



«УТВЕРЖДАЮ»

Директор ФГБУН ИФА

им. А.М. Обухова РАН

д.ф.-м.н.

Куличков С.Н.

15.04.2019 г.

## ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертационную работу Шефер Ольги Владимировны «Параметризованная модель кристаллического облака для исследования характеристик однократного рассеяния лучистой энергии», представленную на соискание ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»

**Актуальность избранной темы.** Кристаллические облака играют важную роль в земной атмосфере и погодообразующих процессах. Они оказывают решающее воздействие на радиационный баланс. Их оптические свойства определяют условия распространения излучения. На сегодняшний день, роль ледяных облаков в прогнозировании состояния климата Земли является одной из самых неопределенных. Изучение влияния физико-химических свойств частиц на прохождение излучения имеет первостепенное значение для понимания роли кристаллических облаков в трансформации радиационных потоков. Влияние газовой-дисперсной смеси на трансформацию излучения в условиях атмосферы не изучено, многие особенности не определены или требуют уточнений. Оптические характеристики кристаллических облаков для ИК области практически не исследованы. Это создает серьезную проблему для изучения радиационного режима атмосферы. Тема диссертационной работы О.В. Шефер, посвященной разработке физико-математической модели аэродисперсной среды и ее численной реализации для решения задач рассеяния кристаллическими облаками с учетом анизотропии рассеяния, важных для пассивного и лазерного зондирования, а также приложений переноса излучения, несомненно является актуальной.

К настоящему времени не решена задача согласованности экспериментальных и численных данных оптических характеристик. Важным достижением представляется получение оптических характеристик полидисперсной среды с учетом параметризации характеристик рассеяния, ослабления и поглощения по различным аспектам для различных спектральных областей. Это позволит выявить их информативность и сформировать надежную методику оценивания физико-химических параметров многокомпонентной среды по данным зондирования при различных условиях эксперимента. Параметризованные численные модели частиц для расчета характеристик однократного рассеяния являются наиболее приемлемые при разработке климатических моделей. В диссертации большое внимание уделяется именно этой актуальной проблеме.

**Оценка содержания диссертации.** Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, включающего 304 наименования. Работа изложена на 391 машинописном листе, включая 137 рисунков и графиков, а также 11 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность темы, излагается состояние проблемы, отмечается научная новизна и значимость полученных результатов, формируются основные



положения, выносимые на защиту, кратко описано содержание диссертации по главам, приводятся публикации и указывается личный вклад автора.

**Первая глава** является вводной, где дается обзор основных физико-химических свойств аэродисперсной среды, которые автор использует в дальнейшем как априорную информацию при формировании параметризованной модели кристаллического облака для расчета оптических характеристик. Приводится краткая информация о широко используемых методах расчета характеристик светорассеяния и делается акцент на метод физической оптики, применяемый автором как основной для разработки базовых в данной работе моделей крупных кристаллов. Продемонстрированы отличительные особенности решения задачи рассеяния, позволившие численно смоделировать ряд оптических эффектов кристаллических облаков, ранее не учтенных или не исследованных.

Во **второй главе** представлена физико-математическая модель крупной частицы, разработанная с применением метода физической оптики для расчета характеристик рассеяния лучистой энергии. Здесь дается убедительное обоснование выбора модели частицы – полупрозрачного пластинчатого кристалла. В алгоритмической форме получены соотношения для сечений рассеяния в виде комбинаций элементов матрицы рассеяния. Представленные соотношения удобны для численной реализации энергетических и поляризационных характеристик светорассеяния и обеспечивают большую степень свободы для задания параметров частиц и излучения. Соискателем проиллюстрированы основные особенности рассеяния, позволяющие выделить информативные направления для интерпретации данных зондирования.

В **третьей главе** предложена модель полидисперсной среды в виде системы крупных преимущественно ориентированных пластинок для исследования энергетических и поляризационных характеристик высокоинтенсивного зеркально отраженного излучения. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными подтверждает достоверность и физическую адекватность разработанной соискателем модели. Применительно к моно-бистатическому зондированию кристаллических облаков, содержащих крупные преимущественно ориентированные пластинки, разработаны оригинальные и надежные схемы оценивания микрофизических, оптических и ориентационных параметров частиц.

В **четвертой главе** предложены соотношения для расчета матрицы экстинкции, содержащей полную информацию об энергетических и поляризационных характеристиках ослабления оптического излучения для крупной пластинки. Предложенные аналитические выражения для сечений ослабления пластинчатыми и столбчатыми кристаллами позволяют исследовать основные закономерности экстинкции в зависимости от размеров частиц, показателя преломления, различных положений в пространстве, длины волны и поляризации падающего излучения. По результатам численного исследования автором оценены параметры частиц и излучения для проявления устойчивых особенностей ослабления. Это дает возможность разобраться в сложных и к настоящему времени мало изученных закономерностях процесса ослабления видимого и ИК излучения для различных по форме крупных частиц.

В **пятой главе** иллюстрируются результаты численного исследования интегральных характеристик ослабления для системы кристаллов различной формы и размеров, полученных с применением метода физической оптики и теории Ми. В этой главе проведен детальный анализ влияния микрофизических, оптических и ориентационных параметров пластинок на энергетические и поляризационные характеристики ослабления видимого и ИК излучения. Демонстрируемые соискателем результаты численного исследования



энергетических и поляризационных характеристик ослабления являются уникальными, т.к. даже качественное представление этой оптической характеристики для полидисперсной среды с учетом дихроизма и анизотропии рассеяния в научной литературе пока не нашло своего отражения.

В **шестой главе** иллюстрируется вывод аналитических выражений для коэффициентов ослабления и поглощения в случае системы крупных полупрозрачных горизонтально ориентированных пластинок. Адекватность рассматриваемой модели подтверждена частными результатами экспериментальных и численных исследований других авторов. Полученные формулы позволяют количественно оценить влияние микрофизических параметров частиц и их показателя преломления на спектральную зависимость оптических характеристик полидисперсной среды, содержащей крупные горизонтально ориентированные пластинки, при затрате минимальных вычислительных ресурсов. В этой главе иллюстрируются результаты расчета базовых характеристик однократного рассеяния для ансамбля крупных горизонтально ориентированных пластинок и систем частиц сферической формы и демонстрируются различные условия переноса излучения лучистой энергии через ледяное облако.

В **седьмой главе** предложена модель газовой-дисперсной среды для исследования ослабления и пропускания видимого и ИК излучения с учетом молекулярного поглощения газовой компоненты и ослабления дисперсной составляющей с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами. Предложена схема оценивания с заданной точностью вклада газовой и дисперсной составляющих среды в общее ослабление смесью, когда следует учитывать два компонента, а когда достаточно рассматривать только один. Это существенно ускоряет процесс анализа данных функции пропускания многокомпонентной средой и имеет несомненно практическую значимость. К принципиально новым результатам относится оценка вклада атмосферных кристаллов с различными физико-химическими свойствами в общее пропускание смесью. Среди компонент полидисперсной среды, соискатель выделил ориентированные пластинки и продемонстрировал, что именно эти кристаллы в большей мере определяют спектральный ход пропускания оптического излучения средой.

В **заключении** диссертации сформулированы основные результаты работы и отмечены рекомендации, перспективы дальнейшей разработки темы.

Диссертация написана ясно и понятно, изложение материала выполнено грамотно и строго научным языком. Разделы диссертации имеют законченный характер. Диссертация обладает внутренним единством, содержит достаточное количество иллюстративного материала, демонстрирующего постановку задач и результаты численного исследования.

**Личное участие автора** в получении результатов диссертации охватывает всё от постановки задач до их реализации. Изложенные в диссертации оригинальные результаты получены лично автором.

**Новизна полученных результатов.** Соискателем получены следующие новые результаты:

– Разработана новая параметризованная физико-математическая модель полидисперсной среды, представленная системой полупрозрачных крупных преимущественно ориентированных пластинок для расчета матрицы рассеяния. Преимущество предложенной модели заключается в ее универсальности, поскольку предусматривается широкий выбор физико-химических параметров пластинок и произвольный выбор расположений рассеивателя, приемника и источника излучения видимого и ИК излучения при произвольном состоянии поляризации.



– Впервые получены оригинальные аналитические формулы для расчета коэффициента аномального обратного рассеяния, коэффициента ослабления и коэффициента поглощения, позволяющие получить в реальном масштабе времени количественную оценку оптических характеристик полидисперсной среды, в состав которой входят горизонтально ориентированные пластинки.

– Разработанные схемы оценивания ориентации, флаттера, показателя преломления и параметров распределения частиц по размерам по данным высокоамплитудного зеркально отраженного излучения от системы преимущественно ориентированных пластинок не имеют аналогов.

– Впервые получены выражения в алгоритмической форме для расчета элементов матрицы экстинкции для системы крупных преимущественно ориентированных пластинок.

– По результатам сравнительного анализа значений энергетических и поляризационных характеристик ослабления оптического излучения кристаллами различными по форме, размерам и характеру ориентации впервые продемонстрировано превалирующее влияние в формировании энергетических и поляризационных особенностей ослабления лучистой энергии тонких преимущественно ориентированных пластинок.

– Установлены параметры рассеивателя и лучистой энергии для формирования нейтрального и спектрального хода характеристик ослабления оптического излучения кристаллическим облаком, эти сведения корректируют имеющиеся.

– Новизна предложенной физико-математической модели газовой дисперсной среды для исследования пропускания видимого и ИК излучения 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, причем среда рассматривается полидисперсная и многокомпонентная. Это относится к принципиально новым результатам.

**Обоснованность и достоверность** научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, подтверждается: непротиворечивостью основным базовым принципам теории рассеяния, согласием результатов расчета со значениями соответствующих известных асимптотических величин, количественным согласием результатов с аналогичными расчетными данными, полученными другими авторами, количественным совпадением результатов расчета зеркально отраженного излучения и аналогичных экспериментальных данных. Достоверность полученных результатов подкрепляется тем, что они были опубликованы в ведущих научных журналах, в том числе зарубежных с  $IF > 1$ , представлялись и обсуждались на профильных международных научных конференциях.

**Значимость для развития соответствующей отрасли науки** результатов выполненных исследований заключается в том, что впервые предложена численная модель газовой дисперсной среды для расчета энергетических и поляризационных характеристик ослабления видимого и ИК излучения с учетом газовой компоненты и дисперсной составляющей с различными физико-химическими свойствами. Представленные в работе результаты расчета оптических характеристик позволяют разобраться в сложных сплетениях процесса рассеяния и сформировать адекватную и эффективную модель газовой дисперсной среды для исследования пропускания многокомпонентной средой при согласовании с экспериментом. Полученные схемы интерпретации данных зеркально отраженного излучения, подтверждаемые совпадением с результатами натурального эксперимента, позволяют перейти от качественной к количественной оценке микрофизических, оптических и ориентационных параметров кристаллического облака, приняв за «трассеры» ансамбль крупных преимущественно ориентированных пластинок. Полученные в работе результаты



существенно расширяют и дополняют имеющиеся сведения об оптических характеристиках кристаллических облаков.

**Практическая ценность** работы заключается в том, что созданная модель газовой дисперсной среды с большим количеством степеней свободы для выбора разных составляющих смеси являются уникальным источником информации, которую можно использовать для исследования и оценки оптических характеристик различной природы кристаллических облаков. Предложенные схемы интерпретации данных зеркально отраженного излучения от системы преимущественно ориентированных пластинок позволяют получить количественную оценку микрофизических, оптических и ориентационных параметров кристаллов по данным пассивного и лазерного зондирования.

**Рекомендации по использованию результатов и выводов диссертации.** Полученные диссертантом результаты целесообразно использовать в Институте физики атмосферы РАН, Институте оптического мониторинга СО РАН, Институте оптики атмосферы СО РАН, Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, а также в других организациях «Росгидромета» и Академии наук.

**Публикации результатов работы.** Полученные в диссертации результаты опубликованы в более чем 100 работах, в том числе в 40 ведущих рецензионных научных журналах, внесенных в перечень изданий рекомендованных ВАК РФ, включая 7 статей в зарубежных научных изданиях с  $IF > 1$ . Более 30 работ индексируются в Scopus и Web of Science. Результаты диссертационной работы представлялись на всесоюзных и международных конференциях, их более 20.

**Автореферат** соответствует основным положениям диссертации и в полной мере отражает ее содержание.

**Замечания.** Как любая большая работа, диссертация О.В. Шефер содержит ряд опечаток, которые не заслуживают особого внимания. По существу работы можно сделать следующие замечания:

1. В диссертации наблюдается разночтение. Автор без пояснений, говоря об одном и том же методе, в рамках которого разработаны им физико-математические модели, называет их двояко: метод физической оптики и гибридный метод, представляющих комбинацию метода геометрической и физической оптики.

2. Кроме количественного подтверждения энергетических характеристик аномального рассеяния, стоило бы привести данные поляризационных характеристик, полученные другими исследователями.

3. Одной из центральных мест в работе отводится спектральной зависимости интегральным характеристикам ослабления. Количественного подтверждения данными натурального эксперимента не приводится.

Высказанные замечания носят рекомендательный характер и не снижают ценности работы, которая прошла успешно апробацию на международном уровне. Указанные недостатки не затрагивают основных результатов исследования и не влияют на общую положительную оценку работы.

### **Заключение**

Диссертационная работа О.В. Шефер выполнена на высоком научном уровне, является научно-квалифицированной работой, в которой на основании выполненных лично автором исследований разработаны теоретические положения, совокупность которых является научным достижением, обеспечивающим решение научной проблемы, имеющей важное значение для развития приоритетных для мирового сообщества направлений фундаментальных исследований кристаллических облаков, использующих оптические

методы. Полученные диссертантом новые научные результаты имеют важное значение для развития соответствующей отрасли науки, прежде всего для решения задач, связанных с переносом излучения через кристаллические облака, и для их исследования с применением лазерного и пассивного зондирования. Представленные данные в диссертации, выводы и рекомендации являются обоснованными.

Работа удовлетворяет требованиям п. 9 Положения о порядке присуждения ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 24.09.2013 г. № 842 (ред. от 28.08.2017) и соответствует специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы» по отрасли физика-математические науки, по области исследования: п. 3 «Строение и физика средней атмосферы (стратосфера, мезосфера), верхней атмосферы (термосфера, экзосфера)», а ее автор О.В. Шефер заслуживает присуждения ей ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Диссертационная работа О.В. Шефер и отзыв на нее обсуждены и одобрены на расширенном заседании научного семинара Отдела исследования климатических процессов Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук», 11 апреля 2019 года, протокол № 3 .

Отзыв подготовлен ведущим научным сотрудником Лаборатории физики верхней атмосферы Отдела исследования климатических процессов ФГБУН Института физики атмосферы им. А.М.Обухова РАН, Н.Н.Перцевым (доктор физико-математических наук, специальность 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы»).

12 апреля 2019 г.


e-mail: [n.pertsev@bk.ru](mailto:n.pertsev@bk.ru)

тел.:(495) 951-04-80



 Николай Николаевич Перцев

Подпись Н.Н. Перцева заверяю

Ученый секретарь ФГБУН ИФА им. А.М. Обухова РАН, к.г.н. Л.Д. Краснокутская 

Сведения о ведущей организации:

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт физики атмосферы им. А.М. Обухова Российской академии наук (ИФА им. А.М. Обухова РАН)

Пыжевский пер., 3, Москва, 119017, Россия,

Web-сайт организации: <http://ifaran.ru/index.html>

(495) 951-21-68, (495) 951-55-65

[krk@ifaran.ru](mailto:krk@ifaran.ru), [ifaran@ifaran.ru](mailto:ifaran@ifaran.ru)