$ – косинус зенитного угла визирования на трассе распространения рассеянного излучения, $\eta_0'(l)$ – косинус отраженного от поверхности излучения на этой трассе, $\varphi_0(l)$ – азимут солнца на этой трассе, $\alpha(z)$ – объемный коэффициент ослабления атмосферы.

Для нахождения $\eta_0'(l)$ из условий зеркального отражения следует уравнение

$$\begin{aligned} (R + z(l))\eta_0(l) - ((R + z(l))\eta_0'(l) + l'(\eta_0'(l)))\chi_0(\eta_0'(l)) + l'(\eta_0'(l)) &= 0, \\ l'(\eta_0'(l)) &= -\sqrt{(R + z_0)^2 - (R + z(l))^2(1 - (\eta_0'(l))^2)}, \\ \chi_0(\eta_0'(l)) &= \eta_0(l)\eta_0'(l) - \sqrt{(1 - (\eta_0(l))^2)(1 - (\eta_0'(l))^2)} \end{aligned} \quad (3)$$

Которое решается численно по формуле Ньютона

$$\begin{aligned} \eta_0'(l)_k &= \eta_0'(l)_{k-1} - \frac{f(\eta_0'(l)_{k-1})}{f'(\eta_0'(l)_{k-1})}, \quad \eta_0'(l)_0 = \eta_0(l), \\ f(\eta) &= (R + z(l))\eta_0(l) - ((R + z(l))\eta + l'(\eta))\chi_0(\eta) + l'(\eta), \\ f'(\eta) &= -(R + z(l) + l''(\eta))\chi_0(\eta) - ((R + z(l))\eta + l'(\eta))\chi_0'(\eta) + l''(\eta), \\ l''(\eta) &= \eta \frac{(R + z(l))^2}{l'(\eta)}, \quad \chi_0'(\eta) = \eta_0(l) + \eta \sqrt{\frac{1 - (\eta_0(l))^2}{1 - \eta^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

где k – номер итерации. Итерации по (4) продолжаются, пока разность между двумя соседними не станет достаточно малой (конкретно использовано значение 0.001).

Отметим, что помимо рассмотренного здесь случая приближения однократного рассеяния, предложенная модель отражения (2)-(4) используется в диссертации в алгоритме метода Монте-Карло моделирования рассеянного излучения для траекторий отдельных фотонов.

Далее в продолжении первой главы рассматривается общий случай учета многократного рассеяния и отражения от поверхности. Здесь вновь использован операторный подход, который, в конечном счете позволяет записать искомую интенсивность I в виде

$$I = T_0(1 + R_1 T_0)B_0 + T_0(1 + R_1 T_0)T_s B_0 + T_0(R_1 T_0 T_s + (R_1 T_0 T_s)^2 + \dots)R_1 T_0 B_0 + T_0(R_1 T_0 T_s + (R_1 T_0 T_s)^2 + \dots)R_1 T_0 T_s B_0, \quad (5)$$

где T_0 – оператор переноса прямого излучения, R_1 – оператор отражения от поверхности, B_0 – функция источников, T_s – оператор однократного рассеяния.

Четыре слагаемых в формуле (5) имеют четкий физический смысл: первое – вклад прямого излучения с учетом однократного отражения, второе – вклад рассеянного излучения с учетом однократного отражения, третье – вклад многократных отражений от отраженного и рассеянного прямого излучения, четвертое – вклад многократных отражений от рассеянного излучения. Последние два вклада обычно достаточно малы и в ряде прикладных задач могут не приниматься во внимание. Заметим, что первые члены ряда (5) содержат все рассмотренные выше приближения.

В заключение первой главы подробно описывается конкретный метод моделирования переноса излучения в атмосфере – метод Монте-Карло. Причем описание идет в “физическом” стиле, когда каждой операции и модификации метода приписывается физический смысл. Рассматриваются модели с усреднением поглощения и вылета фотона из среды (моделирование “без поглощения и вылета”), простые локальные оценки для потоков и интенсивностей, моделирование по обратным траекториям (“от приемника”), схема зависимых испытаний.

2.Комплекс моделей оптических измерений в атмосфере.

Во второй главе описывается конкретный комплекс моделей оптических измерений в атмосфере, разработанный автором диссертации.

В начале главы показано отличие понятия “модель переноса излучения” от теоретического материала монографий по теории переноса излучения и от радиационных кодов – конкретных компьютерных реализаций моделей. На основе критического анализа указанного материала и поставленных в диссертации общих целей и задач формулируются следующие конкретные задачи моделирования:

1)Разработка единой комплексной модели (единого комплекса моделей) оптических измерений в атмосфере от ультрафиолетового до микроволнового диапазонов, для любых состояний атмосферы (облачная – безоблачная), поверхности (различные модели отражения), геометрии визирования, освещения, переноса излучения, аппаратуры (учет различных аппаратных функций).

2)Использование в комплексной модели вычислительных методов теории переноса излучения, обладающих свойствами физической наглядности и гибкости, что даст возможность применять модель в научно-исследовательских задачах дистанционного зондирования аэрозолей, где необходимо объяснение физического смысла полученных результатов и анализ точности возможных упрощений и приближений.

3)Аналитический расчет производных от моделируемых величин по любым входным параметрам атмосферы и поверхности.

4)Использование физически обоснованных аппроксимаций вертикальных профилей параметров атмосферы, в частности – непрерывных функций (вместо разрывных кусочно-постоянных).

Решению указанных задач посвящены главы 1 и 2, а также приложение 1 (расчет производных от моделируемых величин) диссертации.

Существенной новой особенностью приводимых в диссертации моделей оптических измерений в атмосфере является кусочно-линейная аппроксимация вертикальных профилей параметров, которая, очевидно, более адекватна реальности, чем стандартно используемая кусочно-постоянная. Для кусочно-линейной аппроксимации получены аналитические формулы расчета оптического пути как в плоской, так и сферической геометрии, а также алгоритмы взаимного пересчета геометрических и оптических координат.

Модель поля рассеянного солнечного излучения в атмосфере. Формально (в сферическом случае) рассматривается произвольная геометрия как освещения, так и направления визирования, что соответствует всем возможным схемам измерений (из космоса, с поверхности, внутри атмосферы, касательные, сумеречные и т.д.).

Для приближения однократного рассеяния используются расписанные в первой главе диссертации формулы и алгоритмы. Для учета многократного рассеяния как в плоской, так и в сферической геометрии, используется метод Монте-Карло; в диссертации приведен соответствующий конкретный алгоритм (в виде последовательности семи операций).

Модели поля рассеянного солнечного излучения для облаков различных форм. В современных работах поле разорванной облачности рассматривается как составная часть атмосферы, и перенос излучения моделируется в общей стохастической среде. Однако такие модели существенны для решения задач энергетики атмосферы. Применительно же к задачам дистанционного зондирования имеет смысл вернуться к классической постановке задачи взаимодействия излучения с единственным облаком определенной формы. Это связано с возможностью описания его небольшим числом параметров и, следовательно, с возможностью исследования, в рамках модели, зависимости характеристик излучения от этих параметров с дальнейшим использованием полученной параметризации в задачах интерпретации оптических измерений (измеряем ха-

рактеристики поля излучения конкретного облака и определяем его оптические параметры).

В рамках диссертации предложена модель расчета любых характеристик поля излучения (интенсивности, потока, притока) для выпуклой геометрической фигуры, которая аппроксимирует облако, причем как вне фигуры, так и внутри ее.

Используется метод Монте-Карло (ММК), причем применение современных принципов математического моделирования (инкапсуляция данных, наследование и полиморфизм) позволили разделить операции переноса излучения в рамках ММК и конкретику их для конкретного геометрического объекта. То есть для единой модели ММК могут быть созданы разнообразные конкретные объекты (шар, куб, плоский слой и т.п.). Образно, созданную модель ММК можно рассматривать как единый инструмент, а конкретные геометрические объекты – как разные насадки к нему.

Модель поля равновесного теплового излучения с учетом его рассеяния и поляризации. Задача учета рассеяния теплового излучения является актуальной в связи с появлением высокоточных приборов, предназначенных для измерений интенсивности теплового излучения в инфракрасной и микроволновой областях спектра, для которых встает задача адекватного и столь же точного физико-математического моделирования выходных данных указанных приборов. Важным этапом повышения адекватности алгоритмов моделирования измерений является учет многократного рассеяния теплового излучения атмосферными аэрозолями, облаками и осадками.

В основе созданной и приведенной в диссертации модели переноса рассеянного теплового излучения с учетом взаимодействия с поверхностью и поляризации лежит метод последовательных приближений – приведенное выше соотношение (5). Метод удобен тем, что обеспечивает каждой операции простой физический смысл и позволяет определять необходимое число итераций исходя из условий и потребностей конкретной задачи. В тексте диссертации приведен конкретный алгоритм соответствующей модели (в виде последовательности из одиннадцати операций).

Далее рассматривается проблема частотного интегрирования, возникающая при моделировании измерений реальными приборами.

Для этого требуется не просто расчет монохроматического поля излучения, а получение определенных интегральных по спектру характеристик излучения. В приближении влияния на результаты измерений только спектральной аппаратной функции прибора, имеем:

$$I(\Delta\nu, z, \vartheta, \varphi) = \int_{\nu_1}^{\nu_2} I(\nu', z, \vartheta, \varphi) f(\nu') d\nu' \bigg/ \int_{\nu_1}^{\nu_2} f(\nu') d\nu', \quad (6)$$

где (z, ϑ, φ) – высота, зенитный угол и азимут визирования, $f(\nu)$ – аппаратная функция измерительного прибора, $I(\Delta\nu, z, \vartheta, \varphi)$ – интенсивность на выходе прибора (моделируемая величина), $I(\nu, z, \vartheta, \varphi)$ – монохроматическая интенсивность на входе прибора с частотой ν .

Приводится общий обзор методов вычисления (6) и далее предлагается новый метод, идеологически близкий к известному k-методу, но не требующий громоздких предварительных расчетов. Он, также как и k-метод, основан на группировке при вычислении интеграла (6) точек сетки не по принципу близости частот ν , а по принципу близости значения подынтегральной функции.

Пусть интервал $[\nu_1, \nu_2]$ достаточно мал, так, что внутри него можно пренебречь спектральными зависимостями всех параметров, кроме объемного коэффициента поглощения $\kappa(\nu)$. В каждом конкретном расчете по (6) все параметры атмосферы (профили температуры, давления, концентрации поглощающих излучения газов, характеристики аэрозолей) заданы и фиксированы. Следовательно, профиль $\kappa(\nu, z)$ при вычислении монохроматической интенсивности $I(\nu, z, \vartheta, \varphi)$ зависит только от частоты ν . Пусть при интегрировании (6) интенсивность $I(\nu_i', z, \vartheta, \varphi)$ соответствует вертикальному профилю $\kappa(\nu_i', z)$. Сохраним интенсивность и профиль в памяти компьютера, исключив при этом информацию о частоте, т.е. перейдем к величинам $I_i(z, \vartheta, \varphi)$ и $\kappa_i(z)$. Пусть теперь при вычислении для очередной частоты ν_j' профиль $\kappa(\nu_j', z)$ оказался достаточно близок к профилю $\kappa_i(z)$, например, для всех z

$$|\kappa(\nu_j', z) - \kappa_i(z)| < \varepsilon, \quad (7)$$

где ε – некоторый параметр, определяющий точность метода. Тогда, вместо вычисления $I(\nu_j', z, \vartheta, \varphi)$ по алгоритму с учетом рассеяния, используется вариационное приближение

$$I(\nu_j', z, \vartheta, \varphi) = I_i(z, \vartheta, \varphi) + \int_{z_0}^{z_\infty} \frac{\delta I_i(z', \vartheta, \varphi)}{\delta \kappa_i(z')} (\kappa(\nu_j', z') - \kappa_i(z')) dz'. \quad (8)$$

Разумеется, при реальных расчетах интеграл в (8) заменяется квадратурной суммой, а вариационная производная $\frac{\delta I_i(z', \vartheta, \varphi)}{\delta \kappa_i(z')}$ – вектором частных производных от интенсивности по объемному коэффициенту поглощения в каждом узле интегрирования.

Общая логика алгоритма элементарна – по мере прохода узлов частотного интегрирования в (6) профиль $\kappa(\nu_j', z)$ сравнивается со всеми хранящимися в памяти компьютера профилями $\kappa_i(z)$, $i=1, \dots, L$ и если

найден номер i , для которого выполняется условие близости (7), то искомая интенсивность рассеянного излучения $I(v_j', z, \vartheta, \varphi)$ вычисляется по (8), многократно быстрее, чем по алгоритму, учитывающему рассеяние. Иначе, если условие (7) не выполнено ни для одного $\kappa_i(z)$, $i=1, \dots, L$, то $I(v_j', z, \vartheta, \varphi)$ вычисляется с учетом рассеяния и производится запоминание $I_{L+1}(z, \vartheta, \varphi) \equiv I(v_j', z, \vartheta, \varphi)$, $\frac{\delta I_{L+1}(z, \vartheta, \varphi)}{\delta \kappa_{L+1}(z)} \equiv \frac{\delta I(v_j', z, \vartheta, \varphi)}{\delta \kappa(v', z)}$ и $\kappa_{L+1}(z) \equiv \kappa(v_j', z)$.

Хранение указанной совокупности данных в памяти компьютера не создает проблем с учетом их современных ресурсов.

Алгоритмы расчета производных, необходимых для вычислений по (8) приведены в приложении 1 диссертации.

Реализацией моделей оптических измерений в атмосфере является разработанный автором диссертации компьютерный код SCATRD. В текущей версии (на момент написания диссертации) он предназначен для расчета интенсивности монохроматического солнечного излучения в атмосфере (как плоской, так и сферической) для произвольной геометрии освещения и визирования, а также производных от нее по любым входным параметрам моделей атмосферы и поверхности.

В связи с задачей тестирования кода SCATRD рассматривается общий подход к тестированию радиационных кодов, для чего предлагается система из 7 тестов. Рассматривается сравнение результатов расчетов по коду SCATRD с данными независимых расчетов, в результате получено среднее отклонение 3.5%, соответствующее “стандартам” для кодов, моделирующих рассеянное солнечное излучение (2-4%). Отметим большую адекватность реальности кода SCATRD из-за использования в нем кусочно-линейной аппроксимации вертикальных профилей (вместо кусочно-постоянной в других кодах).

В заключении второй главы приводятся примеры использования моделей автора диссертации и компьютерного кода SCATRD для оценки информативности определения параметров атмосферного аэрозоля по полю рассеянного излучения в схеме лимбового зондирования горизонта Земли и в задачах моделирования дистанционных оптических измерений планеты Марс.

3. Общие модели генерации оптических характеристик атмосферных аэрозолей по их микрофизическим параметрам.

В начале третьей главы рассматривается общая задача генерации оптических характеристик атмосферных аэрозолей по заданным микрофизическим параметрам. Далее приводятся конкретные модели, разработанные автором диссертации.

Для однородных частиц изложение начинается с известной теории Ми – раздел 3.2, но основное содержание этого раздела посвящено описа-

нию вычислительного алгоритма, свободного от ограничений на размеры частицы. Этот алгоритм, предложенный автором диссертации, является объединением, компиляцией, нескольких методов вычислений, в чем и состоит элемент новизны.

Все дальнейшее содержание гл.3 – это новые, впервые разработанные автором диссертации алгоритмы (модели), включающие в том числе и вывод новых формул для двухслойных частиц и их ансамблей.

В разделе 3.3 приведен новый оригинальный алгоритм расчета оптических характеристик ансамблей однородных частиц с автоматическим выбором пределов и стеки интегрирования. Кроме того, приводится справка по аналитическим функциям распределений аэрозольных частиц по размерам и их математическим свойствам (приложение 2).

Автором диссертации впервые полностью решена задача построения алгоритма расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой, снимающего все ограничения на размеры и структуру частицы (раздел 3.4). В частности, этот алгоритм позволяет провести вычисление оптических характеристик капель облаков с сажевой оболочкой (раздел 3.7).

В разделе 3.5 описывается феноменологическая теория образования двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой, разработанная автором диссертации в ходе решения указанных задач. В нем рассматривается общий подход к моделированию оптических характеристик ансамблей двухслойных сфер, вводятся абстрактные понятия функций внутренней структуры частицы и коэффициентов проникновения веществ ядра и оболочки частицы друг в друга.

Однако, эта тема не ограничивается общим анализом и в разделе 3.6 приводятся разнообразные конкретные модели процессов образования оболочек на частицах, включая созданные автором. В рамках предложенного подхода интегрирование по ансамблям двухслойных частиц удалось свести к известным алгоритмам интегрирования по ансамблям однородных.

В диссертации мы ограничились лишь двумя указанными типами частиц, более сложные – несферические частицы не рассматриваются. Если следовать стилю данной диссертации, то надо говорить об общих, универсальных, свободных от ограничений на параметры, методах расчета оптических характеристик аэрозольной частицы. Однако для несферических частиц в настоящее время отсутствуют алгоритмы, свободные от подобных ограничений. Другим, не менее серьезным препятствием для использования моделей несферических частиц является необходимость вычислений их оптических параметров не для отдельных частиц, а для их ансамблей. Для определения вида функций распределения несферических частиц по форме и ориентации требуется достаточная статистика сложных прямых измерений, поэтому подобные функции даже для та-

ких распространенных объектов, как частицы ледяных облаков, предложены лишь в небольшом числе работ. Наконец, для задач пассивного дистанционного зондирования, на анализе которых, в основном, строится диссертация, учет свойств несферических частиц все же не столь актуален, как, например, для лидарного зондирования. Действительно, из общих физических соображений понятно, что в поле многократно рассеянного излучения интенсивность, формируемая различными углами рассеяния на аэрозольных частицах, оказывается достаточно “перемешанной”, в результате чего влияние особенностей индикатрис и матриц рассеяния, вызванных несферическими свойствами частиц, нивелируется, “стирается”.

Приведем некоторые основные соотношения третьей главы, впервые полученные автором диссертации.

Для двухслойной частицы “шар в оболочке” трудности практического моделирования оптических свойств, приводящие к ограничению на возможные значения параметров, возникают из-за наличия в формулах помимо функции $D_k(z)$, алгоритмы вычисления которой хорошо известны (обратная рекурсия, непрерывная дробь), второй аналогичной функции $C_k(z) = \chi'_k(z) / \chi_k(z)$ (логарифмическая производная функций Риккати-Бесселя). При этом для $C_k(z)$ получается совпадающее с $D_k(z)$ рекуррентное соотношение, что не позволяет использовать обратную рекурсию (получим $C_k(z) = D_k(z)$, что неверно).

Автором диссертации было замечено, что из связи начальных значений

$$C_0(z) = -\operatorname{tg} z = -1/\operatorname{ctg} z = -1/D_0(z) = D_{-1}(z), \quad (9)$$

и рекуррентного соотношения для функции $C_k(z)$ непосредственно следует, что

$$C_k(z) = D_{-k-1}(z). \quad (10)$$

Соотношение (10) позволяет ограничиться рассмотрением только функции $D_k(z)$ с любыми целыми значениями индекса. Для вычислений $D_k(z)$ при отрицательных значениях k использована обратная рекурсия. При этом была проверена устойчивость этих расчетов путем сравнения результатов рекурсии с найденными через непрерывную дробь и получено совпадение практически всех значащих цифр при любых реальных значениях вещественной и мнимой частей z .

С учетом изложенного формулы для коэффициентов рядов Ми a_k и b_k преобразованы к виду

$$a_k = \frac{(c_k / \tilde{m}_2 + k / y) \psi_n(y) - \psi_{n-1}(y)}{(c_k / \tilde{m}_2 + k / y) \xi_n(y) - \xi_{n-1}(y)}, \quad b_k = \frac{(\tilde{m}_2 d_k + k / y) \psi_n(y) - \psi_{n-1}(y)}{(\tilde{m}_2 d_k + k / y) \xi_n(y) - \xi_{n-1}(y)},$$

$$A_k = \frac{\tilde{m} D_k(\tilde{m}_1 x) - D_k(\tilde{m}_2 x)}{\tilde{m} D_k(\tilde{m}_1 x) - D_{-k-1}(\tilde{m}_2 x)}, \quad B_k = \frac{D_k(\tilde{m}_1 x) / \tilde{m} - D_k(\tilde{m}_2 x)}{D_k(\tilde{m}_1 x) / \tilde{m} - D_{-k-1}(\tilde{m}_2 x)},$$

$$\begin{aligned}
c_k &= \frac{D_k(\tilde{m}_2 y) - D_{-k-1}(\tilde{m}_2 y) A_k F_k(\tilde{m}_2 x, \tilde{m}_2 y)}{1 - A_k F_k(\tilde{m}_2 x, \tilde{m}_2 y)}, \\
d_k &= \frac{D_k(\tilde{m}_2 y) - D_{-k-1}(\tilde{m}_2 y) B_k F_k(\tilde{m}_2 x, \tilde{m}_2 y)}{1 - B_k F_k(\tilde{m}_2 x, \tilde{m}_2 y)}, \\
F_k(z_1, z_2) &= F_{k-1}(z_1, z_2) \frac{(D_{-k-1}(z_1) + k/z_1)(D_k(z_2) + k/z_2)}{(D_k(z_1) + k/z_1)(D_{-k-1}(z_2) + k/z_2)}, \\
F_1(z_1, z_2) &= g^3 \frac{1 + (z_2 + z_2^3) D_1(z_2)}{1 + (z_1 + z_1^3) D_1(z_1)}, \quad y = 2\pi \tilde{m}_A r / \lambda, \quad x = gy, \quad \tilde{m}_1 = \tilde{m}_1' / \tilde{n}_A, \\
\tilde{m}_2 &= \tilde{m}_2' / \tilde{n}_A.
\end{aligned} \tag{11}$$

Здесь $\tilde{n}_A$ – показатель преломления среды, r – радиус частицы, λ – длина волны излучения, g – отношение радиусов ядра и оболочки, $\tilde{m}_1'$ и $\tilde{m}_2'$ – комплексные показатели преломления (КПП) веществ ядра и оболочки, $\tilde{m} = \tilde{m}_2 / \tilde{m}_1$.

Результаты работы описанного выше алгоритма проверялись при различных значениях параметров, вплоть до $y = 400000$. Получено полное согласие со всеми физическими тестами (9 тестов – приведены в диссертации).

Рассмотрим теперь ансамбли двухслойных частиц с однородными ядром и оболочкой. Автор диссертации предложена феноменологическая теория образования подобных частиц, основанная на следующих трех известных предположениях:

- 1) физические процессы образования подобных частиц таковы, что все параметры частицы определяются ее полным радиусом;
- 2) существует независимое от оболочки распределение ядер, т.е. физическая модель предполагает наличие условий, когда оболочка отсутствует;
- 3) процесс трансформации ядер в двухслойные частицы описывается линейной функцией

$$r = q_1(p_1, p_2, \dots, p_n) r_c + q_2(p_1, p_2, \dots, p_n), \tag{12}$$

где r_c – радиус ядра, $p_1, p_2, \dots, p_n$ – параметры модели образования оболочки.

В процессе образования оболочки, размеры ядра частицы, а также КПП веществ ядра и оболочки могут меняться, например, вследствие растворения ядра. Для учета этих процессов введем еще три функции

$$g = q_3(r), \quad \tilde{m}_1 = q_4(r, \tilde{m}_c, \tilde{m}_s), \quad \tilde{m}_2 = q_5(r, \tilde{m}_c, \tilde{m}_s), \tag{13}$$

где $\tilde{m}_c$ – КПП исходного вещества ядра и $\tilde{m}_s$ – КПП исходного вещества, из которого образуется оболочка.

В результате формула для интегрирования по ансамблю двухслойных частиц принимает вид

$$\alpha^{(a)} = \pi n_a \int_0^\infty r^2 Q_e(r, q_3(r), q_4(r, \tilde{m}_c, \tilde{m}_s), q_5(r, \tilde{m}_c, \tilde{m}_s)) f(r/q_1 - q_2/q_1) dr, \quad (14)$$

где $\alpha^{(a)}$ – объемный коэффициент аэрозольного ослабления, Q_e – фактор ослабления двухслойной частицы, n_a – концентрация частиц.

Таким образом, задача описания ансамбля двухслойных частиц свелась выбору исходной функции распределения ядер $f(r)$ и к построению для конкретных ситуаций набора из пяти функций внутренней структуры $q_1 - q_5$, зависящих от параметров модели. Отметим, что формально отличие выражения (14) от известных моделей для однородных частиц заключается только в наличии пяти функций внутренней структуры, все остальное, в частности – алгоритм интегрирования (14) остается неизменным. То есть фактически случай ансамблей двухслойных частиц в указанном смысле сведен к известному классическому случаю ансамблей однородных.

В рамках предложенной феноменологической теории приводятся общие модели функций внутренней структуры, учитывающие взаимодействия ядра и оболочки: разрушение и всплытие ядра, взаимное проникновение веществ ядра и оболочки друг в друга. Далее эти общие модели наполняются конкретным содержанием при рассмотрении физических процессов образования оболочек: обводнении, включая учет растворения ядра; образование оболочки из серной кислоты на стратосферных частицах; различные случаи адсорбции оболочки; образование оболочек постоянной толщины.

В конце третьей главы описано применение модели двухслойных частиц для моделирования так называемого “избыточного поглощения в облаках”. Показано, что при больших, но реально возможных концентрациях сажи, модель водяной капли с сажевой оболочкой дает вполне согласующиеся с экспериментом значения альбедо однократного рассеяния облака.

4.Методика генерации статистических оптических аэрозольных моделей и ее приложения.

Четвертая глава посвящена задаче моделирования естественной изменчивости оптических характеристик атмосферных аэрозолей. Дается обзор работ в этой области, показано, что автором диссертации одним из первых созданы модели, в которых варьировался весь комплекс исходных параметров микрофизики аэрозолей.

Приводится общая методика генерации статистических аэрозольных моделей, предложенная автором диссертации.

Аэрозоль рассматривается как случайная система, описываемая совокупностью дискретных и непрерывных случайных величин. Заметим, что “случайную систему” не следует понимать как полный отказ от по-

пытках детерминированного описания аэрозоля. Просто в рамках рассматриваемых моделей случайная компонента превалирует, что позволяет учесть в ней (“включить в нее”) и ряд детерминированных зависимостей, например, от влажности воздуха. Очевидно, что можно рассматривать и смешанные модели, как с детерминированной зависимостью от параметров, так и со стохастической частью (это общий современный подход к математическому моделированию природных процессов).

Для компонент случайной системы задаются модели статистических вариаций: для дискретных величин – априорные вероятности их появления; для непрерывных одномерных величин – функция распределения на определенном интервале; для непрерывных многомерных величин (векторов) – многомерная функция распределения в определенной геометрической фигуре. Конкретный вид и параметры указанных распределений должны задаваться исходя из статистики экспериментальных измерений микрофизических характеристик атмосферных аэрозолей. В случае, если подобная статистика отсутствует или недостаточна, принимаются стандартные предположения о соответствии распределения случайных вариаций микрофизических аэрозольных параметров нормальному. В этом случае одномерная случайная величина полностью характеризуется средним значением и дисперсией, а многомерная – средним и ковариационной матрицей. Впрочем, специфика моделирования некоторых микрофизических аэрозольных параметров заставляет внести корректировку в этот стандартный подход и использовать (возможно, как альтернативу) иные виды статистических распределений. Подобные особенности рассматриваются в диссертации.

Каждая реализация микрофизической аэрозольной модели осуществляется путем ее получения (розыгрыша) по конкретной реализации всей совокупности случайных величин на основе генерации случайных чисел, равномерно, либо нормально распределенных. Совокупность (статистика) указанных реализаций отражает искомую стохастическую компоненту аэрозольной модели.

Отдельно рассматриваются различные способы случайного моделирования КПП аэрозольных веществ, вертикальных профилей аэрозольных параметров, различных взаимозависимостей (учет корреляций между параметрами).

Приводятся три конкретные, разработанные автором диссертации, статистические аэрозольные модели и дается информация об их применении в конкретных задачах дистанционного зондирования.

Статистическая модель стратосферного аэрозоля. Включает пять фракций: сернокислотного аэрозоля, вулканической пыли, метеорной пыли двух типов (мелкая и крупная), двухслойных частиц с пылевым ядром и сернокислотной оболочкой. В основе данных модели и параметров их вариаций – литературные сведения. Учтена корреляция пара-

метров сернокислотной фракции (концентрации и функции распределения) с концентрацией серной кислоты. В модель включена корреляция между градиентом температуры и концентрациями аэрозолей, учитывающая известный факт соответствия аэрозольных слоев в атмосфере областям температурных инверсий.

Модель применялась для решения задачи обработки данных спектрометра “Озон-Мир”, функционировавшего на борту орбитальной станции “Мир”. Эта работа выполнялась научным коллективом. В его рамках личный вклад автора диссертации в полученные результаты следующий:

1) Разработка общей методики генерации статистических аэрозольных моделей.

2) Создание на ее основе по литературным источникам статистической аэрозольной модели стратосферы.

3) Расчет по данной модели с использованием разработанных автором диссертации средств (гл.3) статистической совокупности спектров объемного коэффициента аэрозольного ослабления (ОКАО), по которой Поляковым А.В. была построена параметризация спектрального хода ОКАО, позволившая решить задачу восстановления спектральных профилей ОКАО из измерений.

4) Выбор готовых аэрозольных моделей для тестирования результатов восстановления.

Статистическая модель аэрозоля для района Ладожского озера. Тропосферный аэрозоль для рассматриваемой модели представляется как сумма независимых компонентов аэрозолей различного происхождения. По литературным данным и результатам прямых самолетных измерений микрофизических параметров аэрозоля, выполненных в лаборатории физики аэрозолей физического факультета Ленинградского (ныне – Санкт-петербургского) государственного университета под руководством Ивлева Л.С., можно выделить следующие блоки аэрозольной модели атмосферы. Для Ладожского озера зимой – два блока: ледяные частицы, городской аэрозоль. Для Ладожского озера летом – четыре блока: водные частицы, городской, почвенный и морской аэрозоли.

Для каждого блока были определены микрофизические параметры и модели их вариаций (литературные данные и данные Ивлева Л.С.). Всего в модели было учтено 12 типов тропосферных аэрозолей. При этом для всех типов моделировался процесс обводнения, то есть рассчитывались оптические характеристики ансамблей двухслойных сфер (гл.3). Использована достаточно сложная и развитая модель КПП аэрозольных веществ в которой модели вариаций более простых веществ (например, сульфата аммония) сами являлись составными частями моделей вариаций более сложных (для сульфата аммония – сульфатов в целом, для сульфатов в целом – почвенной пыли).

В полном объеме модель применялась при решении задачи интерпретации самолетных измерений потоков солнечного излучения над Ладожским озером, что составило суть защищенной автором кандидатской диссертации. Здесь по данным модели (результатам численных экспериментов) оценивались априорные средние и ковариации оптических параметров аэрозоля.

Личный вклад автора диссертации в рамках данных работ следующий:

1)Разработка и компьютерная реализация модели измерений полусферических потоков с анализом ее чувствительности к различным параметрам, включая аэрозоль и слабые полосы молекулярного поглощения.

2)Создание на основе разработанной автором методики генерации статистических аэрозольных моделей модели для Ладожского озера.

3)Параметризация аэрозольной модели, включая индикатрису рассеяния.

4)Расчет по данной модели статистической совокупности спектральных вертикальных профилей объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения, послуживших априорной информацией для решения обратной задачи.

5)Разработка алгоритма решения обратной задачи.

6)Восстановление с применением указанных средств вертикальных профилей объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения, а также водяного пара и озона, а также спектрального альбедо поверхности.

7)Интерпретация полученных результатов.

Можно отметить, что в задаче обработки указанных измерений автор принимал участие на всех этапах – см. рис.1 – за исключением разработки измерительной аппаратуры и схем измерений. Это дало ему как существенный опыт реальной обработки экспериментальных данных, так и понимание необходимости комплексного, единообразного подхода к этапам модельных исследований в сложных задачах дистанционного зондирования рассеивающей аэрозольной атмосферы.

В качестве иллюстраций полученных результатов приведем рис.2 и 3, на которых представлены данные восстановления вертикальных и спектральных профилей объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения. Следует отметить существенно различный характер спектральной зависимости объемного коэффициента аэрозольного рассеяния над пустыней и над Ладожским озером. В первом случае спектральная зависимость коэффициента рассеяния или отсутствует или наблюдается ее слабый рост с увеличением длины волны. Такая зависимость, очевидно, может быть объяснена большим содержанием крупных частиц в атмосферном аэрозоле над пустыней. Обращает на себя внимание четко выраженная полоса поглощения окислов железа (примерно 0.4 мкм), полученная в измерениях над пустыней в условиях начинающейся пыль-

ной бури. Эта же полоса присутствует и в спектрах лучистых притоков (поглощения излучения в слоях атмосферы). Таким образом, экспериментальные полученные данные подтверждают информацию о наличии указанной полосы селективного аэрозольного поглощения в видимой области спектра.

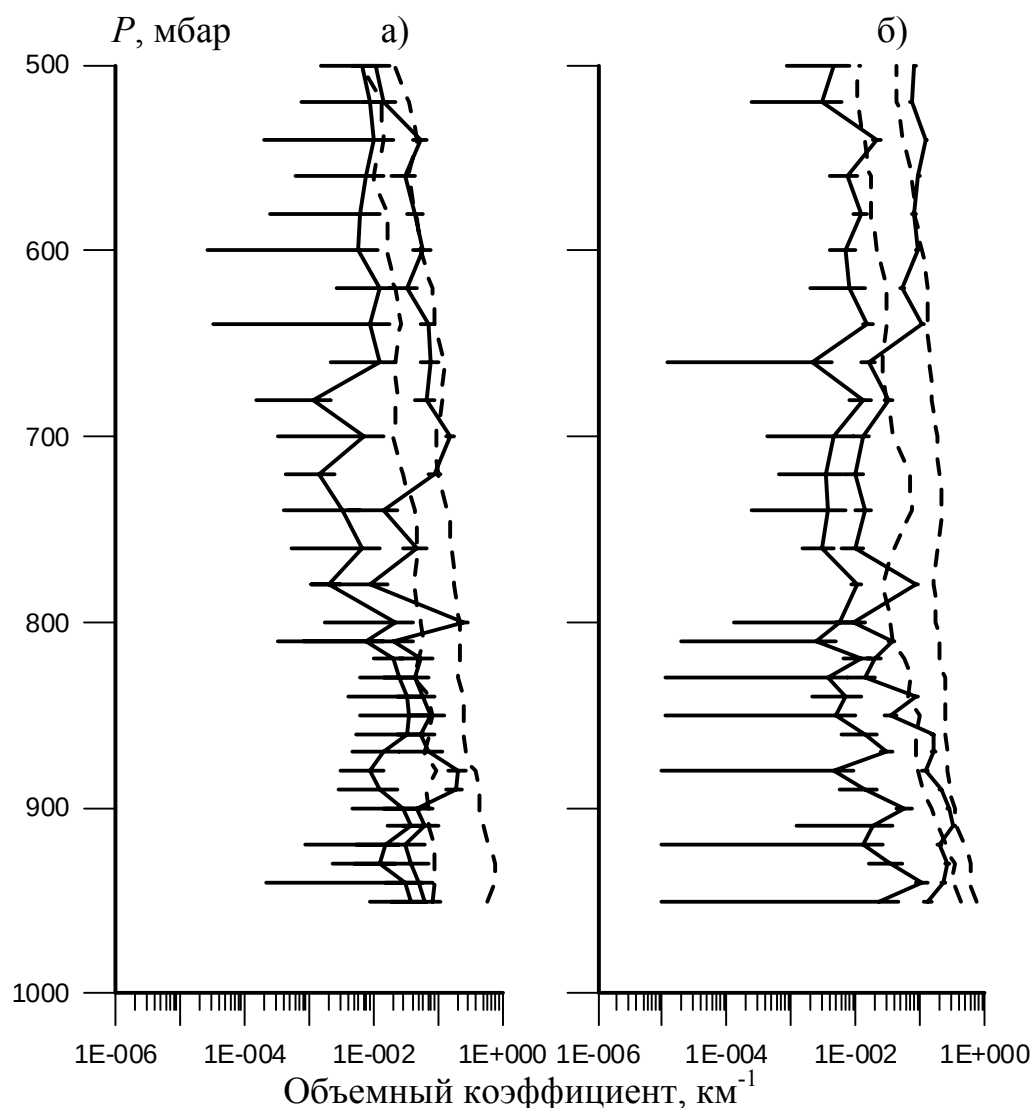


Рис.2. Результаты восстановления объемного коэффициента аэрозольного рассеяния (правые кривые) и поглощения (левые кривые) на длине волны 545 нм для высотной области 500 - 950мбар: а) зондировка 16.10.1983 над пустыней Кара-Кум, б) зондировка 29.04.1985 над Ладожским озером. Пунктиром показаны соответствующие профили априорных моделей, горизонтальными линиями – погрешности восстановления.

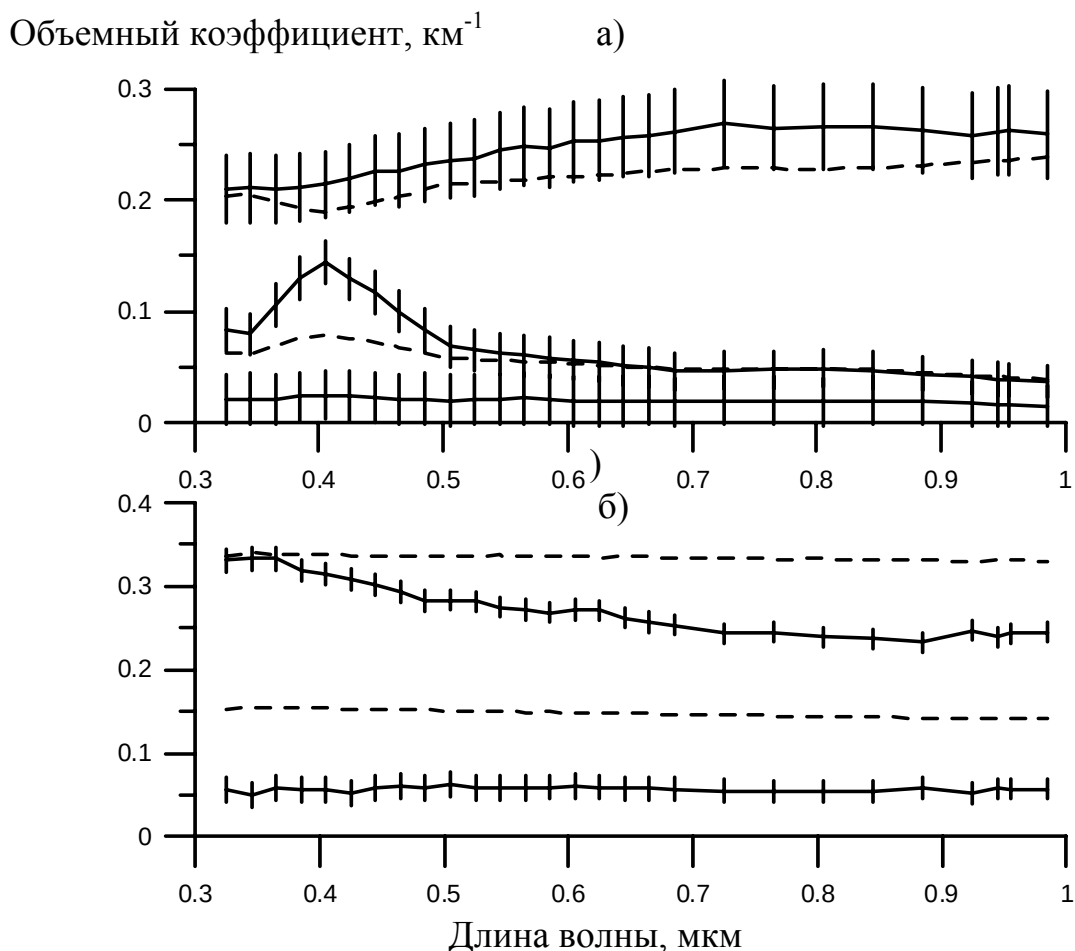


Рис.3. Результаты восстановления спектральных зависимостей объемного коэффициента аэрозольного рассеяния (верхние кривые) и поглощения (нижние кривые) на уровне 850 мбар: а) зондировка 16.10.1983 над пустыней Кара-Кум), б) зондировка 29.04.1985 над Ладожским озером. Пунктиром показаны соответствующие зависимости априорных моделей. Средняя кривая на рисунке а) – объемный коэффициент аэрозольного поглощения для зондировки 12.10.1983 при пыльной буре.

Статистическая модель аэрозолей приземного слоя. Эта модель была преобразована автором диссертации в статистическую (модель вариаций аэрозолей) из известной модели приземного слоя С.Д. Андреева и Л.С. Ивлева. В указанной модели аэрозоль разделен на три фракции (мелко- средне- и крупно- дисперсную), таким образом в статистической модели варьируются 15 параметров (вещественная и мнимая часть КПП, два параметра функции распределения по размерам и концентрация каждой фракции).

В качестве одного из применений модели укажем на возможность оценки информативности (потенциальной точности и возможности) определения микрофизических параметров аэрозолей из оптических измерений. Эта задача рассматривается в общем виде (известные матричные

соотношения) и так же она реализована в соответствующем компьютерном коде. В качестве прикладного применения модели рассмотрена информативность лидарного зондирования основе Nd: YAG лазеров. Получены соответствующие оценки потенциальной точности определения микрофизических аэрозольных параметров.

Созданная статистическая модель использовалась также как средство проведения численных экспериментов для получения регрессионных формул связи между оптическими (результатами лидарного зондирования) и микрофизическими параметрами аэрозолей. Соответствующая часть работы в рамках научного коллектива была проделана соавторами автора диссертации.

Личный вклад автора диссертации в рамках данных работ следующий:

1)Создание на основе разработанной автором методики генерации статистической модели структуры аэрозолей приземного слоя и ее компьютерная реализация.

2)Разработка методики оценок информативности аэрозольных оптических измерений относительно микрофизических аэрозольных параметров как потенциально возможных (предельных по точности), так и реальных, учитывающих неполноту априорной информации и сопутствующих микрофизических измерений.

3)Реализация разработанной методики в виде компьютерных средств (базы данных и кода), обладающих свойством универсальности в плане применимости к различным задачам оценок информативности измерений оптических характеристик аэрозолей приземного слоя относительно микрофизических аэрозольных параметров.

4)Расчет и анализ при помощи указанных средств информативности конкретной схемы лидарного зондирования.

Отметим, что в рамках данной тематики разработки автора диссертации успешно применялись для задач не пассивного оптического зондирования, а для задач активного (лидарного) зондирования. Это еще раз подчеркивает обоснованную во Введении необходимость общего, единого подхода к исследованию и решению самых различных задач дистанционного зондирования аэрозоля.

5.Методы решения задач параметризации аэрозольных моделей.

Параметрические аэрозольные модели.

В пятой главе диссертации рассматриваются задачи параметризации аэрозольных моделей. Как уже отмечалось во Введении, задачи дистанционного зондирования аэрозолей предъявляют к аэрозольным моделям весьма специфические и противоречивые требования: минимум определяемых параметров при адекватности описания ими реальных аэрозолей. В начале главы приводятся некоторые общие методы приемы и примеры параметризации. В частности, как пример соответствующей задачи, рас-

смачивается упоминавшаяся выше проблема параметризации спектрального хода ОКАО, приводятся различные примеры ее решения от классической формулы Ангстрема до современных, в том числе и полученных (Поляков А.В.) по моделям автора диссертации. Отмечается, что помимо поиска аналитических выражений для параметризации аэрозольных оптических характеристик, возможности современной вычислительной техники открывают и другой, весьма перспективный путь – оформление параметрической модели в виде компьютерной базы данных. Работы автора диссертации в этом направлении и соответствующие созданные им параметрические аэрозольные модели описываются в последующих разделах пятой главы.

Отдельно рассматривается задача параметризации индикатрисы рассеяния как функции угла (исторически это, вероятно, первая задача подобного рода – известная функция Хэнви-Гринштейна). Рассматриваются три подхода к ее решению: аналитический, эмпирический и микрофизический и три соответствующие модели, разработанные автором диссертации.

В рамках подбора для параметризации индикатрисы явных аналитических формул предложена экспоненциальная индикатриса:

$$x(\gamma) = (c + a \cos^2 \gamma) \exp(b \cos \gamma), \quad c = b / \operatorname{sh} b - a(1 - 2 \operatorname{cth} b / b + 2 / b^2),$$

если $b \neq 0$, $c = 1 - a/3$, если $b = 0$, (15)

где γ – угол рассеяния, a и $b \geq 0$ – параметры. Параметр a по своему физическому смыслу положителен, а условие $x(\gamma) \geq 0$ накладывает на его возможные значения следующие ограничения

$$0 \leq a \leq \frac{b^3}{(b^2 + 2) \operatorname{sh} b - 2b \operatorname{ch} b}, \quad \text{если } b \neq 0, \quad 0 \leq a \leq 3, \quad \text{если } b = 0. \quad (16)$$

Преимущества модели (16) в том, что ее частными случаями являются и сферическая ($a = 0$, $b = 0$), и релеевская индикатриса ($a = 3/4$, $b = 0$), кроме того, показано, что она в целом лучше других подобных аппроксимаций описывает реальные экспериментальные индикатрисы (см. далее).

Эмпирическая модель основана на аппроксимации данных реальных экспериментально измеренных индикатрис. В качестве таковых в диссертации использована классификация индикатрис, выполненная на большом экспериментальном материале в Главной Геофизической Обсерватории (ГГО) группой под руководством О.Д. Бартеневой и опубликованная в научной печати. Классификация основана на двух параметрах, описывающих форму индикатрисы – вытянутости G и остроте P :

$$G = \frac{\int_{\pi/2}^{\pi/2} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma}{\int_{\pi/2}^{\pi/2} x(\gamma) \sin \gamma d\gamma}, \quad P = \frac{2x(140^\circ)}{x(100^\circ) + x(110^\circ)}. \quad (17)$$

В эмпирической модели автора диссертации эти параметры рассматриваются как непрерывные, то есть исходный экспериментальный материал, путем специально разработанных средств интерполяции, преобразуется в функцию $x(\gamma, G, P)$. Основой функции является базовая таблица индикатрис (база данных). Абстрагируясь от конкретики эксперимента, полученную функцию $x(\gamma, G, P)$ можно считать двухпараметрической моделью индикатрисы рассеяния с непрерывной зависимостью от вытянутости и остроты. Отметим, что эта функция значительно лучше других аппроксимирует исходные экспериментальные индикатрисы (естественно, она же на них и основана).

В микрофизической модели базой для параметризации являются не экспериментальные измерения, а расчеты. Поэтому здесь вновь возникает задача выбора и минимизации параметров модели. Для ее решения использована эмпирическая связь между сечением рассеяния C_s и направленного рассеяния $C_{sd}(\gamma)$, полученная в работах группы сотрудников Института физики атмосферы (ИФА РАН) под руководством Г.И. Горчакова

$$\lg C_{sd}(\gamma) = a(\gamma) + b(\gamma) \lg C_s \quad (18)$$

где $a(\gamma)$ и $b(\gamma)$ – некие коэффициенты.

Выполнение соотношения (18) было исследовано автором диссертации в рамках численных экспериментов для различных длин волн, вещественной и мнимой частей КПП, параметров функции распределения – всего было промоделировано 8960 индикатрис. После подтверждения выполнения (18) (со средней ошибкой 5%), оно было постулировано как точное и в качестве такового использовано в микрофизической аэрозольной модели

$$\begin{aligned} \lg C_{sd}(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}, \gamma) &= a(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}, \gamma) + b(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}, \gamma) \lg C_s(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}), \quad C_s(\lambda) = 10^{-5} \sigma(\lambda) / N \\ x(\gamma) &= C_{sd}(\gamma) / \left(\frac{1}{2} \int_0^\pi C_{sd}(\gamma) \sin \gamma d\gamma \right) \end{aligned} \quad (19)$$

где λ – длина волны в мкм, $\tilde{n}$, $\tilde{k}$ – вещественная и мнимая части КПП аэрозольного вещества, $\sigma(\lambda)$ – объемный коэффициент аэрозольного ослабления в км^{-1} , N – концентрация частиц в см^{-3} . Таким образом, в модели 4 параметра (если не включать в их список длину волны). Наличие зависимости от $\sigma(\lambda)$ позволяет легко согласовать модель индикатрисы (19) со стандартными оптическими аэрозольными моделями. Коэффициенты $a(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}, \gamma)$ и $b(\lambda, \tilde{n}, \tilde{k}, \gamma)$ рассчитаны и оформлены в виде компьютерной базы данных, на использовании которой и основана реализация модели (19).

В качестве интересного теста модели индикатрисы (19) было проверено воспроизведение ею упомянутой выше классификации экспериментально измеренных индикатрис. Было смоделировано 18816 инди-

катрис, причем в модель была введена метеорологическая дальность видимости (через параметр $\sigma(\lambda)$) и влажность воздуха (через КПП). В результате моделирования удалось получить почти все те классы индикатрис, что наблюдались в эксперименте, за исключением четырех. Отсутствие этих классов объясняется тем, что подробные индикатрисы (“острые с максимумом”) наблюдались в условиях дымок и туманов, т.е. при возможном присутствии в воздухе крупных водяных капель, которые и дают сильный радужный максимум. В предложенной модели возможность получения индикатрис для капель и других гигантских частиц не предусмотрена.

Анализ зависимости характеристик классов, полученных в результате моделирования, от дальности видимости и влажности воздуха показывают хорошее согласие ее с данными измерений: зависимость от влажности практически отсутствует, зависимость от дальности видимости носит не детерминированный, а статистический характер. Диапазоны значений дальности видимости для классов по результатам моделирования и экспериментальным данным для большинства классов согласуются.

В заключительном разделе пятой главы мы вновь возвращаемся к постановке задачи параметризации аэрозольной модели в общем виде. Здесь рассматривается метод ее решения при доминировании в составе аэрозолей одного вещества.

Как отмечалось, одной из проблем дистанционного зондирования атмосферного аэрозоля является наличие в его составе различных веществ. Можно, однако, указать ряд случаев, когда в составе аэрозолей доминирует одно химическое вещество. Таковыми являются: облака и осадки Земли (вода, лёд), облака Венеры (концентрированная серная кислота), аэрозоли Марса – палагонит. В этом случае в приближении описания аэрозоля ансамблем сферических частиц параметрами модели (помимо длины волны и высоты) являются лишь концентрация частиц и функция распределения их по размерам (КПП вещества однозначно определяется длиной волны). Если использовать аналитическую аппроксимацию функции распределения, стандартно имеющей два параметра, то модель спектральной зависимости аэрозольных оптических характеристик будет иметь всего три параметра: длину волны и два параметра функции распределения. Высотные же зависимости будут отдельно задаваться для концентрации аэрозолей и двух параметров функции распределения.

Указанная модель спектральной зависимости оптических параметров аэрозоля (любых требуемых по условиям конкретной задачи, включая индикатрису и матрицу рассеяния) оформляется в виде компьютерной базы данных, причем автором диссертации предложен специальный алгоритм, обеспечивающий требуемую точность параметризации. Его суть в том, что сначала производятся расчёты для некоторой исходной трёх-

мерной сетки, а затем для всех точек, лежащих посередине между узлами, анализируется отклонение расчёта по теории Ми от интерполированных значений, если оно больше заданной величины – указанная точка добавляется в таблицу. Эта процедура работает итерационно до тех пор, пока не прекратится добавление точек, то есть пока табуляция не достигнет заданной точности. Таким образом, сетка таблицы получается ортогональной, но не регулярной. Это приводит к достаточно сложной логике поиска необходимого куба таблицы для интерполяции. Соответствующий алгоритм в рамках технической (компьютерной) работы с базой данных был реализован сотрудником ИКИ РАН Майоровым Б.С.

Таким образом, задача параметризации спектрального хода оптических аэрозольных характеристик решена не в традиционном стиле аналитической аппроксимации, а в современном, основанном на мощных возможностях сегодняшней вычислительной техники. Отметим еще раз, что автору диссертации принадлежит не идея табуляции аэрозольных оптических характеристик (это было сделано достаточно давно) и даже не идея оформления таблиц в виде современной компьютерной базы данных (хотя здесь есть элементы новизны, например описанное выше дробление сетки по заданной точности). Новое в данной работе заключается в решении задачи параметризации путем применения кусочно-линейной аппроксимации с автоматическим выбором сетки дискретизации, обеспечивающей требуемую точность.

Отметим основные достоинства предложенной параметризации. Она применима для различных, в том числе достаточно широких спектральных диапазонов (фактически указанные возможности ограничены лишь реально имеющимися данными о КПП). При этом расширение спектрального диапазона никак не нарушает точность параметризации. В качестве выходных данных выступают практически все необходимые для расчётов оптические характеристики аэрозолей. В частности, предложенный метод “автоматически” решает проблему параметризации индикатрисы рассеяния уже как функции угла рассеяния – в данном случае она просто выдается в виде таблицы по углам рассеяния (с любой требуемой степенью подробности) без использования дополнительных аппроксимаций (типа функции Хэнви-Гринстейна и т. п. – см. материалы выше). Реализация функции параметризации как линейной интерполяции позволяет элементарно вычислять необходимые для ряда схем решения обратных задач производные от моделируемых оптических характеристик по параметрам функции. Используемые параметры имеют физический смысл – это параметры функции распределения аэрозольных частиц по размерам, т. е. решение задачи интерпретации измерений позволяет непосредственно получать данные о микрофизике аэрозолей.

В качестве прикладного применения указанная параметрическая аэрозольная модель использована в задаче интерпретации данных лимбового

зондирования атмосферы планеты Марс прибором OMEGA миссии Mars-Express. В рамках совместной работы эта часть была выполнена Майоровым Б.С. Личный вклад автора диссертации в решение указанной задачи следующий:

1)Разработка модели оптических измерений прибора и соответствующего компьютерного кода (SCATRD), используя который Майоров Б.С. создал адаптированный под геометрическую специфику дистанционных измерений других планет код SCATRD-OFOS.

2)Разработка метода и алгоритма параметризации оптических характеристик аэрозолей при доминировании в их составе определенного вещества, конкретно реализованного Майоровым Б.С. в виде компьютерного кода и базы данных и примененного для параметризации модели аэрозолей планеты Марс.

Отметим, что применение созданной параметрической аэрозольной модели позволило впервые для другой планеты определить одновременно вертикальные профили двух параметров аэрозоля (концентрации и модального радиуса).

Основные результаты и выводы.

В ходе решения задач диссертационной работы получены следующие новые методические результаты:

1)разработан метод (алгоритм) частотного интегрирования в рамках учета спектральной аппаратной функции прибора при моделировании оптических измерений, основанный на вариационном приближении при расчете интенсивностей, идеологически близкий к известному k-методу, но не требующий громоздких предварительных расчетов.

2)получены формулы и соответствующий алгоритм для расчета оптических характеристик двухслойных сферических аэрозольных частиц с однородными ядром и оболочкой, снимающие ограничения на возможный диапазон значений параметров расчетов.

3)создана феноменологическая теория образования двухслойных аэрозольных частиц с однородными ядром и оболочкой, в рамках которой предложено унифицированное описание функций распределения по размерам параметров подобных частиц, позволившее свести задачу расчета оптических характеристик ансамблей двухслойных частиц к известным алгоритмам для однородных частиц.

4)разработана методика генерации статистических аэрозольных моделей с целью описания стохастических свойств атмосферных аэрозолей.

5)предложен метод представления параметрической зависимости оптических характеристик аэрозольной модели в виде компьютерной базы данных (а не явного аналитического выражения), успешно примененный в задачах параметризации индикатрисы рассеяния как непрерывной

функции угла и параметризации спектральной зависимости аэрозольных оптических характеристик как непрерывной функции длины волны.

В качестве общего результата диссертационной работы получен единый комплекс моделей, включающий четыре составляющие части:

1) Комплекс моделей оптических измерений в атмосферах планет (моделирование полей рассеянного излучения с учетом спектральной аппаратной функции прибора), охватывающий диапазоны как солнечного, так и равновесного теплового излучения, рассеяние в безоблачной атмосфере и на облаках различных форм (для солнечного излучения), рассеяние на горизонтально протяженных облаках и осадках (для теплового излучения).

2) Комплекс алгоритмов моделирования оптических характеристик ансамблей аэрозольных частиц по заданным микрофизическим параметрам, свободный от ограничений на значения микрофизических параметров, для случаев однородных сферических частиц и двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой (для последних предложен унифицированный набор параметров и конкретные физические модели, описывающие образование ансамблей подобных частиц).

3) Общая методика моделирования стохастических свойств атмосферных аэрозолей, реализованная в трех конкретных статистических аэрозольных моделях: стратосферы, района Ладожского озера, приземного слоя.

4) Параметрические модели индикатрисы рассеяния, как функции угла, лучше уже известных описывающие указанную зависимость (три параметризации разных типов: аналитическая, микрофизическая, эмпирическая; последняя, имея два параметра, основана на реальных экспериментальных измерениях индикатрис и, соответственно, описывает их существенно точнее других двухпараметрических аппроксимаций). Общая методика параметризации оптических характеристик атмосферных аэрозолей как функций длины волны для случая доминирования в составе аэрозолей одного вещества, реализованная в прикладном алгоритме и конкретной аэрозольной модели для Марса (алгоритм и модель – совместно с Майоровым Б.С.).

Созданный в рамках диссертационной работы единый комплекс моделей применялся при обработке и интерпретации данных следующих натурных экспериментов:

1) Самолетные измерения полусферических спектральных потоков солнечного излучения. Обработка данных измерений проводилась лично автором диссертации, применялись все четыре составляющие единого комплекса моделей (кроме того, автор лично разработал алгоритмы обработки экспериментальных данных, участвовал в проведении измерений). В результате применения комплекса моделей были впервые из измерений полусферических потоков получены вертикальные профили и

спектральные зависимости объемных коэффициентов аэрозольного рассеяния и поглощения.

2) Спектральные измерения прозрачности атмосферы на касательных трассах прибором “Озон-Мир” (борт ДОС “Мир”). Обработка данных проводилась научным коллективом. Из единого комплекса моделей, разработанного автором диссертации, применялись две составляющие: средства генерации статистических аэрозольных моделей и средства моделирования оптических характеристик аэрозольных ансамблей по заданным микрофизическим (включая случай двухслойных частиц). Лично автором диссертации была разработана статистическая модель стратосферного аэрозоля, применявшаяся затем в задаче параметризации спектральной зависимости объемного коэффициента аэрозольного ослабления, необходимой для восстановления его вертикальных профилей. В результате применения, в частности, статистической модели стратосферного аэрозоля, из данных прибора, наряду с профилями концентраций озона и NO_2 , получены также вертикальные и спектральные зависимости объемного коэффициента аэрозольного ослабления.

3) Спектральные измерения интенсивности рассеянного излучения атмосферы на касательных трассах прибором OMEGA миссии Mars-Express. Обработка данных проводилась научным коллективом. Из единого комплекса моделей, разработанного автором диссертации, применялись три составляющие (статистические аэрозольные модели не применялись). В результате применения разработанного автором диссертации комплекса моделей впервые для другой планеты из дистанционных измерений одновременно определены вертикальные профили концентрации и модального радиуса аэрозолей.

Описанные в диссертации модели также применялись в следующих задачах исследования потенциальной информативности измерений, интерпретации экспериментальных данных и возможности получения из них информации об атмосферном аэрозоле:

1) Оценка информативности определения оптических параметров атмосферного аэрозоля по полю рассеянного излучения в схеме лимбового зондирования горизонта Земли. Применялась модель переноса рассеянного солнечного излучения в безоблачной сферической атмосфере, включающая расчет производных от интенсивности излучения по всем параметрам атмосферы и поверхности. Модель позволила оценить вариации интенсивности, связанные с вариациями различных параметров атмосферы, включая (впервые) средний косинус аэрозольной индикатрисы рассеяния.

2) Моделирование оптических свойств системы “облачные капли – сажа”. Алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц для случаев взаимодействия облачных капель и сажи использовался в рамках попытки объяснения известного эффекта “ано-

мального поглощения” в облаках. Показана возможность классического объяснения “аномального поглощения” в рамках модели сажевой оболочки на облачной капле при высоких, но реально возможных концентрациях сажи в атмосфере.

3) Оценка информативности данных лидарного зондирования относительно определения микрофизических параметров аэрозолей приземного слоя, а также необходимой точности прямых (дополнительных, “контрольных”) измерений указанных параметров. Применялась статистическая модель аэрозолей приземного слоя. Получены соответствующие оценки потенциальной точности определения микрофизических параметров аэрозоля из данных лидарного зондирования.

Таким образом, в диссертации решена крупная научная задача создания единого комплекса физико-математических моделей оптических измерений в атмосфере и моделей атмосферных аэрозолей, включая новые методические разработки в области указанного моделирования, для исследования и решения широкого круга различных задач дистанционного зондирования аэрозолей с целью извлечения из данных зондирования новой, скрытой в рамках использования прежних моделей информации.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах.

Монографии:

1. *Васильев А.В., Мельникова И.Н.* Коротковолновое солнечное излучение в атмосфере Земли. Расчеты. Измерения. Интерпретация. СПб., НИИХ СПбГУ, 2002, 388с.
2. *Melnikova I.N., Vasilyev A.V.* Short-Wave Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. Calculation, Observation, Interpretation. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, 2004, 303p.

В указанной монографии, исходно опубликованной на русском, а впоследствии переведенной и изданной на английском языке, лично автором диссертации (как на то указано во введении в монографию), написан один из разделов второй главы – о моделировании полусферических потоков излучения методом Монте-Карло, глава 4 – об общих методах решения задач определения параметров атмосферы по результатам измерения радиационных характеристик и глава 5 – о методах и результатах определения параметров атмосферы и подстилающей поверхности по данным самолетных измерений спектральных потоков солнечной радиации в безоблачной атмосфере. Кроме того, главы 1 – вводная и 3 – о спектральных измерениях потоков и интенсивностей солнечной радиации в безоблачной и облачной атмосфере, написаны совместно с соавтором (Мельниковой И.Н.).

Статьи в научных журналах:

3. **Васильев А.В.** "Вертикаль" - коллекция газовых моделей атмосферы Земли. Вестник С.-Петербург. университета, Сер 4: Физика, химия. 1996, Вып.4, (N 25), с.87-90.
4. **Васильев А.В.** Метод последовательных приближений при учете рассеяния теплового излучения на аэрозольных образованиях в атмосфере. Часть 1. Общая вычислительная схема. Оптика атмосферы и океана. 2003, т.16, N 8, с.725-729.
5. **Васильев А.В.** Метод последовательных приближений при учете рассеяния теплового излучения на аэрозольных образованиях в атмосфере. Часть 2. Учет поляризации. Вычислительный алгоритм. Аэрозольные модели. Оптика атмосферы и океана. 2003, т.16, N 8, с.730-735.
6. **Васильев А.В.** Метод последовательных приближений при учете рассеяния теплового излучения на аэрозольных образованиях в атмосфере. Часть 3. Приложения к математическому моделированию измерений. Оптика атмосферы и океана. 2004, т.17, N 4, с.334-338.
7. **Васильев А.В.** Разложение таблично заданной индикатрисы рассеяния в ряд по полиномам Лежандра. Вестник СПбГУ, сер.4: Физика, химия. 1997, вып.3, (N 18), с.38-43.
8. **Васильев А.В.** Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однородных сферических частиц. I. Одиночные частицы. Вестник СПбГУ, сер.4: Физика, химия. 1996, вып.4, (N 25), с.3-11.
9. **Васильев А.В.** Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик однородных сферических частиц. II. Ансамбли частиц. Вестник СПбГУ, сер.4: Физика, химия. 1997, вып.1, (N 4), с.14-24.
10. **Васильев А.В.** Численное моделирование интенсивности многократно рассеянного солнечного излучения и производных от нее с учетом сферической геометрии атмосферы (компьютерный код SCATRD). Вестник СПбГУ, сер.4: Физика, химия. 2006, вып.3, с.3-14.
11. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Об оптических свойствах загрязненных облаков. Оптика атмосферы и океана. 2002, т.15, N 2, с.157-159.
12. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Оптическая статистическая модель атмосферы для района Ладожского озера. Оптика атмосферы и океана. 2000, т. 13, N 2, с.198-203.
13. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Универсальный алгоритм расчета оптических характеристик двухслойных сферических частиц с однородными ядром и оболочкой. Оптика атмосферы и океана. 1996, т.9, N 12, с.1552-1561.
14. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Численное моделирование оптических характеристик полидисперсных сферических частиц. Оптика атмосферы и океана. 1995, т. 8, N 6, с.921-928.

15. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Численное моделирование спектральной аэрозольной индикатрисы рассеяния света. Оптика атмосферы и океана. 1996, т. 9, N 1, с.129-133.
16. **Васильев А.В., Ивлев Л.С.** Эмпирические модели и оптические характеристики аэрозольных ансамблей двухслойных сферических частиц. Оптика атмосферы и океана. 1997, т. 10, N 8, с.856-865.
17. **Васильев А.В., Ивлев Л.С., Кугейко М.М., Лысенко С.А., Терехин Н.Ю.** Оценка точности контрольных измерений в задачах оптической диагностики микрофизических параметров аэрозоля. Оптика атмосферы и океана. 2009, т. 22, N 9, с.873-881.
18. **Васильев А.В., Майоров Б.С., Бибринг Дж.-П.** Восстановление высотных профилей микрофизических характеристик марсианского аэрозоля по лимбовым измерениям спектрометра Omega миссии Mars-Express. Астрономический вестник. 2009, т. 43, N 5, с.406-418.
19. **Васильев А.В., Поляков А.В.** Вариации интенсивности рассеянного солнечного излучения при вариациях параметров атмосферного аэрозоля в схеме лимбового зондирования горизонта Земли (численное моделирование и предварительный анализ информативности измерений). Оптика атмосферы и океана. 2005, т. 18, N 4, с.352-358.
20. **Васильев О.Б., Васильев А.В.** Двухпараметрическая модель индикатрисы рассеяния. Оптика атмосферы и океана. 1994, т. 7, N 1, с.76-89.
21. **Поляков А.В., Васильев А.В., Тимофеев Ю.М.** Параметризация спектральной зависимости аэрозольного ослабления в задачах затменного зондирования из космоса. Известия АН, Физика атмосферы и океана. 2001, т. 37, N 5, с.646-657.
22. **Поляков А.В., Тимофеев Ю.М., Поберовский А.В., Васильев А.В.** Восстановление вертикальных профилей коэффициентов аэрозольного ослабления в стратосфере по результатам измерений аппаратурой "Озон-Мир" (ДОС "Мир"). Известия АН, Физика атмосферы и океана. 2001, т. 37, N 2, с.213-222.
23. **Тимофеев Ю.М., Поляков А.В., Васильев А.В., Виролайнен Я.А.** Возможности определения оптических параметров стратосферного аэрозоля по спутниковым измерениям рассеянного солнечного излучения горизонта Земли. Исследования Земли из космоса, 2006, N 1, с.19-24.
24. **Vasilyev O.B., Contreras A.L., Velazques A.M., Peralta R.F., Ivlev L.S., Kovalenko A.P., Vasilyev A.V., Jukov V.M., Welch R.M.** Spectral optical properties of the polluted atmosphere of Mexico City (spring – summer 1992). Journal of Geophysical Research. 1995, v.100, N D12, p.26027-26044.