

ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

на диссертацию Шефер Ольги Владимировны «Параметризованная модель кристаллического облака для исследования характеристик однократного рассеяния лучистой энергии», представленную на соискание учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы.

Диссертация О.В. Шефер посвящена важной проблеме - разработке параметрической модели аэродисперсной среды, содержащей полупрозрачные кристаллы и близкой по физическим параметрам к перистым облакам, состоящим из ледяных частиц. Параметрическая модель направлена на численное исследование характеристик однократного рассеяния для ансамбля кристаллических частиц с учётом их пространственного расположения и функции распределения по их размерам, а так же при рассмотрении состояния поляризации падающего видимого и инфракрасного (ИК) излучения. Эти исследования чрезвычайно важны в настоящее время, так как открывают возможность для количественного учёта вклада перистых облаков, закрывающих значительную часть планеты, в радиационные и, естественно, климатические процессы Земли. Кроме того разработанная в диссертации модель представляется важной с точки зрения развития дистанционных (пассивных и активных) оптических технологий изучения физических параметров анизотропных взвешенных частиц. Решение указанных проблем представляется важным также с точки зрения воздействия на хозяйственную деятельность человека и состояние региональных и глобальных экосистем.

Таким образом, **актуальность** работы О.В. Шефер не вызывает сомнений.

Тема диссертации соответствует **формуле специальности** 25.00.29 «физика атмосферы и гидросферы», как область науки, включающая экспериментальное и теоретическое изучение феноменологии и физики процессов, происходящих в земной атмосфере и гидросфере... .

Область диссертационного исследования соответствует пункту паспорта специальности: 1. Строение и физика нижней атмосферы (тропосферы) Земли.

Целью рецензируемой диссертационной работы являлась разработка системы оптических моделей кристаллической облачности, позволяющей численно имитировать газовой-аэрозольную среду с различными физико-химическими свойствами для исследования особенностей ослабления оптической энергии с учетом анизотропии и дихроизма рассеяния, а также оценки характеристик отражённого (включая зеркального) излучения.

В качестве задач диссертационной работы автор поставил:

- построение физико-математической модели крупного (в сравнении с длиной волны) кристалла, обеспечивающей определение характеристик однократного рассеяния для монодисперсной среды с произвольным

расположением частицы, источника и приёмника излучения различного состояния поляризации;

- разработку модели аэродисперсной среды, позволяющей изучить поляризационные и энергетические характеристики излучения в схемах активного (лазерного) и пассивного зондирования, включая зеркально отражённый компонент;

- оценку микрофизических, оптических и ориентационных параметров кристаллов по данным моно и бистатического лазерного зондирования;

- создание алгоритмического решения для элементов матрицы экстинкции для кристаллической аэрозольной среды, включая спектральные зависимости элементов;

- исследование энергетических и поляризационных характеристик ослабления видимого и ИК излучения средой, состоящей из ансамблей частиц различной формы и ориентации;

- создание оптической модели газовой-аэрозольной среды для определения ослабления и функции пропускания видимого и ИК излучения с учётом аэрозольной экстинкции и молекулярного поглощения отдельно и совместно.

Научная новизна диссертационной работы состоит в том, что впервые:

- разработана параметризованная физико-математическая модель полидисперсной среды, состоящей из частично прозрачных преимущественно ориентированных кристаллов. Модель допускает произвольное расположение среды, источника и приёмника излучения;

- разработано решение обратной задачи определения ориентации, флаттера, показателя преломления и параметров распределения анизотропных частиц при лазерном зондировании;

- получены алгоритмы для расчёта элементов матрицы экстинкции средой с кристаллическими частицами, обеспечивающие получение полной информации об ослаблении видимого и ИК излучения с учётом поляризации, дихроизма и анизотропии рассеяния;

- создана физико-математическая модель аэродисперсной среды для изучения распространения видимого и ИК излучения, учитывающего молекулярное поглощение и ослабление, обусловленное рассеянием и поглощением дисперсным компонентом с различными физико-химическими свойствами, включая анизотропию.

Научная и практическая значимость работы состоит в разработке параметризованной модели дисперсной анизотропной среды обеспечивающей определение энергетических и поляризационных характеристик однократно рассеянного излучения видимого и ИК излучения в условиях произвольной преимущественной ориентации крупных кристаллов по отношению к источнику и приёмнику излучения. Относительно простая численная реализация предложенной модели, заключающей в себе физическую ясность картины светорассеяния, позволяет

проще разбираться в сложных сплетениях особенностей оптических свойств многокомпонентного кристаллического облака и повышает эффективность его исследования.

Полученная в диссертации матрица экстинкции значима с точки зрения улучшения представления характеристик ослабления, используемых в лидарном уравнении, в уравнении переноса излучения и при определении радиационного баланса атмосферы с перистыми облаками.

В работе предложена модель многокомпонентной аэрозольно-газовой среды с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами в широком спектральном диапазоне, включающем видимый и ИК участки. При этом могут быть выделены спектральные диапазоны, в которых наилучшим образом выявляются особенности ослабления, обусловленные определёнными составляющими среды. Это имеет практическую значимость для определения местоположения источников, возмущающих атмосферу, для контроля экологической ситуации в локальном и глобальном масштабах, а так же для установления природы и микрофизических параметров среды.

Диссертация О.В. Шефер общим объемом 391 страниц, включая 137 рисунков и 11 таблиц, состоит из введения, 7 глав, заключения и списка литературы из 304 наименований.

Во введении обоснована актуальность темы работы и излагается состояние проблемы. Здесь указаны цель и задачи исследования, раскрывается научная новизна и практическая значимость работы, формулируются основные положения, выносимые на защиту, приведены основные публикации по теме диссертации и описана общая структура работы.

В первой главе представлен обзор основных компонент аэродисперсной среды. Проиллюстрированы данные о возможных формах, размерах и оптических свойствах частиц. При этом основной акцент сделан на крупные атмосферные кристаллы, принимающие устойчивое положение в пространстве. Рассмотрены способы параметризации микрофизических свойств кристаллических облаков, к которым относятся введение закона распределения частиц по размерам, аспекта отношения размеров частиц и их средних размеров. Представлена краткая информация о наиболее востребованных методах расчета характеристик светорассеяния, а именно, теория Ми, дискретно-дипольное приближение, Т-матричная процедура, а также методы физической и геометрической оптики. Особо выделены возможности гибридного метода, позволяющего корректно и эффективно рассчитать характеристики однократного рассеяния для совокупности крупных преимущественно ориентированных кристаллов. Приводятся общие характеристики основных оптических методов для экспериментального исследования газовой дисперсной среды, которые следует учитывать при разработке численной модели рассеивателя. Представлены формулы расчета

характеристик ослабления, рассеяния и поглощения, которые являются базовыми в определении оптических параметров среды.

Во **второй главе** представлена оптическая модель частицы для исследования энергетических и поляризационных характеристик излучения, рассеянного крупной полупрозрачной пластинкой. В рамках метода физической оптики в алгоритмической форме представлены соотношения для элементов матриц рассеяния и ослабления, а также для сечений рассеяния, пропорциональных соответствующим параметрам вектора Стокса. Представленные выражения связывают физические параметры частицы (геометрические размеры, комплексный показатель преломления) и параметры падающего излучения (длину волны, состояние поляризации) с характеристиками излучения трансформированного рассеивателем при различных положениях источника, приемника и кристалла. Для отдельной частицы проведено численное исследование энергетических и поляризационных характеристик, являющихся комбинациями элементов матрицы рассеяния в зависимости от физических параметров частицы и характеристик падающего излучения. Определены границы применимости метода физической оптики в задачах рассеяния лучистой энергии пластинчатым кристаллом.

В **третьей главе** дается сравнительная оценка интенсивного излучения, отраженного от различных по форме облачных кристаллов, среди которых выделены крупные преимущественно ориентированные пластинки. На основе модели пластинчатого кристалла, разработанной в рамках метода физической оптики и представленной в главе 2, численно сформирована параметризованная полидисперсная среда применительно к монобистатическому лазерному зондированию кристаллических облаков. Демонстрируется вывод формулы для коэффициента обратного рассеяния лидарного сигнала, зеркально отраженного от системы ориентированных пластинок. Полученная формула связывает аномально высокие амплитуды отраженного эхо-сигнала с основными характеристиками полидисперсной среды. Получены и исследованы энергетические и поляризационные характеристики отраженного излучения с учетом флаттера пластинок и применения процесса сканирования источником (приемником). Предложены простые аналитические выражения, связывающие ориентацию и оптические свойства ансамбля пластинчатых кристаллов с отношениями коэффициентов обратного рассеяния при линейной и круговой поляризациях падающего излучения. Опираясь на отношения коэффициентов обратного рассеяния, изложен алгоритм определения показателя преломления и ориентации пластинок, в основу которого положена двухугловая схема зондирования и решение двух нелинейных уравнений, сводимое к итерационному процессу. Иллюстрируемая методика применима при оценивании отношений параметров вектора Стокса для зеркально отраженного излучения от системы пластинок в случае бистатического зондирования. Исследована информативность отношения коэффициентов рассеяния, один из которых

получен при зеркальном отражении излучения от пластинок, а другой при малом смещении оси приема (в случае бистатической схемы зондирования) или оси лидара (в случае моностатического зондирования) от этого направления. На основе этих характеристик предложена схема оценивания микрофизических параметров ансамбля пластинок и их флаттера по данным моно-бистатического зондирования.

В **четвертой главе** приводятся соотношения для расчета матрицы экстинкции для крупного полупрозрачного пластинчатого кристалла, полученные в рамках метода физической оптики. Демонстрируются выражения для расчета сечения (фактора) ослабления лучистой энергии, а также его относительных характеристик для пластинки, прямоугольного и гексагонального столбиков. Представленные выражения связывают физические параметры частицы (геометрические размеры, показатель преломления) и параметры падающего излучения (длину волны, состояние поляризации) с характеристиками излучения, прошедшего через кристалл при различных положениях источника, приемника и кристалла. Полученные выражения позволяют рассчитать характеристики распространяющегося оптического излучения с учетом возможных колебаний частиц относительно их устойчивого положения в пространстве.

Представлены результаты численного исследования энергетических и поляризационных характеристик ослабления в зависимости от микрофизических, оптических, ориентационных параметров пластинок и столбиков, а также состояния поляризации падающего излучения видимого и ИК диапазона длин волн. Демонстрируются особенности ослабления отдельными крупными кристаллами, которые будут нивелироваться или оставаться ярко выраженными при рассмотрении системы частиц.

В **пятой главе** приведены результаты численного исследования ослабления для системы кристаллов различной формы и размеров. При расчете экстинкции для крупных кристаллов применялся метод физической оптики, а для мелких частиц объемной формы использовалась теория Ми. В качестве характеристик ослабления рассмотрены коэффициент (и фактор) ослабления и его комбинации, а также наиболее информативные элементы матрицы экстинкции. Проанализировано влияние формы, комплексного показателя преломления, ориентации частиц и параметров распределения по их размерам, а также длины волны и состояния поляризации падающего излучения на ослабление лучистой энергии. Определены условия возникновения спектрального хода коэффициента ослабления в видимом и ИК диапазонах длин волн в случае крупных кристаллов. Продемонстрировано, что вклад в формирование спектральной зависимости коэффициента ослабления частицами, соизмеримыми с длиной волны падающего излучения на порядки ниже, чем для случая крупных кристаллов с плоскопараллельными гранями при наименьшем их количестве. Показано, что волновая зависимость ослабления, обеспечивается прохождением излучения, главным образом, через преимущественно ориентированные

пластинчатые кристаллы. Обнаружено, что поляризационные характеристики экстинкции для крупных кристаллов могут составлять несколько десятков процентов для ИК диапазона длин волн.

В шестой главе в рамках метода физической оптики демонстрируется вывод приближенных аналитических выражений для коэффициентов ослабления и поглощения оптического излучения полидисперсной системой горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. При этом использован модифицированный гамма-закон распределения частиц по размерам. Алгебраические формулы позволяют проводить вычисления коэффициента ослабления с погрешностью не более 2.5% и коэффициента поглощения – не более 1%.

Проиллюстрированы основные закономерности спектральной зависимости характеристик однократного рассеяния (коэффициенты ослабления, рассеяния, поглощения и вероятность выживания кванта) для горизонтально ориентированных пластинок и сферических частиц. Показаны особенности оптических характеристик ледяных кристаллов с различными микрофизическими свойствами.

Седьмая глава иллюстрирует результаты численного исследования зависимости ослабления и пропускания видимого и ИК излучения аэродисперсной средой в состав которой входят различные компоненты с различными микрофизическими и оптическими параметрами.

На основе численного исследования функции пропускания ИК излучения газово-аэрозольной средой сформированы критерии совместного и отдельного учета влияния молекулярного поглощения и аэрозольной экстинкции. При этом для определенности рассмотрена смесь водяного пара и мелкодисперсного компонента с различными микрофизическими и оптическими свойствами. С ошибкой не более 5% определены граничные значения концентрации и эффективных размеров частиц, когда основной вклад приходится на одну из составляющих или же, следует учитывать их совместное влияние на общее ослабление рассматриваемой среды.

Представлены результаты численного эксперимента по определению пропускания видимого и ИК излучения газово-аэрозольным слоем над морскими акваториями. В качестве основной газовой составляющей среды выбран метан, дисперсная составляющая представлена системой сферических частиц. Анализируется отдельный и совместный вклад молекулярного поглощения метана и аэрозольной экстинкции (с учетом рассеяния и поглощения частицами) в формирование пропускания оптического излучения газово-дисперсной средой. Продемонстрированы закономерности ослабления, проявляющиеся в различных спектральных диапазонах длин волн в зависимости от физических свойств газово-аэрозольной смеси, которые могут быть положены в основу определения источников возмущения пограничного слоя атмосферы морских акваторий и оценки состава аэродисперсной среды.

Проведен численный эксперимент по определению спектральной зависимости пропускания видимого и ИК излучения через выбросы продуктов сгорания ракетного двигателя, содержащих триоксид диалюминия и водяной пар. Иллюстрируются спектральные особенности оптических характеристик среды при различных параметрах функции распределения частиц по размерам, позволяющие контролировать физико-химические свойства выхлопов двигателя.

В **заключении** автор излагает основные достижения своей работы по теме диссертации.

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается сравнением известных асимптотических величин оптических характеристик и соответствующих расчётных значений, полученных на основе предложенной физико-математической модели; корректностью учёта особенностей ослабления и рассеяния излучения кристаллическими частицами при согласии с классическими представлениями соответствующих физических процессов и количественным согласием результатов с аналогичными данными и экспериментальными фактами.

Прежде всего, **необходимо отметить**, что автор диссертации достиг представленной в работе цели и решил все необходимые для этого задачи. В результате была построена параметризованная модель кристаллической облачности, образованной преимущественно ориентированными ледяными пластинками. Рассчитана матрица рассеяния такой облачности, определены наиболее информативные схемы для оценки размеров, концентрации, показатели преломления и пространственной ориентации частиц. Объяснено явление зеркального отражения такими облачными слоями, оценена интенсивность зеркально отражённого излучения. Предложены алгоритмы дистанционного определения флаттера пластинок, обусловленного динамической турбулентностью. Применительно к поляризационному лазерному зондированию разработан алгоритм определения ориентации и показателя преломления частиц для системы преимущественно ориентированных пластинок. Разработан также алгоритм расчёта матриц экстинкции перистых облаков с ориентированными ледяными кристаллами. Это позволило установить зависимость состояния поляризации рассеянных и распространяющихся пучков от ориентации анизотропных частиц, а также связь коэффициентов ослабления с микроструктурой ориентированных ледяных кристаллов. Изучена спектральная зависимость элементов матрицы экстинкции, объясняющаяся наличием мелких частиц в ансамбле облачных частиц различных размеров. Создана модель газовой-аэрозольной среды для изучения ослабления и пропускания видимого и ИК излучения с учётом молекулярного поглощения газовой компоненты, а также рассеянием и поглощением аэрозольной составляющей с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами.

Однако диссертационная работа О.В. Шефер не лишена некоторых недостатков.

Замечания к диссертации.

1. При описании рассеяния от тонкой пластинки (стр. 63-64) указано о возможности пренебречь рассеянием от боковой поверхности из-за её малой площади. Это справедливо по отношению к интенсивности, но для определения поляризационных характеристик эта часть оптической энергии может оказаться значимой из-за возможной поляризации (изменения поляризации) отраженного боковой гранью излучения.

2. В главе 7 анализируется ослабление излучения газовой-аэрозольной средой, содержащей метан, и выбрана длина волны поглощения метана 7,66 мкм, как перспективная для оценки его содержания в воздухе. Однако эта длина волны находится в области вклада других атмосферных газов (в частности, паров воды), что может мешать обнаружению метана, особенно при его низких концентрациях. Целесообразно было бы сделать оценки.

3. На основе данных рис.7.17; 7.19; 7.20; 7.22; 7.23 при анализе функции пропускания газовой-аэрозольной средой делается вывод о слабом влиянии (не более 10%) микроструктуры кристаллических частиц. При этом взят слой атмосферы протяженностью 10 м. Этот результат приложим скорее для технологических целей, чем для атмосферных трасс, длина которых сто и более метров. Необходимо было бы это обговорить.

4. Автор допускает свободу в терминах без необходимых пояснений. Так на стр. 92 появился термин «матрица Мюллера» без разъяснений, что это синоним матрицы рассеяния. Аналогично на стр. 292 - «вероятность выживания кванта», а до этого использовался термин альbedo однократного рассеяния.

5. Присутствуют стилистические и орфографические погрешности: на стр. 64 на рис. 2.2 отсутствует точка O_1 , которая используется в тексте; рис. 7.16 на стр. 333 содержит кривую 4, а к каким параметрам она относится не указано ни в тексте, ни в подписи; на стр.196 вместо выражения $x = \frac{2\pi a}{\lambda}$ стоит $x = \frac{2\pi d}{\lambda}$; на стр. 6 и 33 слово «кондиционные» вместо конденсационные; на стр. 51 непонятное слово «хост».

Перечисленные замечания, впрочем, не снижают ценности диссертационной работы.

Защищаемые положения отражены в тексте диссертации и подкреплены ссылками на опубликованные работы автора. По теме диссертации опубликовано 104 научных работ (в том числе 40 статей в журналах, рекомендованных ВАК). Апробация работы проведена на многочисленных всероссийских и международных конференциях, где был представлен ряд докладов.

Результаты работы и её апробация достаточно полно освещены в автореферате и в приведённых публикациях автора. Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации.

На основании вышеизложенного считаю, что диссертация О.В. Шефер «Параметризованная модель кристаллического облака для

исследования характеристик однократного рассеяния лучистой энергии» является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение проблемы, имеющей существенное значение для физики атмосферы. Она обобщает самостоятельные исследования автора и представляет собой законченный научно-исследовательский труд, выполненный на актуальную тему, и содержит новые научные результаты. Диссертация О.В. Шефер удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к докторским диссертациям и требованиям ВАК, предусмотренных «Положением о порядке присуждения учёных степеней», утверждённым Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года №842, а её автор, безусловно, заслуживает присуждения учёной степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 - физика атмосферы и гидросферы.

Главный научный сотрудник
Федерального государственного
бюджетного
учреждения науки Института оптики
атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского
Отделения Российской Академии Наук,
доктор физико-математических наук
по специальности 01.04.05 - оптика,
старший научный сотрудник
634055, г. Томск,
Площадь академика Зуева, д.1.
Телефон: +7 (3822) 492-408
e-mail: matvienko@iao.ru

Матвиенко
Геннадий
Григорьевич

Я, Матвиенко Геннадий Григорьевич, даю согласие на включение своих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета и их дальнейшую обработку

Г.Г. Матвиенко

Подпись Матвиенко Г.Г. заверяю.

Учёный секретарь
Института оптики атмосферы
им. В.Е. Зуева Сибирского
Отделения Российской Академии
Наук, кандидат физико-
математических наук



Тихомирова
Ольга
Владимировна

29.04.2019