

*На правах рукописи*



**Шефер Ольга Владимировна**

**ПАРАМЕТРИЗОВАННАЯ МОДЕЛЬ  
КРИСТАЛЛИЧЕСКОГО ОБЛАКА ДЛЯ ИССЛЕДОВАНИЯ  
ХАРАКТЕРИСТИК ОДНОКРАТНОГО РАССЕЯНИЯ  
ЛУЧИСТОЙ ЭНЕРГИИ**

Специальность 25.00.29 – Физика атмосферы и гидросферы

**АВТОРЕФЕРАТ**

Диссертации на соискание ученой степени доктора  
физико-математических наук

Томск – 2019

Работа выполнена в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Национальный исследовательский Томский политехнический университет».

**Научный консультант:** доктор физико-математических наук, профессор  
Каргин Борис Александрович

**Официальные оппоненты:**

Матвиенко Геннадий Григорьевич, доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник, ФГБУН «Институт оптики атмосферы имени В.Е. Зуева СО РАН, главный научный сотрудник

Петрушин Александр Григорьевич, доктор физико-математических наук, доцент, Обнинский институт атомной энергетики – филиал ФГАОУ ВО НИЯУ «МИФИ», профессор

Черемисин Александр Алексеевич, доктор физико-математических наук, профессор, Красноярский институт железнодорожного транспорта филиала ИрГУПС, профессор

**Ведущая организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук, г. Москва

Защита состоится 22 мая 2019 г. в 15 ч. 00 мин на заседании диссертационного совета Д 003.061.01 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН) по адресу: 630090, Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, 6, конференц-зал ИВМиМГ СО РАН, тел. +7(383)330-71-59.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте ИВМиМГ СО РАН, <http://icmmg.nsc.ru>

Автореферат разослан 14 февраля 2019 года.

Ученый секретарь

диссертационного совета Д 003.061.01

на базе ИВМиМГ СО РАН,

д.ф.-м.н.



Рогозинский Сергей Валентинович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

### Актуальность исследований

Кристаллические облака играют важную роль в погодообразующих процессах земной атмосферы [9\*]. Оптические свойства облаков определяют условия распространения излучения и оказывают решающее воздействие на радиационный баланс. К настоящему времени роль кристаллических облаков в прогнозировании климата Земли является одной из самых неопределенных [16\*]. Воздействие перистых облаков на радиационный поток может вызвать как парниковый эффект, так и привести к выхолаживанию атмосферы. Изучение влияния формы, размера и концентрации частиц, а также их оптических и ориентационных свойств на распространение лучистой энергии имеет решающее значение в понимании роли ледяных облаков в трансформации радиационных потоков. Проблеме изучения оптических характеристик кристаллических облаков в современной науке уделяется большое внимание [3\*, 9\*, 16\*, 20\*]. Она решается в рамках многих международных научно-исследовательских проектов, связанных с изучением атмосферы Земли (например, Radiation Sciences Program, Global Aerosol Climatology Project, SIRAMOS и многие др.). Результатом таких исследований является разработка целого ряда баз данных оптических характеристик атмосферных образований по различным аспектам.

Различного рода природные и технологические процессы угрожающе влияют на климат, среду обитания и на здоровье людей [19\*, 29\*]. Необходимость проведения мониторинга и оценка физических параметров окружающей среды, как в локальных, так и в глобальных масштабах, привела к интенсивному развитию теоретических и экспериментальных методов исследования атмосферных образований природного и антропогенного происхождения. К малоизученным объектам относятся кондиционные следы самолета, существенно влияющие на радиационные характеристики атмосферы, особенно в местах с плотным трафиком полетов. Оптические явления, формируемые при взаимодействии лучистой энергии с атмосферными кристаллами [2\*, 11\*, 18\*, 23\*, 24\*], могут создавать «слепые зоны» для приёмного устройства и влиять на перенос изображения в атмосфере. Важнейшей проблемой судоходства в процессе освоения Арктики является предсказание поведения льдов. Ее решение во многом зависит от состояния и состава атмосферы. В частности, наличие гипса в надповерхностном слое приводит к длительному и устойчивому замораживанию водной поверхности [14\*].

Рассеяние лучистой энергии является мощным средством для исследования газовой-дисперсных сред. Оптические методы с применением как

наземных, так и аэрокосмических технологий считаются наиболее эффективными в изучении кристаллических облаков [1\*, 2\*, 4\*, 20\*, 22\*, 24\*, 28\*]. Среди них как наиболее перспективные выделяются пассивное и лазерное зондирование. Приемные устройства, регистрирующие не только энергетические, но и поляризационные характеристики излучения широкого диапазона длин волн, используются для получения наиболее информативных данных оптических характеристик аэродисперсных сред [4\*, 26\*]. Ряд научных центров мирового сообщества на протяжении многих лет активно проводят исследование кристаллических облаков с применением лидарных систем [2\*, 4\*, 12\*, 22\*, 23\*]. К настоящему времени разработана концепция применения пассивного и лазерного зондирования при использовании полистатических технологий для определения горизонтальных и вертикальных профилей физико-химических характеристик атмосферных образований и выявления взаимно индуцированных изменений аэродисперсных сред различной природы. Эта программа направлена на реализацию прорывных инновационных технологий в области изучения локального и глобального распределения характеристик облачности и осадков, а также установления связи между состоянием атмосферы и проходящими в ней процессами [20\*].

Для извлечения свойств ледяных облаков по данным зондирования используют приемлемую информацию, которая, как правило, формируется на основе соответствующих численных моделей. К настоящему времени разработан целый ряд численных имитаций частиц, устанавливающих взаимосвязь между, с одной стороны, характеристиками светорассеяния, с другой стороны, параметрами рассеивателя и падающего излучения. Для расчета характеристик рассеяния несферическими частицами с произвольной формой и ориентацией в пространстве широко используются приближение дипольных моментов (DDA) и T-матричная процедура (TMM). Однако их применение не является эффективным в случае частиц, размеры которых много больше длины волны падающего излучения. Стремительный рост вычислительных возможностей и введение ряда алгоритмических приемов (в частности, ощутимый вклад в развитие методики T-матриц сделан Мищенко М.И. [21\*], а в усовершенствование DDA – Юркиным М.А. и Hoekstra A.G. [31\*]) расширяют границы применения этих методов.

Большой вклад в изучение характеристик рассеяния атмосферными кристаллами был сделан Liou K.N., Tokano Y. [27\*], Yang P. [28\*] и их коллегами. Ими проведены численные исследования свойств рассеяния света крупными кристаллами при использовании метода геометрической оптики, а впоследствии и дополнительном учете волновых эффектов рассеяния электромагнитного излучения [10\*, 13\*, 30\*]. Существенный вклад в

разработку оптических моделей кристаллических и смешанных облаков сделан А.Г. Петрушиным [5\*, 6\*]. Предложенные им параметризованные модели атмосферных кристаллов предназначены для расчета оптических характеристик дисперсных сред применительно к задачам дистанционного зондирования и распространения оптического излучения через кристаллические и смешанные облака. Для расчета характеристик светорассеяния крупными кристаллами использовался метод геометрической оптики с учетом дифракции. Поповым А.А. был предложен вычислительный метод пучков, позволяющий в рамках физической оптики решить задачу рассеяния электромагнитного излучения для крупных полупрозрачных кристаллов выпуклой формы при любом их положении в пространстве [7\*, 8\*, 25\*]. Предложенный им подход позволил корректно рассчитать угловое распределение лучистой энергии с учетом тонкой структуры рассеяния, обеспечиваемой особенностью формы кристалла и волновой природой излучения. Затем этот метод был адаптирован и использован Поповым А.А. и Шефер О.В. применительно к моностатическому поляризационному зондированию для расчета характеристик рассеяния системой частиц [1, 2, 10, 11]. Позднее, исследователями ИОА СО РАН Боровым А.Г., Коношонкиным А.В. и др. методом трассировки лучей, а затем в приближении физической оптики разработан метод расчета матрицы рассеяния для отдельных кристаллов произвольной формы [17\*]. В силу сложности численной реализации определения характеристик рассеяния оптического излучения системой крупных полупрозрачных кристаллов проблема расчета оптических характеристик полидисперсными атмосферными средами остается открытой.

Известно, что после взаимодействия с частицами могут измениться не только энергетические, но и поляризационные свойства электромагнитного излучения. Особая роль в этом принадлежит кристаллам, имеющим преимущественную ориентацию в пространстве. При рассеянии света на таких кристаллах могут возникать в атмосфере различного рода оптические явления. Так, например, при отражении лучистой энергии от плоской поверхности кристаллов с устойчивой ориентацией в пространстве формируются высокоинтенсивные отраженные потоки излучения [18\*, 22\*, 23\*]. Platt С.М.Р. один из первых экспериментально исследовал аномальное обратное рассеяние с применением моностатического сканирующего лидара [24\*]. Нами впервые разработаны интерпретационные схемы аномального рассеяния применительно к моно-бистатической схеме зондирования для количественной оценки физико-химических параметров частиц [4, 5, 10, 15–18]. При этом полученные результаты для случая моностатической схемы совпадают не только качественно, но и количественно с экспериментальными данными аномального

обратного рассеяния, представленными Platt С.М.Р. [23\*, 24\*]. Позднее, численное исследование зеркально отраженного излучения было проведено группой исследователей под руководством Борового А.Г. [11\*]. Несмотря на то, что процесс аномального рассеяния известен давно, его особенности еще не изучены в полной мере.

Изучение поляризационных эффектов рассеяния и ослабления лучистой энергии для атмосферных кристаллов далеко от завершения. Так, например, для крупных кристаллов, в своем большинстве, ослабление рассматривают как скалярную величину. К настоящему времени появились работы, иллюстрирующие векторную природу ослабления лучистой энергии, при этом показаны энергетические и поляризационные свойства экстинкции для слабо поглощающих отдельных частиц [13\*, 30\*]. Впервые автором работы получена матрица экстинкции (МЭ), содержащая полную информацию об ослаблении излучения крупными полупрозрачными пластинчатыми кристаллами, преимущественно ориентированными в пространстве, с учетом функции распределения частиц по размерам. Кроме того, определены ранее неустановленные ярко выраженные закономерности энергетических и поляризационных характеристик экстинкции для крупных кристаллов произвольной формы [20, 23, 25–27, 29–33, 38–40].

К настоящему времени накоплен обширный материал по изучению оптических характеристик дисперсных и газовых компонент [3\*, 15\*, 16\*, 29\*]. Получена качественная оценка основных параметров однородных по составу аэрозолей и газов. Однако влияние газовой-дисперсной смеси на трансформацию излучения в условиях атмосферы не изучено, многие особенности не определены или требуют уточнений. В частности, оптические характеристики кристаллических облаков для ИК области практически не исследованы. Это создает серьезную проблему для изучения радиационного режима атмосферы. Не решена задача согласованности экспериментальных и численных данных оптических характеристик. Эта проблема вызвана различием реальных параметров среды (атмосферное образование в природных условиях есть многокомпонентная среда) и модели (в своем большинстве это монодисперсная среда или усредненный вариант полидисперсной среды без учета особенностей светорассеяния). Исследователи указывают на необходимость проведения параметризации характеристик рассеяния, ослабления и поглощения по различным аспектам (по микрофизическим, оптическим и ориентационным параметрам частиц) для различных спектральных областей. Это позволит выявить информативность оптических характеристик и сформировать надежную методику оценивания физико-химических параметров

многокомпонентной среды по данным зондирования при различных условиях эксперимента.

В связи с вышеуказанным, актуальность темы диссертации состоит в том, что предложенная модель аэродисперсной среды обеспечивает численное исследование характеристик однократного рассеяния для ансамбля полупрозрачных кристаллов с учетом их пространственного расположения и функции распределения по их размерам, а также при рассмотрении состояния поляризации падающего видимого и ИК излучения. Решение этой задачи позволило получить новые данные, которые следует учитывать в разработке климатических моделей, в изучении переноса излучения через анизотропные среды, при оценке данных пассивного и лазерного зондирования кристаллических облаков.

### **Цели и задачи**

**Целью** данной работы является разработка комплекса оптических моделей кристаллической облачности, позволяющей численно имитировать газодисперсную среду природного и антропогенного происхождения с различными физико-химическими свойствами для исследования особенностей ослабления лучистой энергии с учетом дихроизма и анизотропии рассеяния, а также для оценки характеристик высокоинтенсивного отраженного излучения.

Для этого сформулированы следующие **задачи**:

– Построить физико-математическую модель крупного кристалла, позволяющую рассчитать характеристики однократного рассеяния для монодисперсной среды с возможностью реализовать произвольное расположение частицы, источника и приемника излучения, а также состояние поляризации падающего излучения. В качестве отдельного кристалла выбрать ту форму частицы, которая наблюдается в природе с высокой повторяемостью и формирует наиболее ярко выраженные оптические эффекты при взаимодействии с лучистой энергией.

– Разработать эффективную модель аэродисперсной среды для исследования энергетических и поляризационных характеристик высокоинтенсивного отраженного оптического излучения применительно к пассивному и лазерному зондированию кристаллических облаков.

– Разработать схемы оценивания микрофизических, оптических и ориентационных параметров кристаллов по данным аномального рассеяния применительно к моно-бистатическому лазерному зондированию.

– Получить в алгоритмической форме выражения для расчета элементов матрицы экстинкции для крупных кристаллов, которые в наибольшей степени влияют на характер ослабления по своим микрофизическим, оптическим и ориентационным свойствам. Для отдельных крупных кристаллов изучить

закономерности спектральной зависимости элементов матрицы экстинкции при различных физических параметрах частиц.

– Провести исследование параметризованных энергетических и поляризационных характеристик ослабления видимого и ИК излучения средой, состоящей из ансамблей частиц различных по форме и ориентации.

– Сформировать оптическую модель газовой-аэрозольной среды для расчета ослабления и функции пропускания видимого и ИК излучения с учетом молекулярного поглощения и аэрозольной экстинкции, обусловленной рассеянием и поглощением частицами различной природы.

– Провести численный эксперимент по определению ослабления и функции пропускания для ряда моделей газовой-аэрозольных сред антропогенного и природного происхождения.

– Провести оценку раздельного и совместного влияния газовой и аэрозольной составляющих на общее пропускание средой.

### **Научная новизна**

В результате выполнено:

– Впервые разработана оригинальная параметризованная физико-математическая модель полидисперсной среды, представленная системой полупрозрачных крупных преимущественно ориентированных пластинок для расчета энергетических и поляризационных характеристик рассеяния, сформированных на основе матрицы рассеяния. При этом введена параметризация по размерному параметру, аспекту отношения геометрических размеров кристалла с учетом закона распределения частиц по размерам и взаимосвязи значений комплексного показателя преломления с длиной волны падающего излучения видимого и ИК диапазонов. Преимущество предложенной модели заключается в ее универсальности, поскольку предусматривается произвольный выбор расположений источника, приемника и рассеивателя, что обеспечивает возможность ее применения для широкого круга задач физики атмосферы.

– Впервые получены оригинальные аналитические формулы для расчета характеристик однократного рассеяния (коэффициент аномального обратного рассеяния, коэффициент ослабления, коэффициент поглощения, альbedo однократного рассеяния), позволяющие получить количественную оценку указанных величин для полидисперсной среды, в состав которой входят горизонтально ориентированные пластинки.

– Предложенные схемы оценивания ориентации, флаттера, показателя преломления и параметров распределения частиц по размерам по данным высокоамплитудного зеркально отраженного излучения от системы



преимущественно ориентированных пластинок при бистатическом лазерном зондировании кристаллических облаков не имеют аналогов.

– Впервые получены выражения в алгоритмической форме для расчета элементов матрицы экстинкции в случае системы крупных преимущественно ориентированных пластинок, позволяющие получить полную информацию об ослаблении видимого и ИК излучения с учетом дихроизма и анизотропии рассеяния. Это обеспечивает качественно новое представление оптических характеристик кристаллических облаков, зависящих от поляризационного эффекта ослабления.

– Результаты сравнительного анализа значений энергетических и поляризационных характеристик ослабления видимого и ИК излучения кристаллами различными по форме, размерам и характеру ориентации являются новыми. Впервые продемонстрировано превалирующее влияние в формировании особенностей ослабления лучистой энергии тонких преимущественно ориентированных пластинок.

– Установлены параметры рассеивателя и лучистой энергии для формирования нейтрального и спектрального хода характеристик ослабления видимого и ИК излучения кристаллической облачностью. Эти сведения корректируют и дополняют имеющиеся.

– Впервые разработана физико-математическая модель аэродисперсной среды для исследования пропускания видимого и ИК излучения. Ее новизна состоит в том, что в ней учитываются молекулярное поглощение газовой составляющей и ослабление, обусловленное рассеянием и поглощением дисперсным компонентом с различными физико-химическими свойствами, в том числе анизотропными.

### **Теоретическая и практическая значимость**

Методики определения физико-химических параметров многокомпонентной кристаллической облачности основываются на выделении определенного спектрального диапазона длин волн, где в большей степени проявляется влияние того или иного компонента среды при определенных условиях эксперимента (например, сканирование, измерение углового распределения трансформированного излучения и т.д.). В этой связи предложенная параметризованная модель кристаллического аэрозоля в виде системы пластинок является основой для расчета оптических характеристик среды, в состав которой входят преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы. 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.

Разработанная оптическая модель атмосферной среды может быть использована для оценки данных высокоинтенсивной зеркально отраженной лучистой энергии, полученных с применением моно-бистатической схемы зондирования атмосферных образований, содержащих преимущественно ориентированные пластинки. Предложенная схема оценивания энергетических и поляризационных характеристик зеркально отраженного излучения является инструментом для определения микрофизических, оптических и ориентационных параметров пластинчатых кристаллов, входящих в сложную по составу аэродисперсную среду. Кроме того, пластинки могут служить своего рода «трассерами» для определения характеристик других дисперсных составляющих среды.

Использование полученной в работе матрицы экстинкции позволяет улучшить представление характеристик ослабления, используемых в лидарном уравнении и в уравнении переноса излучения, а также при решении задач многократного рассеяния для случая крупных преимущественно ориентированных кристаллов.

Предложенная модель многокомпонентной газовой-аэрозольной смеси для расчета характеристик ослабления способна имитировать многокомпонентную среду с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами. На основе оценки совместного и отдельного вклада составляющих газовой-аэрозольной смеси могут быть установлены с заданной точностью граничные условия микрофизических параметров среды, когда следует учитывать те или иные компоненты. Это позволяет сформировать наиболее оптимальную модель для численного исследования. При этом могут быть выделены спектральные диапазоны, в рамках которых наилучшим образом выявляются особенности ослабления, обусловленные определенными составляющими среды. Это имеет практическую значимость для определения местоположения источников, возмущающих атмосферу, для контроля экологической ситуации в локальном и глобальном масштабах, а также для установления природы и микрофизических параметров среды.

### **Методы исследований**

Диссертация посвящена разработке оптических моделей аэродисперсной среды применительно к решению задач пассивного и лазерного зондирования, а также к распространению лучистой энергии через ледяные облака, в состав которых входят преимущественно ориентированные кристаллы. Применение полученной модели в виде ансамбля преимущественно ориентированных пластинок является надежным при решении задач, основанных на методологии

выделения из многокомпонентной среды пластинчатых кристаллов, обеспечивающих ярко выраженные и устойчивые особенности характеристик однократного рассеяния.

Для определения оптических характеристик полидисперсной среды, состоящей из частиц различных форм, размеров и характера ориентации применялись различные методы. Для объемных частиц использовалось решение Ми задачи рассеяния плоской волны на сфере. В рамках метода физической оптики моделировался механизм рассеяния лучистой энергии крупными кристаллами. Рассеяние и ослабление излучения преимущественно ориентированными частицами представлены в векторной форме, что позволило определить не только энергетические, но и поляризационные особенности оптических характеристик. Пропускание газовой-аэрозольной смеси вычислялось с учетом двух составляющих: молекулярного поглощения и аэрозольной экстинкции, обусловленной рассеянием и поглощением частицами. Молекулярное поглощение определялось по методологии прямых расчетов («line-by-line»), основанной на использовании баз данных по параметрам спектральных линий (ПСЛ) поглощения атмосферных и примесных газов.

#### **На защиту выносятся следующие положения**

1. Разработанная в рамках метода физической оптики физико-математическая модель кристаллического облака для расчета матрицы рассеяния обеспечивает численное представление характеристик рассеяния полидисперсной средой, состоящей из крупных пластинок при произвольном расположении источника, приемника и плоскости преимущественной ориентации частиц. Авторская модель удовлетворяет требованиям параметризации, применяющейся при дистанционном зондировании и решении задачи переноса лучистой энергии, при учете вариаций параметров распределения частиц по размерам, различных соотношений между толщиной и радиусом пластинки, между длиной волны и значениями комплексного показателя преломления, определяющими природу вещества кристалла. Частный случай зеркального отражения оптического излучения, вытекающий из полученной модели, количественно подтверждается результатами экспериментального исследования аномального обратного рассеяния ледяным облаком, содержащим пластинчатые кристаллы [8, 13, 19, 20].

2. При рассмотрении зеркально отраженного излучения от полидисперсной среды, в состав которой входят крупные преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы, определяются параметры распределения пластинок по размерам и их флаттер по данным моно-бистатического зондирования при малоугловом (до  $1^\circ$ ) сканировании лидаром. При этом информативным

источником данных является отношение дифференциальных коэффициентов рассеяния, один из которых получен при строго зеркальном отражении, а другой при малом отклонении от этого направления. При условии, что оптическая характеристика откладывается по оси ординат, а угловая – по оси абсцисс, то длина интервала, на котором указанная зависимость является константой, определяет величину флаттера, а ее тангенс угла наклона – средний радиус частиц [4, 5, 10, 14–18].

3. В рамках численной модели полидисперсной среды, в состав которой входят крупные преимущественно ориентированные пластинки, по данным поляризационных характеристик зеркально отраженного излучения определяются ориентация и показатель преломления кристаллов. Схема оценивания заключается в расчете отношений между параметрами вектора Стокса для случаев линейной или круговой поляризации падающего излучения и наиболее оптимальна при наклоне плоскости преимущественной ориентации пластинок к направлению падения излучения от 30 до 70 градусов. При линейной поляризации падающего излучения дополнительным условием для нахождения искомым величин кристаллов является изменение (от 0 до 90 градусов) ориентации плоскости поляризации падающего излучения [6, 11, 14, 16, 35, 36].

4. Авторская параметризованная модель матрицы экстинкции, полученная в рамках метода физической оптики, содержит в себе полную информацию об энергетических и поляризационных характеристиках ослабления видимого и ИК излучения для полидисперсной среды, состоящей из крупных преимущественно ориентированных полупрозрачных пластинчатых кристаллов. Осциллирующая зависимость сечения ослабления от размерного параметра для частного случая, вытекающего из предложенной модели, количественно совпадает с соответствующими расчетами по методу дискретно-дипольного приближения других исследователей [3, 23, 25, 29].

5. Предложенные расчетные соотношения для коэффициентов ослабления видимого и ИК излучения для систем крупных пластинок и столбиков, а также мелких кристаллов представляют собой модель полидисперсной ледяной среды, обеспечивающей спектральную зависимость экстинкции при различных микрофизических, оптических и ориентационных параметрах частиц с учетом поляризации падающего излучения. Крупные преимущественно ориентированные пластинки и частицы, соизмеримые с длиной волны падающего излучения, оказывают превалирующее влияние на волновую зависимость ослабления более чем на порядок по сравнению с другими составляющими полидисперсной среды [12, 26, 27, 30, 31, 33, 38].

6. Полученные в рамках метода физической оптики аналитические параметризованные выражения для расчета коэффициента ослабления, коэффициента поглощения, вероятности выживания кванта и аномального обратного рассеяния для системы горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов обеспечивают вычисление указанных характеристик в реальном масштабе времени с погрешностью не более 2.5%. Предложенные алгебраические формулы адекватно описывают связь характеристик однократного рассеяния с параметрами модифицированного гамма-распределения пластинок по размерам (концентрацией пластинок в единице объема, их средним радиусом, характеристикой дисперсии размеров), комплексным показателем преломления частиц и длиной волны падающего излучения [1, 2, 7, 9, 32, 34].

7. Предложенные модели газовой-дисперсной среды, учитывают природу газовых и дисперсных составляющих с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами для произвольной поляризации падающего излучения видимого и ИК диапазонов длин волн и обеспечивают определение отдельного и совместного вклада компонентов смеси в функцию пропускания. На различных спектральных интервалах проявляется селективность составляющих среды с различными физико-химическими свойствами. При равной концентрации различных дисперсных компонент среды в формировании особенностей функции пропускания частицами подавляющий вклад обеспечивают крупные преимущественно ориентированные пластинки [21, 22, 24, 28, 37, 39, 40].

#### **Достоверность представленных результатов**

Достоверность полученных в диссертации результатов обеспечивается:

– результатами сравнения известных асимптотических величин оптических характеристик и соответствующих расчётных значений, полученных на основе предложенной физико-математической модели;

– корректностью учета особенностей ослабления и рассеяния оптического излучения крупными полупрозрачными кристаллами при согласии с классическими представлениями соответствующих физических процессов;

– количественным согласием результатов с аналогичными расчетными данными, полученными исследователями с применением других методов расчета;

– количественным совпадением расчетных характеристик рассеяния и аналогичных экспериментальных данных.

#### **Апробация работы**

Основные результаты диссертационной работы докладывались на всесоюзных и международных конференциях и симпозиумах: Satellite Remote

Sensing of Clouds and the Atmosphere IV (Italy), 1999; MUSCLE International Workshop on Multiple Scattering Lidar Experiments (Italy) - 1999, 2004; International Symposium Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics (Россия, Томск / Иркутск) – 2005, 2007, 2009, 2011, 2012, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018; Актуальные проблемы радиофизики (Россия, Томск) – 2008, 2012, 2013; XXV International Laser Radar Conference, 2010 (Россия, Санкт-Петербург); International Conference on Mechanical Engineering и Automation and Control Systems (MEACS), 2014 (Россия, Томск); XVIII Международный симпозиум и школа молодых учёных по молекулярной спектроскопии высокого разрешения – 2015 (Россия, Томск); VI научно-техническая конференция «Технические проблемы освоения Мирового океана» (ТПОМО-6) – 2015 (Россия, Владивосток); Electromagnetic & Light Scattering (ELS-XV, Germany, Leipzig) – 2015, (ELS-XVI, US, Maryland) – 2017; International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON) – 2016 (Россия, Москва); XI Всероссийская научно-практическая конференция «Перспективные системы и задачи управления» и «Седьмая молодежная школа-семинар «управление и обработка информации в технических системах» – 2016 (Россия, Крым); XIII International Conference on pulsed lasers and laser applications (AMPL) – 2017 (Россия, Томск).

**Участие в выполнении следующих основных проектов и грантов:**

1) РФФИ, проект № 94-02-03190-а, тема «Голографическая диагностика ансамбля оптически мягких частиц» (1994–1995 гг.), исполнитель;

2) РФФИ, проект № 01-05-65209-а, тема «Матрица рассеяния облаков, содержащих ориентированные кристаллы в оптическом диапазоне длин волн» (2001–2003 гг.), исполнитель;

3) РФФИ, проект № 05-08-18150-а, тема «Моделирование процессов лучистого теплообмена для построения пространственных профилей термодинамических параметров среды в неоднородных газовых смесях» (2005–2007 гг.), исполнитель;

4) РФФИ, проект № 06-05-64484-а, тема «Решение задач атмосферной оптики методом Монте-Карло с учетом стохастичности и анизотропии рассеивающих сред» (2006–2008 гг.), исполнитель;

5) РФФИ, проект № 09-05-00963-а, тема «Исследование особенностей переноса излучения в атмосфере методом Монте-Карло с учетом различных типов облачности и подстилающей поверхности» (2009–2011 гг.), исполнитель;

6) РФФИ, проект № 12-05-00169-а, тема «Решение задач оптики облачной атмосферы методом Монте-Карло с учетом стохастичности и анизотропии рассеивающих сред» (2012–2014 гг.), исполнитель;

7) Госконтракт «Наука», тема «Исследование и разработка новых технологий, алгоритмов и программных средств интеллектуальных систем спутниковой навигации и управления мобильными группами (01.01.2012–31.12.2013), исполнитель;

8) Госзадание Минобрнауки России на 2014–2015 гг., № НИР 645 по разделу «Науки о Земле и смежные науки», руководитель.

#### **Личный вклад автора**

Основными соавторами научных публикаций являлись Попов А.А., Войцеховская О.К. и Каширский Д.Е.

Результаты совместной работы с Поповым А.А. по разработке алгоритмов, методик расчета и проведение численного исследования коэффициентов обратного рассеяния для системы преимущественно ориентированных пластинок и коэффициента ослабления для системы горизонтально ориентированных пластинок были положены в основу развития модели, представленной в диссертации. Разработка и численная реализация усовершенствованной физико-математической модели для исследования кристаллической облачности оптическими методами, учитывающих угловое распределение энергетических и поляризационных характеристик рассеяния и матрицу экстинкции, были выполнены автором. Численное исследование и систематизация оптических характеристик однократного рассеяния для отдельных частиц и их ансамблей, выполнялись автором. Обсуждение результатов расчета характеристик рассеяния и ослабления облачными кристаллами проводились при участии Попова А.А. Формирование модели газовой-аэрозольной среды, алгоритмизация, проведение расчетов в части аэрозольной составляющей выполнено автором диссертации. Характеристики газовой молекулярной компоненты получены Войцеховской О.К. и Каширским Д.Е. Анализ полученных результатов газовой-аэрозольной смеси проводился совместно с соавторами.

#### **Публикации**

По теме диссертационной работы О.В. Шефер опубликовано 104 работы: 40 статей в журналах, рекомендованных ВАК (14 статей, индексируемых в Scopus или Web of Science), включая 7 статей в зарубежных научных журналах с  $IF > 1$ , 63 публикации в сборниках трудов международных, всероссийских и региональных конференций и симпозиумов (из них 20 статей в сборниках трудов, индексируемых Scopus или Web of Science) и 1 препринт.

#### **Объем и структура диссертации**

Диссертация состоит из введения, 7 глав, заключения, списка литературы. Работа изложена на 391 страницах, содержит 137 рисунков и графиков, 11 таблиц, библиографию из 304 наименований.

## **Краткое содержание работы**

**Во введении** обоснована актуальность темы работы и излагается состояние вопроса. 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.

**Первая глава** «Физические свойства газовой дисперсной среды для расчета оптических характеристик кристаллических облаков» диссертации носит вводный характер. В ней представлен обзор основных составляющих аэродисперсной среды. Проиллюстрированы данные о возможных формах, размерах и оптических свойствах частиц. 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 геометрической и физической оптики (и их комбинация). Особо выделены возможности гибридного метода для расчета характеристик однократного рассеяния для совокупности крупных преимущественно ориентированных кристаллов. Представлены формулы расчета характеристик ослабления, рассеяния и поглощения, которые являются базовыми в определении оптических параметров среды.

**Во Второй главе** «Методика расчета характеристик светорассеяния для крупного пластинчатого кристалла» дается обоснование выбора модели частицы. В рамках метода физической оптики для исследования характеристик рассеяния оптического излучения предложена численная модель крупного полупрозрачного пластинчатого кристалла (см. рис. 1).

В алгоритмической форме представлены соотношения для элементов матриц рассеяния и ослабления, а также для сечений рассеяния, пропорциональных соответствующим параметрам вектора Стокса. Полученные выражения связывают физические параметры частицы (геометрические размеры пластинки: толщина  $d$  и радиус  $a$ , комплексный показатель преломления  $\tilde{n} = n + i\cdot\chi$ ) и параметры падающего излучения (длина волны  $\lambda$ , состояние поляризации) с характеристиками излучения, трансформированного рассеивателем при различных положениях источника ( $\vartheta_1, \varphi_1$ ), приемника ( $\vartheta_2, \varphi_2$ ) и кристалла ( $\vartheta_3, \varphi_3$ ). Проиллюстрированы особенности рассеяния, позволяющие выделить информативные направления исследования рассеяния для интерпретации данных зондирования. Определены границы применимости



метода физической оптики в задачах рассеяния лучистой энергии пластинчатым кристаллом.

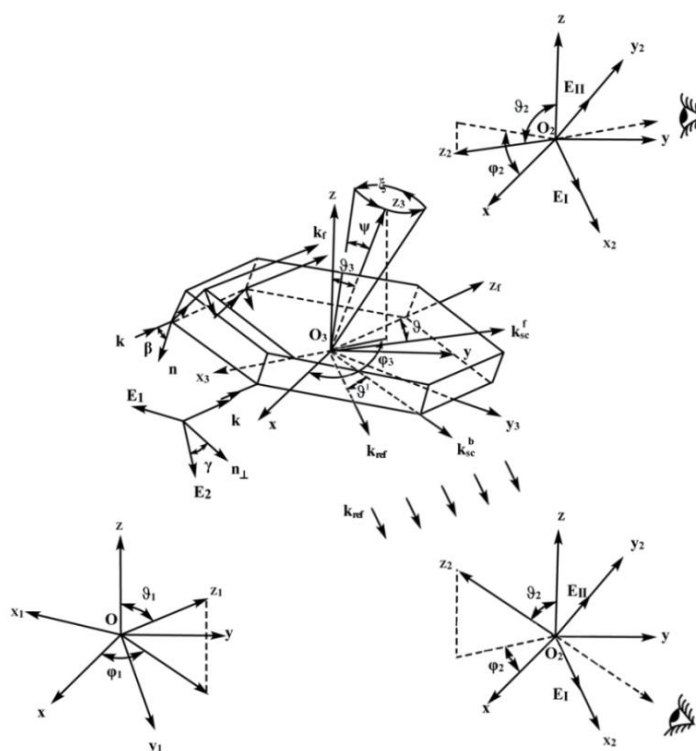


Рис. 1. Совокупность систем координат для описания рассеяния света в пространстве.

В Третьей главе «Оптическая модель полидисперсной среды для исследования высокоинтенсивной отраженной лучистой энергии» на основе модели матрицы рассеяния для отдельной частицы, получены соотношения для коэффициентов рассеяния, пропорциональных соответствующим параметрам вектора Стокса, применительно к моно-бистатической схеме зондирования.

Предложена алгебраическая формула для расчета коэффициента зеркально отраженного излучения в случае горизонтально ориентированных пластинок. Она связывает значения коэффициента аномального обратного рассеяния с параметрами распределения пластинок по размерам, комплексным показателем преломления и длиной волны падающего излучения.

При рассмотрении относительной характеристики коэффициента зеркально отраженного излучения ( $\beta_F$ ), полученной при малоугловом ( $\vartheta'$ ) сканировании лидаром (приемником), установлено, что можно оценить флаттер ( $\psi$ ) пластинок и их средний радиус ( $\bar{a}$ ). Тангенс угла наклона зависимости  $\beta_F(\psi, \vartheta')/\beta_F(\psi, 0)$  устанавливает значение среднего радиуса частиц, а длина интервала, где  $\beta_F(\psi, \vartheta')/\beta_F(\psi, 0) = const$ , определяет величину флаттера (рис. 2 (а) и (б), здесь  $C$  – концентрация частиц в единице объема,  $\mu$  – параметр модифицированного гамма-распределения частиц по размерам, характеризующий разброс по размерам).

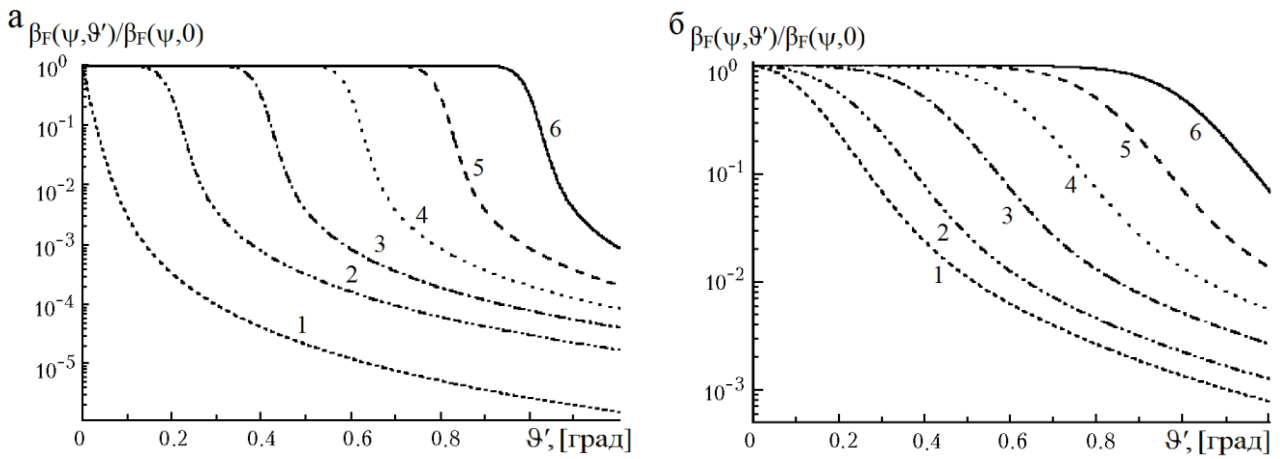


Рис. 2. Зависимость  $\beta_F(\psi, \vartheta')/\beta_F(\psi, 0)$  для системы пластинок при  $\varphi_1=0^\circ$ ,  $\vartheta_1=-40^\circ$ ,  $\varphi_2=0^\circ$ ,  $\vartheta_2=100^\circ$ ,  $\beta=20^\circ$ ,  $\lambda=0.694$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>,  $\mu=5$ ,  $\tilde{n}=1.31+i\cdot 10^{-3}$  для  $\bar{a}=200$  мкм (а) и  $\bar{a}=25$  мкм (б): 1 –  $\psi=0^\circ$ ; 2 –  $\psi=0.2^\circ$ ; 3 –  $\psi=0.4^\circ$ ; 4 –  $\psi=0.6^\circ$ ; 5 –  $\psi=0.8^\circ$ ; 6 –  $\psi=1^\circ$ .

Установлена информативность поляризационных характеристик  $P_2 = \beta_{\pi_2} / \beta_{\pi_1}$  и  $P_4 = \beta_{\pi_4} / \beta_{\pi_1}$  ( $\beta_{\pi_i}$  – коэффициенты рассеяния зеркально отражённого излучения, пропорциональные соответствующим параметрам вектора Стокса  $I_{\pi_i}$ ,  $i=1, 2, 4$ ) для оценки показателя преломления и пространственной ориентации частиц (рис. 3). Для их определения по данным поляризационных характеристик  $P_2$  и  $P_4$  предложен итерационный алгоритм. Этот алгоритм основан на использовании значений указанных величин при двух-угловой схеме зондирования.

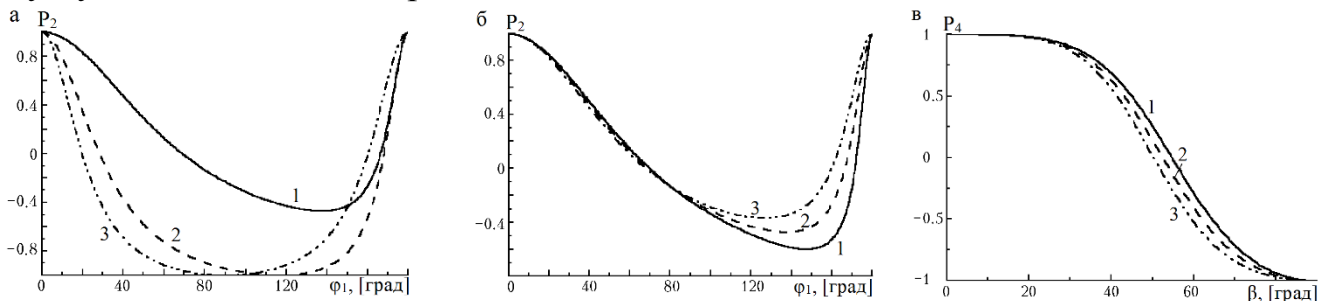


Рис. 3. Зависимость  $P_2(\varphi_1)$  при  $\bar{a}=125$  мкм,  $\lambda=10.6$  мкм,  $I_2/I_1=1$ ,  $I_4=I_3=0$ ,  $\gamma=\varphi_1$ ,  $\varphi_2=0^\circ$ ,  $\vartheta_2=100^\circ$ . (а) 1 –  $\vartheta_1=-40^\circ$ ,  $\beta=60^\circ$ ; 2 –  $\vartheta_1=-10^\circ$ ,  $\beta=45^\circ$ ; 3 –  $\vartheta_1=0^\circ$ ,  $\beta=40^\circ$  при  $\tilde{n}=1.31+i\cdot 10^{-4}$ . (б) 1 –  $n=1.42$ ; 2 –  $n=1.31$ ; 3 –  $n=1.21$  при  $\chi=10^{-4}$  и  $\vartheta_1=-40^\circ$ . (в) Зависимость рассеяния  $P_4(\beta)$  при  $\bar{a}=125$  мкм,  $\lambda=10.6$  мкм,  $\tilde{n}=n+i\cdot 10^{-4}$ ,  $I_4/I_1=1$ ,  $I_2=I_3=0$ ,  $\varphi_1=0^\circ$ ,  $\varphi_2=0^\circ$ ,  $\varphi_3=0^\circ$ ,  $\vartheta_2=180^\circ-\vartheta_1$  ( $\vartheta_1=\beta$ ),  $\vartheta_3=0^\circ$ , 1 –  $n=1.42$ ; 2 –  $n=1.31$ ; 3 –  $n=1.21$ .

В Четвертой главе «Характеристики ослабления оптического излучения дисперсным компонентом» приводится формализм для расчета сечений (и факторов) ослабления с учетом состояния поляризации падающего излучения для гексагонального и прямоугольного столбиков, для круглой пластинки и пластинки со скошенной гранью. Для пластинчатого кристалла получена матрица экстинкции (МЭ), заключающая в себе информацию о дихроизме и анизотропии рассеяния.

$$K = \frac{4 \cdot \pi}{k^2} \cdot \begin{pmatrix} \operatorname{Re}(S_{11} + S_{22}) & \operatorname{Re}(S_{11} - S_{21}) & \operatorname{Re}(S_{12} + S_{21}) & -\operatorname{Im}(S_{12} - S_{21}) \\ \operatorname{Re}(S_{11} - S_{22}) & \operatorname{Re}(S_{11} + S_{22}) & \operatorname{Re}(S_{12} - S_{21}) & -\operatorname{Im}(S_{12} + S_{21}) \\ \operatorname{Re}(S_{12} + S_{21}) & -\operatorname{Re}(S_{12} - S_{21}) & \operatorname{Re}(S_{11} + S_{22}) & \operatorname{Im}(S_{11} - S_{22}) \\ \operatorname{Im}(S_{12} - S_{21}) & \operatorname{Im}(S_{12} + S_{21}) & -\operatorname{Im}(S_{11} - S_{12}) & \operatorname{Re}(S_{11} + S_{22}) \end{pmatrix} \quad (1)$$

Величина  $k=2\pi/\lambda$  – волновое число. Элементы  $K_{ij}$  МЭ представляют собой линейную комбинацию элементов амплитудной матрицы. Выражения для них, полученные в рамках метода физической оптики, представлены в алгоритмической форме.

По характеру ослабления среди всех крупных частиц выделены пластинчатые кристаллы, для них фактор ослабления ( $\Theta_{\text{ext}}$ ) принимает значения из наибольшего промежутка, от 0 до 4 (рис. 4 и 5). Результаты расчета,

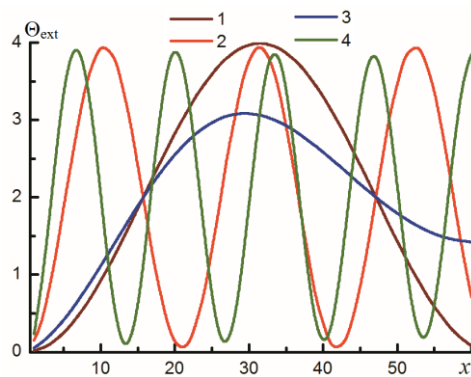


Рис. 4. Зависимость фактора эффективности ослабления  $\Theta_{\text{ext}}$  от размерного параметра  $x$  ( $x=2\pi d/\lambda$ ) для пластинки при  $a=250$  мкм,  $\lambda=1$  мкм: 1 –  $n=1.1$ ,  $\chi=0$ ,  $\beta=0^\circ$ ; 2 –  $n=1.3$ ,  $\chi=0$ ,  $\beta=0^\circ$ ; 3 –  $n=1.1$ ,  $\chi=0.02$ ,  $\beta=0^\circ$ ; 4 –  $n=1.1$ ,  $\chi=0$ ,  $\beta=60^\circ$ .

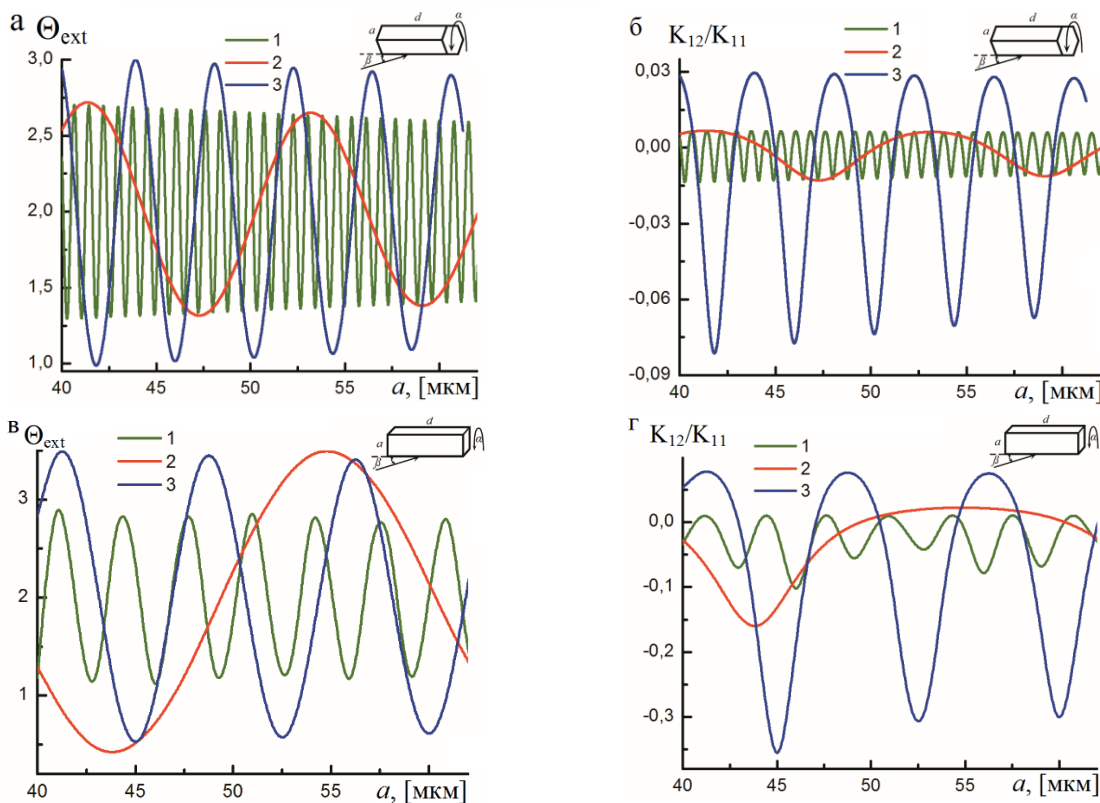


Рис. 5. Зависимости характеристик ослабления при  $d=500$  мкм,  $\chi=10^{-5}$ ,  $I_2/I_1=1$ ,  $I_4=I_3=0$ ,  $\beta=30^\circ$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\alpha=0^\circ$ : 1 –  $n=1.31$ ,  $\lambda=0.694$  мкм; 2 –  $n=1.31$ ,  $\lambda=10.6$  мкм; 3 –  $n=2.1$ ,  $\lambda=10.6$  мкм. (а)  $\Theta_{\text{ext}}(a)$ , (б)  $K_{12}(a)/K_{11}(a)$  для гексагонального столбика; (в)  $\Theta_{\text{ext}}(a)$ , (г)  $K_{12}(a)/K_{11}(a)$  для прямоугольного столбика.

представленные кривыми 1 и 2 рис. 4, полностью совпадают с соответствующими данными, выполненными другими исследователями [13\*]. При увеличении пар плоскопараллельных граней кристалла, границы изменения фактора ослабления сужаются.

По результатам численного исследования ослабления видимого и ИК излучения отдельными частицами продемонстрированы параметры рассеивателя и лучистой энергии для возникновения спектральной зависимости интегральных характеристик экстинкции, а также предпосылки для их нейтрального хода. Эти результаты являются информативными при формировании эффективной модели полидисперсной среды, учитывающей только компоненты, обеспечивающие основной вклад в ослабление лучистой энергии.

В **Пятой главе** «Характеристики излучения, рассеянного совокупностью частиц в направлении вперед» 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 форм, 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 параметры излучения и частиц для 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 спектральная зависимость ослабления обеспечивается излучением, проходящим, главным образом, через преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы.

Высокочастотная зависимость сечения ослабления в видимом и ближнем ИК-диапазонах обеспечивает нейтральный ход фактора ослабления в случае большого разброса частиц по размерам (рис. 6). В ИК-диапазоне длин волн наблюдается спектральный ход  $\Theta_{\text{ext}}(\lambda)$ . Его особенности зависят от физико-химических параметров кристаллов.

В качестве поляризационных характеристик ослабления в работе рассмотрены недиагональные элементы МЭ (рис. 7) и отношение  $F_{\text{ext}} = \alpha_{\text{ext}}^{\text{lin}} / \alpha_{\text{ext}}^{\text{unpol}}$

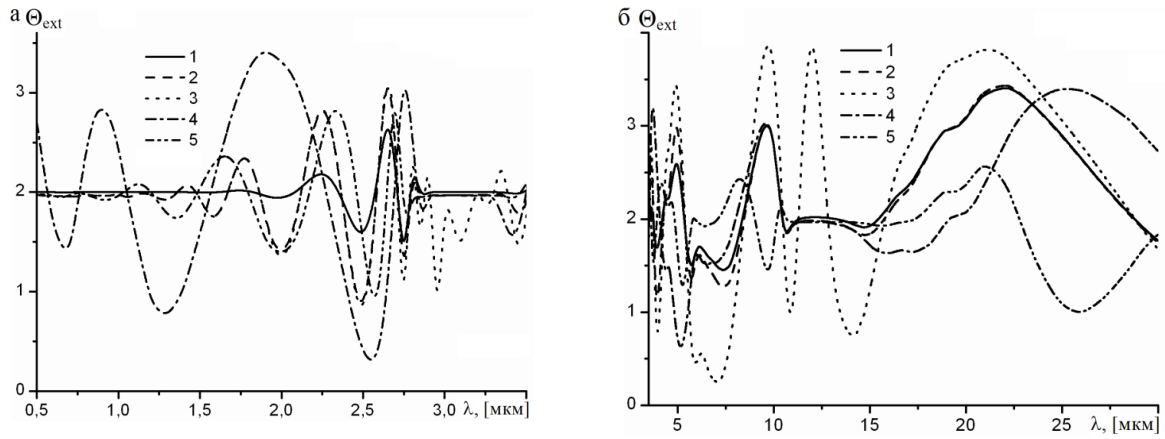


Рис. 6. Зависимость  $\Theta_{\text{ext}}(\lambda)$  при  $\beta=0^\circ$ ,  $I_2/I_1=1$ ,  $I_3=I_4=0$ ,  $\gamma=0^\circ$ : 1 –  $\bar{a}=100$  мкм,  $\mu=10$ ,  $n=n(\lambda)$ ,  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед); 2 –  $\bar{a}=100$  мкм,  $\mu=30$ ,  $n=n(\lambda)$ ,  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед); 3 –  $\bar{a}=100$  мкм,  $\mu=10$ ,  $n=n(\lambda)$  (чистый лед),  $\chi=10^{-5}$ ; 4 –  $\bar{a}/\lambda=10$ ,  $\mu=30$ ,  $n=n(\lambda)$ ,  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед); 5 –  $\bar{a}/\lambda=50$ ,  $\mu=30$ ,  $n=n(\lambda)$ ,  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед). (а)  $\lambda \in (0.5 \text{ мкм}, 3.5 \text{ мкм})$ , (б)  $\lambda \in (3.5 \text{ мкм}, 30 \text{ мкм})$ .

коэффициентов ослабления для неполяризованного и линейно поляризованного падающего излучения (рис. 8). Поляризационные свойства ослабления в большей степени проявляются в случае большого угла наклона плоскости преимущественной ориентации пластинок ( $\beta > 40^\circ$ ), при малом разбросе частиц по размерам (параметр модифицированного гамма-распределения  $\mu > 10$ ) и малом поглощении ( $\chi < 10^{-2}$ ).

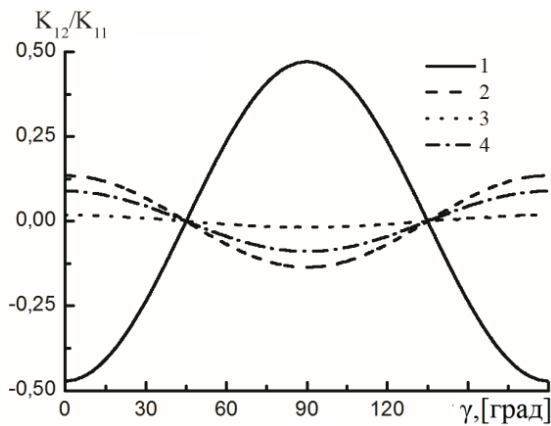


Рис. 7. Зависимость  $K_{12}(\gamma)/K_{11}(\gamma)$  при  $\beta=66^\circ$ ,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ ,  $\mu=40$ ,  $n=2.09$ ,  $\chi=0$ : 1 –  $a/d=50$ ,  $\lambda=2.8$  мкм; 2 –  $a/d=20$ ,  $\lambda=2.8$  мкм; 3 –  $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ ,  $\lambda=2.8$  мкм; 4 –  $d=2.020 \cdot (2 \cdot a)^{0.449}$ ,  $\lambda=12.6$  мкм.

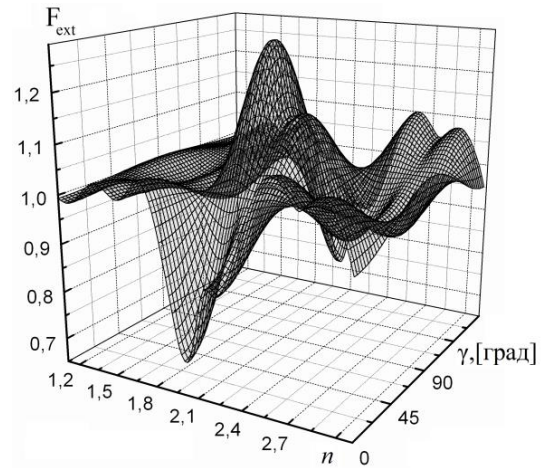


Рис. 8. Поляризационная характеристика ослабления  $F_{\text{ext}}(n, \gamma)$  при  $d=0.05 \cdot a+1.0$ ,  $\mu=30$ ,  $\chi=10^{-5}$ ,  $\beta=42^\circ$ ,  $\lambda=1.7$  мкм,  $\bar{a}/\lambda=5$ .

Для исследования особенностей характеристик поля, прошедшего через систему преимущественно ориентированных пластинок, в главе 5 рассмотрен дифференциальный коэффициент рассеяния в направлении вперед.

В Шестой главе «Параметризованные характеристики однократного рассеяния для простейших моделей полидисперсной среды» рассмотрены базовые характеристики однократного рассеяния: коэффициенты рассеяния, ослабления, поглощения и вероятность выживания кванта для полидисперсной среды. В рамках физической оптики демонстрируется вывод приближенных аналитических выражений для коэффициентов ослабления ( $\alpha_{\text{ext}}$ ) и поглощения ( $\alpha_{\text{abs}}$ ) оптического излучения системой горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. Полученные соотношения имеют вид:

$$\alpha_{\text{ext}} \approx 2\pi C \frac{\mu+2}{\mu+1} \bar{a}^2 \left\{ 1 - \text{Re} \left[ t_e / (1 + \chi \cdot k x_2 - i(n-1)k x_2)^{x_1+1} \right] \right\}, t_e = 4\tilde{n} / (\tilde{n} + 1)^2. \quad (2)$$

$$\alpha_{\text{abs}} = \pi C \frac{\mu+2}{\mu+1} \bar{a}^2 \left( 1 - |r_e| - |t_e|^2 / (1 + 2\chi \cdot k x_2)^{x_1+1} \right), r_e = (\tilde{n} - 1)^2 / (\tilde{n} + 1)^2. \quad (3)$$

Входящие в формулы (2) и (3) величины  $x_1$  и  $x_2$  зависят только от параметров модифицированного гамма-распределения частиц по размерам  $\bar{a}$  и  $\mu$ . Алгебраические формулы позволяют проводить вычисления значений коэффициента ослабления с погрешностью не более 2.5% и коэффициента поглощения – не более 1%.

На основе теории Ми и предложенных аналитических формул, полученных в рамках метода физической оптики, продемонстрированы основные закономерности спектральной зависимости оптических характеристик с различными микрофизическими параметрами.

**Седьмая глава** «Численные эксперименты по определению характеристик пропускания лучистой энергии газовой-аэрозольной средой» иллюстрирует результаты численного исследования ослабления и пропускания видимого и ИК излучения аэродисперсной средой, в состав которой входят различные компоненты с различными микрофизическими и оптическими параметрами. Для расчета функции пропускания (ФП) использовались следующие формулы:

$$T_a = \exp(-\alpha_{\text{ext}} \cdot h), T_g = \exp(-K_{\text{mol}} \cdot \eta \cdot h), T_{\text{com}} = T_a \cdot T_g. \quad (4)$$

$T_a$  – ФП аэрозоля,  $T_g$  – ФП газа,  $T_{\text{com}}$  – ФП при совместном учете газовой и аэрозольной составляющих,  $K_{\text{mol}}$  – коэффициент молекулярного поглощения,  $\eta$  – парциальное давление газа,  $h$  – путь, который проходит излучение в слое.

В работе предложена модель газовой-дисперсной среды для исследования особенностей ослабления и пропускания видимого и ИК излучения с учетом молекулярного поглощения газовой компоненты и ослабления дисперсной составляющей с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами. Проведены численные эксперименты по определению пропускания оптического излучения различными средами: (I) водяной пар и мелкие частицы, (II) метан и мелкие частицы (рис. 9), (III)

водяной пар и мелкие частицы  $Al_2O_3$ , (IV) мелкие частицы и крупные преимущественно ориентированные кристаллы (рис. 10). Проанализирован

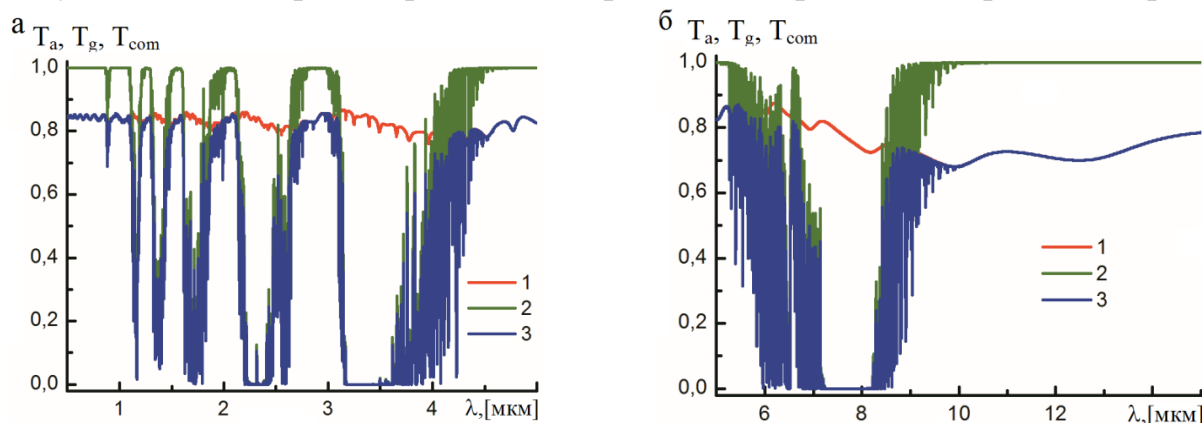


Рис. 9. Спектральная зависимость функции пропускания газовой-аэрозольной средой при  $h=10$  м,  $\eta=2 \cdot 10^{-5}$  атм,  $n=1.7$ ,  $\chi=10^{-4}$ ,  $a=5$  мкм,  $C=10^5$  л $^{-1}$ : 1 –  $T_a(\lambda)$ ; 2 –  $T_g(\lambda)$ ; 3 –  $T_{com}(\lambda)$ .

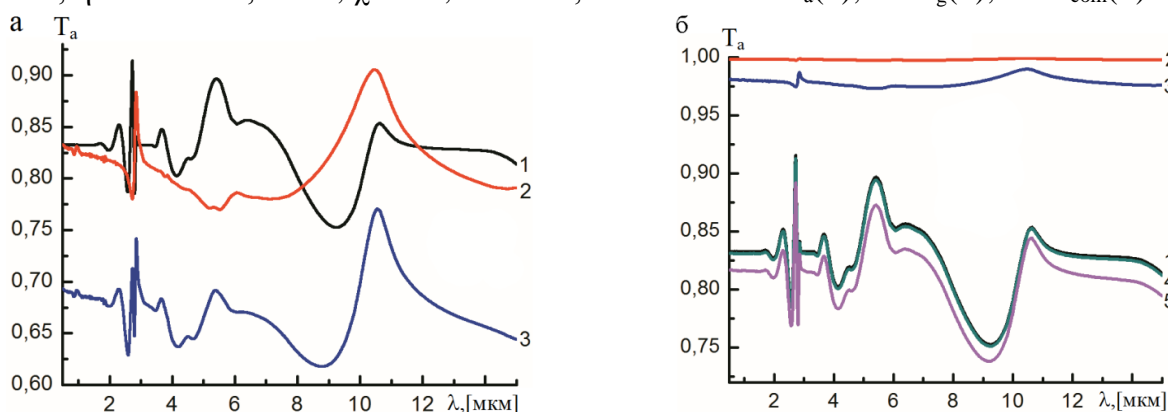


Рис. 10. ФП  $T_a(\lambda)$  при  $I_2/I_1=1$ ,  $I_3=I_4=0$ ,  $\gamma=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$ ,  $n=n(\lambda)$ ,  $\chi=\chi(\lambda)$  (чистый лед),  $\mu=5$ . (а) 1 – (пластинки)  $d=2.020 \cdot (2.0 \cdot a)^{0.449}$ ,  $C=100$  л $^{-1}$ ,  $\bar{a}=50$  мкм; 2 – (сферы)  $C=9560$  л $^{-1}$ ,  $\bar{a}=5$  мкм; 3 – совместный учет пластинок и сфер с параметрами для кривых 1 и 2. (б) 1 – (пластинки)  $d=2.020 \cdot (2.0 \cdot a)^{0.449}$ ,  $C=100$  л $^{-1}$ ,  $\bar{a}=50$  мкм; 2 – (сферы)  $C=100$  л $^{-1}$ ,  $\bar{a}=5$  мкм; 3 – (сферы)  $C=1000$  л $^{-1}$ ,  $\bar{a}=5$  мкм; 4 – совместный учет пластинок и сфер с параметрами для кривых 1 и 2; 5 – совместный учет пластинок и сфер с параметрами для кривых 1 и 3.

раздельный и совместный вклад компонентов смеси в общее ослабление средой. На основе численного исследования ФП ИК излучения газовой-аэрозольной средой (I) сформированы критерии совместного и раздельного учета влияния молекулярного поглощения и аэрозольной экстинкции. Выделены диапазоны длин волн, где в наибольшей мере проявляется селективность тех или иных составляющих среды. Продемонстрировано преобладающее воздействие крупных преимущественно ориентированных пластинок на спектральный ход пропускания оптического излучения (рис. 10).

В **Заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы.

1. Диссертантом в рамках метода физической оптики разработана параметризованная модель кристаллической облачности, представленная

системой преимущественно ориентированных полупрозрачных пластинок для расчета матрицы рассеяния. Модель позволяет варьировать значения параметров рассеивателей и лучистой энергии, обеспечивая широкий выбор условий численного эксперимента в согласовании с натурными измерениями. В случае зеркального отражения и рассеяния в направлении вперед предложенная модель адекватно представляет многокомпонентное атмосферное образование, в состав которого входят преимущественно ориентированные крупные пластинки. По результатам численного исследования энергетических и поляризационных характеристик рассеяния оптического излучения в зависимости от микрофизических, оптических и ориентационных параметров пластинчатых кристаллов выделены информативные направления для оценки размеров, концентрации, показателя преломления и пространственной ориентации частиц.

2. Применительно к моно-бистатическому зондированию разработана схема оценивания флаттера, а также параметров распределения частиц по размерам (концентрация, средние размеры и разброс по размерам) по данным энергетических характеристик высокоамплитудного отраженного излучения для совокупности преимущественно ориентированных пластинок. Численные характеристики зеркально отраженного излучения для пластинок, количественно совпадают с соответствующими результатами экспериментального исследования ледяных облаков, в состав которых входят крупные пластинки.

3. Применительно к бистатическому поляризационному лазерному зондированию ледяных облаков диссертантом предложена схема оценивания пространственной ориентации и показателя преломления частиц по данным поляризационных характеристик зеркально отраженного излучения для системы преимущественно ориентированных пластинок.

4. В рамках метода физической оптики разработан и численно реализован алгоритм расчета матрицы экстинкции. В качестве объекта, трансформирующего излучение, рассмотрен ансамбль крупных преимущественно ориентированных полупрозрачных пластинок с учетом их возможного флаттера и функции распределения частиц по размерам. Полученные выражения для расчета элементов матрицы экстинкции включают в себе информацию о дихроизме и анизотропных свойствах частиц и позволяют получить полную информацию об ослаблении лучистой энергии пластинчатыми кристаллами. В свою очередь преимущественно ориентированные крупные пластинки обеспечивают основной вклад в общее ослабление средой, даже если их доля содержания на порядок ниже других дисперсных составляющих среды.



5. По результатам численных экспериментов выполнен системный и детальный анализ энергетических и поляризационных характеристик ослабления для монодисперсных и полидисперсных сред, состоящих из полупрозрачных кристаллов различных форм и размеров.

– Установлено, что частицы с различным фактором формы, даже относящиеся к одному виду кристаллов, могут сформировать как пренебрежимо малый поляризационный эффект ослабления, так и составляющий более чем половина от величины ослабления неполяризованного излучения.

– Оценен вклад различных по форме кристаллов в общее ослабление дисперсной средой. Показано, что крупные преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы в наибольшей степени влияют на изменение энергетических и поляризационных свойств ослабления лучистой энергии.

– По результатам численного исследования установлено, что спектральная зависимость характеристик ослабления объясняется присутствием мелких частиц, соизмеримых с длиной волны падающего излучения в случае, если их концентрация превышает содержание преимущественно ориентированных пластинок более чем на пять порядков.

– Установлены параметры формирования нейтрального хода и спектральной зависимости характеристик ослабления видимого и ИК излучения для совокупности облачных кристаллов в естественных условиях.

6. Получены простые аналитические соотношения для расчета коэффициентов ослабления, поглощения, альбедо однократного рассеяния, а также аномального обратного рассеяния для горизонтально ориентированных полупрозрачных пластинчатых кристаллов при модифицированном гамма-распределении частиц по размерам. Предложенные выражения позволяют количественно оценить влияние микрофизических параметров частиц и их показателя преломления на спектральную зависимость оптических характеристик полидисперсной среды, содержащей крупные пластинки при затрате минимальных вычислительных ресурсов.

7. Сформирована модель газовой-дисперсной среды для исследования особенностей ослабления и пропускания видимого и ИК излучения с учетом молекулярного поглощения газовой компоненты, а также рассеянием и поглощением дисперсной составляющей с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами.

Предложена схема оценивания с заданной точностью вкладов газовой и дисперсной составляющих среды в общее ослабление смесью, когда следует учитывать два компонента, а когда достаточно рассматривать только один.

Численно исследованы спектральные зависимости функции пропускания видимого и ИК излучения атмосферными кристаллами при вариациях микрофизических, оптических и ориентационных параметров частиц в случае поляризованного и неполяризованного излучения. Оценен вклад в общее пропускание лучистой энергии совокупностью атмосферных кристаллов с различной формой и различными параметрами распределения частиц по размерам.

Разработанная в диссертации физико-математическая модель аэродисперсной среды для расчета оптических характеристик, полученных на основе элементов матрицы рассеяния и матрицы экстинкции, **рекомендуется** для (1) использования в исследовании оптическими методами газовой-аэрозольной смеси, в состав которой входят крупные преимущественно ориентированные пластинчатые кристаллы, (2) принятия обоснованного решения при формировании эффективной модели кристаллического облака и (3) постановки натурного эксперимента при выборе наиболее приемлемых условий и параметров (выбор спектрального диапазона, состояния поляризации падающего излучения, положений источника, приемника с учетом возможности сканирования ими) с целью получения информативных данных для оценки физико-химических параметров среды. В качестве **перспективы дальнейшей разработки темы** предполагается расширение численной модели за счет учета тонкой структуры рассеяния крупными кристаллами, а также рассмотрения различного рода несферических частиц, соизмеримых с длиной волны падающего излучения. Это позволит сформировать модели газовой-дисперсных сред различной природы и выявить особенности их оптических характеристик для широкого диапазона длин волн с высоким разрешением при произвольных расположениях в пространстве источника, приемника и рассеивателя. Эта задача на современном этапе находится в поле зрения мирового научного сообщества, с ней связано в перспективе воплощение прорывных инновационных технологий в исследовании газовой-дисперсных сред. Для ее реализации разработана концепция применения пассивного зондирования при использовании полистатических технологий с целью исследования атмосферных образований [20\*].

#### **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

##### **Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК**

1. *Попов А.А., Шефер О.В.* Аналитическое выражение коэффициента ослабления излучения кристаллами в виде пластинок // Оптика атмосферы. 1989. – Т.2. – № 5. – С.532–536.
2. *Попов А.А., Шефер О.В.* Простейшая интерпретационная схема для данных поляризационного лазерного зондирования кристаллических облаков // Оптика атмосферы. 1990. – Т.3. – №1. С.44–50.

3. *Попов А.А., Шефер О.В.* Оценка ослабления оптического излучения кристаллами, не имеющими плоскопараллельных граней // Оптика атмосферы. 1990. – Т.3. – №5. – С. 456–461.
4. *Попов А.А., Шефер О.В.* К интерпретации эффекта аномального обратного рассеяния // Оптика атмосферы. 1990. – Т. 3. – № 9. – С.929–935.
5. *Попов А.А., Шефер О.В.* О возможности оценки средних размеров ориентированных ледяных пластинок в облаке с помощью одночастотного лидара // Оптика атмосферы. 1991. – Т.4. – № 4. – С.410–416.
6. *Попов А.А., Шефер О.В.* Алгоритм определения показателя преломления и ориентации ледяных пластинок из данных поляризационного лазерного зондирования // Оптика атмосферы. 1991. – Т.4.– № 5. – С.530–534.
7. *Боровой А.Г., Попов А.А., Шефер О.В.* Теоретическое исследование спектрального хода коэффициента ослабления оптического излучения для системы ориентированных пластинок // Оптика атмосферы. 1991. – Т.4. – №9. – С.899–906.
8. *Попов А.А., Шефер О.В.* О границах применимости метода физической оптики в задачах рассеяния света на крупных кристаллах. Часть 1. Рассеяние на круглой пластинке // Оптика атмосф. и океана. 1993. –Т.6. – № 8. – С.899–904.
9. *Попов А.А., Шефер О.В.* Теоретическое исследование поглощения оптического излучения ориентированными ледяными пластинками в ИК-диапазоне // Оптика атмосферы и океана. 1994. – Т.7. – №1. – С.18–23.
10. *Popov A.A., Shefer O.V.* Theoretical and numerical investigations of the intensity of lidar signal specular-reflected from a set of oriented plates // J. Appl. Opt. 1994. – V.33. – No.30. – P.7038–7044.
11. *Popov A.A., Shefer O.V.* Theoretical and numerical investigation of the polarization properties by a set of oriented ice plates // J. Appl. Opt. 1995. – V.34. – No.4. – P.1488–1492.
12. *Шефер О.В.* Теоретическое исследование ослабления оптического излучения кристаллическим аэрозолем // Оптика атмосферы и океана. 1995. – Т.8. – №10. – С.1435–1440.
13. *Шефер О.В.* Оптическая модель пластинчатого кристалла применительно к бистатическому поляризационному лазерному зондированию кристаллических облаков // Оптика атмосферы и океана. 1999. – Т.12. – № 7. – С.573–577.
14. *Шефер О.В.* Теоретическое исследование характеристик светорассеяния для пластинчатого кристалла применительно к бистатическому поляризационному лазерному зондированию // Оптика атмосферы и океана. 1999. – Т.12. – №12. – С.1081–1088.
15. *Шефер О.В.* Численное исследование оптического излучения, зеркально отраженного от ориентированной пластинки // Оптика атмосферы и океана. 2001. – Т.14. – № 8. – С.663–668.
16. *Шефер О.В.* К интерпретации зеркально отраженного оптического излучения для определения физических параметров пластинок // Оптика атмосферы и океана. 2002. – Т.15. – №10. – С.887–893.

17. **Шефер О.В.** Возможность определения параметров спектра размеров пластинчатых кристаллов и их флаттера по данным моностатического и бистатического лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2003. – Т.16. – №4. – С.347–353.
18. **Шефер О.В.** Оценка характеристик отраженного излучения применительно к моностатическому и бистатическому лазерному зондированию кристаллических облаков, содержащих ориентированные частицы // Оптика атмосферы и океана. 2003. – Т.16. – №9. – С.792–803.
19. **Шефер О.В.** Оптическая модель для исследования характеристик света, прошедшего через ориентированную пластинку // Оптика атмосферы и океана. 2004. – Т.17. – №8. – С.621–626.
20. **Шефер О.В.** Энергетические и поляризационные характеристики оптического излучения, рассеянного ориентированной полупрозрачной пластинкой в направлении вперед // Оптика атмосферы и океана. 2006. – Т.19. – №4. – С.278–283.
21. *Войцеховская О.К., Голубь И.В., Запругаев А.Ю., Шефер О.В.* Пропускание газовой среды с учетом молекулярного поглощения и аэрозольного рассеяния // Известия вузов. Физика. 2007. – №6. – С.18–25.
22. *Войцеховская О.К., Голубь И.В., Запругаев А.Ю., Шефер О.В.* Влияние аэрозольной компоненты на пропускание газовой-аэрозольной среды в ИК-диапазоне // Известия вузов. Физика. 2008. – Т.51. – №9/3. – С.118–122.
23. *Попов А.А., Шефер О.В.* Численное исследование матрицы экстинкции для пластинчатого кристалла. // Известия вузов. Физика. 2009. – Т.52. – №8. – С.73–83.
24. *Войцеховская О.К., Голубь И.В., Запругаев А.Ю., Шефер О.В.* Влияние микрофизических параметров аэрозольных частиц в атмосфере на ослабление излучения ИК диапазона // Известия РАН. Физика атмосферы и океана. 2010. – Т. 46. – № 1. – С. 63–68.
25. *Shefer O., Porov A.* Extinction and small angle scattering by thin plate crystals // Appl. Opt. 2010. – V.49. – No.8. – P.1434–1445.
26. **Шефер О.В.** Особенности матрицы экстинкции для преимущественно ориентированных пластинчатых кристаллов // Известия вузов. Физика. 2012. – Т.55. – №5. – С.40–48.
27. **Шефер О.В.** Поляризационные эффекты ослабления оптического излучения преимущественно ориентированными пластинчатыми кристаллами // Известия вузов. Физика. 2012. – Т.55. – №9/2. – С.116–117.
28. *Войцеховская О.К., Шефер О.В., Каширский Д.Е., Харпудченко Е.А.* Влияние аэрозольной сажевой компоненты на функцию пропускания выхлопов двигателей // Известия вузов. Физика. 2013. – Т. 56. – № 9/2. – С. 46–48.
29. **Шефер О.В.** Влияние крупных кристаллов различной формы на ослабление лучистой энергии. Известия вузов. Физика. 2013. – Т.56. – №9/2. – С.67–69.
30. *Shefer O.* Numerical study of extinction of visible and infrared radiation transformed by preferentially oriented plate crystals // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2013.– V.117.– P.104–113.
31. **Шефер О.В., Войцеховская О.К., Рожнёва О.В.** Учет микрофизических параметров неоднородной среды в ослаблении оптического излучения // Известия вузов. Физика. 2014. – Т.57. – №10/2. – С.122–127.

32. **Шефер О.В., Шефер В.А., Синюкова Е.А.** Численное исследование особенностей альbedo однократного рассеяния лучистой энергии, прошедшей через полидисперсное кристаллическое образование // Известия вузов. Физика. 2014. – Т.57. – №10/2. – С.116–121.
33. **Шефер О.В.** Энергетические и поляризационные особенности ослабления видимого и ближнего ИК диапазонов длин волн крупными кристаллами // Известия вузов. Физика. 2014. – Т.57. – №10. – Р.61–68.
34. **Попов А.А., Шефер О.В., Рожнева О.В.** Численное моделирование поглощения оптического излучения атмосферными частицами различной природы // Фундаментальные исследования. 2015. – №2. – С.3753–3758.
35. **Шефер В. А., Шефер О.В.** О точности аппроксимации движения малого небесного тела промежуточными возмущенными орбитами, построенными по двум векторам положения и трем наблюдениям // Астрономический вестник. 2015. – Т.49. – №1. – С.54–64.
36. **Шефер В. А., Шефер О.В.** О точности аппроксимации движения малого небесного тела промежуточными возмущенными орбитами, построенными по трем векторам положения и трем наблюдениям // Астрономический вестник. 2016. –Т.50. – №3. – С.217–223.
37. **Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E., Egorov O.V., Shefer O.V.** Modeling absorption spectra for detection of combustion products of jet engines by laser remote sensing // Appl. Opt. 2016. – V.55. – No.14. – P.3814–3823.
38. **Shefer O.** Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2016. – V.178. – P.350–360.
39. **Shefer O.** Numerical study of influence of different dispersed components of crystal cloud on transmission of radiant energy // J. Quant. Spectr. Rad. Trans. 2017. – V.201. – P.148–155.
40. **Шефер О.В., Каргин Б.А.** Ослабление лучистой энергии в уравнении переноса излучения для кристаллических облаков // Известия вузов. Физика. 2018. – Т.61. – №9. – С.18–28.
- Публикации в сборниках материалов конференций, индексируемых в WOS и Scopus**
41. **Popov A.A., Shefer O.V.** Theoretical investigation of the extinction and absorption coefficients of a system oriented ice plates in optical plane range // Proc. SPIE. 1994. – V.2222. – P.339–348. DOI:10.1117/12.178000.
42. **Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Shefer O.V.** Interpretation of the backscattering phase matrix of cirrus clouds // Proc. SPIE. 1994. – V.2260. – P.150–157. DOI:10.1117/12.189219.
43. **Shefer O.V.** Theoretical investigation the extinction coefficient of a system of oriented ice plates in optical plane range // Proc. SPIE. 1995. – V.2553. – P.370–380.
44. **Shefer O.V. Samokhvalov I.V.** Interpretation of laser sensing data based on model of a cloud as plate crystals // Proc. SPIE. 1998. – V.3495. – P.340–348.
45. **Shefer O.V.** The optical model of a particle on bistatic polarization laser sensing of crystalline clouds // Proc. SPIE. 1999. – V.3867. – P.72–81. DOI:10.1117/12.373045.
46. **Shefer O.V.** Investigation of backscattered radiation by a crystal cloud to bistatic polarization laser sounding // Proc. SPIE. 1999. –V.3749. – P.746–747. DOI:10.1117/12.354989.
47. **Shefer O.V.** Estimation of microphysical parameters of oriented plate crystals on characteristics of reflected optical radiation // Proc. SPIE. 2005. – V.5829. – P.184–192.

48. **Shefer O.V.** Extinction in radiative transfer equation for ice atmospheric medium // Proc. SPIE. 2009. – V.7296. – P.72960I– 7 p. DOI:10.1117/12.823813.
49. **Shefer O.V.** Absorption of optical radiation by atmospheric crystals // Proc. SPIE. 2009. – V.7296. – P.729604. – 6 p. DOI:10.1117/12.820963.
50. **Shefer O.V., Rozhneva O.V.** Optical model for numerical study of a wavy surface // Proc. of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. – V.978-1-4799-6221-1(06986911). – 5 p.
51. **Shefer O.V., Rozhneva O.V.** Some aspects of model for calculation of the radiation extinction in layered medium // Proc. of 2014 International Conference on Mechanical Engineering, Automation and Control Systems (MEACS). 2014. – V.978-1-4799-6221-1(06986912). – 5 p.
52. **Voitsekhovskaya O.K., Shefer O.V., Kashirskii D.E.** Criterion of the need to consider the cooperative effect of the molecular absorption and aerosol scattering on calculations of IR transmission function // Proc. SPIE. 2014. – V.9292. – P. 92923M. – 8 p.
53. **Voitsekhovskaya O.K., Shefer O.V., Kashirskii D.E.** Optical characteristics of aerosol trioxide dialuminum at the IR wavelength range // Proc. SPIE. 2015. – V.9680. – 96803A. – 6 p.
54. **Voitsekhovskaya O.K., Egorov O.V., Kashirskii D. E., Shefer O.V.** Numerical simulation of infrared radiation absorption for diagnostics of gas-aerosol medium by remote sensing data // Proc. SPIE. 2015. – V.9680. – 968054. – 5 p. DOI:10.1117/12.2206009.
55. **Voitsekhovskaya O.K., Shefer O.V., Kashirskii D.E., Loskutov V.V., Egorov O.V.** Modeling diagnostics of trioxide dialuminum content in gas-aerosol medium // Proc. SPIE. 2016. – V.10035. – 100352X. – 6 p. DOI:10.1117/12.2247833.
56. **Shefer O.V., Loskutov V.V., Rozhneva O.V.** Optical model of medium for the numerical imitation of wave surface forming high-intensity reflected radiant energy // Key Engineering Materials. 2016. – V.685. – P.618–622.
57. **Shefer O.V., Rozhneva O.V., Loskutov V.V.** Estimation of orientation and optical properties of plane crystals by polarization characteristics of lidar returns // Key Engineering Materials. 2016. – V.685. – P.613–617.
58. **Shefer O.V., Loskutov V.V.** Numerical model of water medium with methane inclusions: application for determining optical radiation extinction // Proc. of International Siberian Conference. Control and Communications (SIBCON). 2017. – 5 p.
59. **Shefer O.V., Loskutov V.V.** Numerical modelling of radiant energy extinction by water medium containing bubbles and particles of various natures // Journal of Physics: Conference Series. 2017. — V.803. – 012144. 6 p. DOI:10.1088/1742-6596/803/1/012144.
60. **Shefer O.V., Voitsekhovskaya O.K., Kashirskii D.E., Loskutov V.V.** Transmission of radiant energy by gas-aerosol medium containing methane // Proc. SPIE. 2017. – V.10466. – P.104662N. – 7 p. DOI:10.1117/12.2284933.

#### СПИСОК ЦИТИРУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

- 1\*. **Архипов В.А., Ахмадеев И.Р., Бондарчук С.С. и др.** Модифицированный метод спектральной прозрачности измерения дисперсности аэрозолей // Оптика атмосферы и океана. 2007. – Т.20. – № 1. – С.48–52.

- 2\*. *Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П.* Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // *Оптика атмосф. и океана*. 2011. – Т.24. – №4. – С.293–299.
- 3\*. *Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г.* Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 200 с.
- 4\*. *Кауль Б.В., Волков С.Н., Самохвалов И.В.* Результаты исследований кристаллических облаков посредством лидарных измерений матриц обратного рассеяния света // *Оптика атмосф. и океана*. 2003. – Т.16. – №4. – С.354–361.
- 5\*. *Петрушин А.Г.* Интенсивность излучения, рассеянного под малыми углами ориентированными ледяными кристаллами // *Изв. АН СССР. Физика атмосферы и океана*. – 1987. – Т.23. – № 5. – С.546–548.
- 6\*. *Петрушин А.Г.* Ослабление и рассеяние оптического излучения кристаллической и смешанной облачными средами: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Санкт-Петербург, 2004. 36 с.
- 7\*. *Попов А.А.* О когерентном сложении рассеянного и дифракционного полей в задачах светорассеяния на крупных кристаллах // *Доклады академии наук СССР*. 1988. – Т.303. – №3. – С.594–597.
- 8\*. *Попов А.А.* Разработка и исследование вычислительных методов для некоторых классов прикладных задач электродинамики: Автореф. дис. ... докт. физ.-мат. наук. Томск, 1992. 44 с.
- 9\*. *Baran A.J.* A review of the light scattering properties of cirrus // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2009. – V.110.– P.1239–1260.
- 10\*. *Bi L., Yang P., Kattawar G.W., Hu Y, Baum B.A.* Scattering and absorption of light by ice particles: solution by a new physical-geometric optics hybrid method // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2011.– V.112. – P.1492–1508.
- 11\*. *Borovoi A., Galileiskii V., Morozov A., Cohen A.* Detection of ice crystal particles preferably oriented in the atmosphere by use of the specular component of scattered light // *Optics Express*. 2008. – V.16. – No.11. – P.7625–7633.
- 12\*. *del Guasta M., Vallar E., Riviere O., Castagnoli F., Venturi V., Morandi M.* Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds // *Appl. Opt.* 2006. – V.45. – P.4878–4887.
- 13\*. *Gao M., Yang P., Kattawar G.W.* Polarized extinction properties of plates with large aspect ratios // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2013.– V.131. – P.72–81.
- 14\*. *Geilfus N.-X., Galley R.J., Cooper M., Halden N., Hare A., Wang F., Søgaard D.H., Rysgaard S.* Gypsum crystals observed in experimental and natural sea ice // *Geophys. Res. Lett.* 2013. – V.40. – P.6362–6367.
- 15\*. *Hill C., Gordon I.E., Kochanov R.V., Barrett L., Wilzewski J.S., Rothman L.S.* HITRANOnline: An online interface and the flexible representation of spectroscopic data in the HITRAN database // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer*. 2016. – V.177. – P.4–14.
- 16\*. IPCC. The physical science basis: contribution of working group 1 to the fifth assessment report of the IPCC. Cambridge: Cambridge University Press. 2013.– 1535 p.

- 17\*. *Konoshonkin A.V., Borovoi A.G., Kustova N.V., Okamoto H., Ishimoto H., Grynko Y., Förstner J.* Light scattering by ice crystals of cirrus clouds: from exact numerical methods to physical-optics approximation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2017.– V.195.– P.132–140.
- 18\*. *Lavigne C., Roblin A., Chervet P.* Solar glint from oriented crystals in cirrus clouds // *Appl. Opt.* 2008. – V. 47. – No.33. – P.6266–6276.
- 19\*. *Liu E., Yan T., Birch G., Zhu Y.* Pollution and health risk of potentially toxic metals in urban road dust in Nanjing, a mega-city of China // *Science of the Total Environment.* 2014.– P.476–477.
- 20\*. *Mishchenko M.I., Alexandrov M.D., Cairns B., Travis L.D.* Multistatic aerosol–cloud lidar in space: A theoretical perspective // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. – V.184. – P.180–192.
- 21\*. *Mishchenko M.I., Zakharova N.T., Khlebtsov N.G., Videen G., Wriedt T.* Notes Comprehensive thematic T-matrix reference database: A 2014–2015 update // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. – V.178. – P.276–283.
- 22\*. *Noel V., Sassen K.* Study of planar ice crystal orientations in ice clouds from scanning polarization lidar observations // *J. Appl. Meteorol.* 2005. – V.44. – P.653–664.
- 23\*. *Platt C.M.R., Abshire N.L., McNice G.T.* Some microphysical properties of an ice cloud from lidar observation of horizontally oriented crystals // *Appl. Meteorol.* 1978. – V.17. – P.1220–1224.
- 24\*. *Platt C.M.R.* Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates // *J. Appl. Meteor.* 1978. – V.17. – P.482–488.
- 25\*. *Popov A.A.* New method for calculating the characteristics of light scattering by spatially oriented atmospheric crystals // *Proc. SPIE.* 1996. – V.2822. – P.186–194.
- 26\*. *Smith H.R., Connolly P.J., Webb A.R., Baran A.J.* Exact and near backscattering measurements of the linear depolarisation ratio of various ice crystal habits generated in a laboratory cloud chamber // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. – V.178. – P.361–378.
- 27\*. *Takano Y., Liou K.N.* Solar radiative transfer in cirrus clouds. Part 1. Single-scattering and optical properties of hexagonal ice crystals // *J. Atmos. Sci.* 1989. – V.46. – P.3–19.
- 28\*. *Tang G., Yang P., Wu D.L.* Sensitivity study of ice crystal optical properties in the 874 GHz submillimeter band // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2016. – V.178. – P.416–421.
- 29\*. *Voigt C., Schumann U., Graf K., Gottschaldt K.-D.* Impact of rocket exhaust plumes on atmospheric composition and climate – an overview // *Prog. Propul. Phys.* 2013. – V.4. – P.657–670.
- 30\*. *Yang P., Wendish M, Bi L., Kattawar G., Mishchenko M., Hu Y.* Dependence of extinction cross-section on incident polarization state and particle orientation // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transf.* 2011.– V.112.– P.2035–2039.
- 31\*. *Yurkin M.A., Hoekstra A.G.* The discrete-dipole-approximation code ADDA: Capabilities and known limitations // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2011.– V.112. – P.2234–2247.