

## ОТЗЫВ

официального оппонента, доктора физико-математических наук Петрушина Александра Григорьевича 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»

При решении многих научных задач физики атмосферы, таких, как исследование оптического состояния атмосферы, определение радиационного теплообмена, распространения узконаправленных пучков лазерного зондирования и т.д. особую важность приобретает изучение особенностей переноса оптического излучения в облаках с различным фазовым составом. К настоящему времени достаточно подробно исследованы микроструктурные и связанные с ними оптические характеристики облаков с преимущественным содержанием капельной фракции. Кристаллические и смешанные по фазовому составу облака изучены недостаточно, хотя они могут оказывать серьезное влияние на радиационный баланс, учет которого необходим при изучении погодообразующих и климатических процессах земной атмосферы. Поэтому изучение влияния микрофизических характеристик (формы, размеров и концентрации частиц, возможной ориентации в пространстве во время падения), а также их оптических свойств на распространение лучистой энергии имеет решающее значение и представляет собой важную, актуальную и практически значимую научную задачу. Указанное изучение предполагает как экспериментальные лабораторные и натурные, так и теоретические исследования, совокупность которых позволит получить абсолютно необходимую объективные данные о микрофизических и оптических характеристиках облачных слоев, содержащих ледяные кристаллы. В диссертационной работе на основе имеющейся, к сожалению, недостаточной информации о микрофизических характеристиках кристаллической облачности предлагается относительно простая модель микроструктуры кристаллической облачной среды с учетом возможного влияния атмосферного аэрозоля и отдельных атмосферных газов, которая в дальнейшем используется при определении оптических характеристик указанной кристаллической облачной среды в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн.

**Актуальность** темы диссертации в связи с вышеуказанным, состоит в том, что предложенная модель микроструктуры аэродисперсной среды, содержащей ледяные кристаллы определенных форм, позволяет провести исследование оптических характеристик однократного рассеяния для совокупности ледяных кристаллов. При этом учитывается их пространственная ориентация в пространстве и функция распределения по некоторому размеру. Рассмотрены различные состояния поляризации падающего излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн, что приводит к получению оптических характеристик, необходимых при интерпретации экспериментальных данных пассивного и лазерного зондирования кристаллических облаков.

**Научная новизна** диссертационной работы в первую очередь связана с предложенной автором оригинальной моделью кристаллической облачной среды, представленной системой крупных ориентированных ледяных пластинок. Она используется при расчетах оптических характеристик рассеяния поляризованного излучения, образованных на основе матрицы рассеяния. При этом введена параметризация по размерному параметру с учетом гамма-распределения диаметров плоскостей основания ледяных кристаллов по размерам и фактору формы кристалла пластинчатой формы. Универсальность модели предусматривает также произвольное расположение

источника и приемника излучения относительно объекта исследования, что обеспечивает возможность ее применения особенно для лазерного зондирования атмосферы. Разработана потенциально возможная схема для оценки ориентации, флаттера ледяных пластинчатых кристаллов, составляющих комплексного показателя преломления льда  $m = n - ik$  по данным высокоамплитудного зеркально отраженного излучения от системы преимущественно ориентированных пластинок при бистатическом лазерном зондировании кристаллических облачных слоев. Следует отметить также предложенную модель аэродисперсной среды для исследования рассеяния и поглощения видимого и инфракрасного излучения. Ее новизна состоит в том, что в ней учитываются молекулярное поглощение газовой составляющей и ослабление, обусловленное рассеянием и поглощением аэрозольным компонентом с различными физико-химическими свойствами, в том числе анизотропными.

**Достоверность представленных результатов обеспечивается** корректным учетом физических особенностей ослабления рассеяния и поглощения оптического излучения крупными ледяными кристаллами при согласии с классическими представлениями соответствующих физических процессов, а также удовлетворительным согласием полученных результатов оптических характеристик с аналогичными теоретическими данными с применением других методов расчета и экспериментальных данными. Основные результаты диссертации опубликованы в 40 ведущих научных журналах, в том числе зарубежных с  $IF > 1$  (7 статей). Более 30 работ индексируются в Scopus и Web of Science. Результаты диссертационной работы представлялись на всесоюзных и международных конференциях, их более 20.

**Теоретическая и практическая значимость** заключается в том, что разработанная оптическая модель атмосферной среды может быть использована для оценки данных высокоинтенсивной зеркально отраженной лучистой энергии, полученных с применением моно-бистатической схемы зондирования облачных слоев, содержащих преимущественно ориентированные пластинки. Использование полученной в работе матрицы экстинкции позволяет расширить представление характеристик ослабления, используемых в так называемом лидарном уравнении и при решении задач, связанных с многократным рассеянием в облачных слоях с крупными преимущественно ориентированными кристаллами не только пластинчатой, но и столбчатой формами. Предложенная модель многокомпонентной газовой-аэрозольной смеси для расчета характеристик ослабления способна имитировать реальную многокомпонентную атмосферную среду с различными микрофизическими, оптическими свойствами. При этом могут быть выделены определенные спектральные диапазоны длин волн, где наилучшим образом выявляются особенности ослабления, рассеяния и поглощения излучения, 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 микрофизических параметров исследуемой среды.

#### **Содержание диссертации, ее завершенность и обоснованность.**

Диссертационная работа, представленная на 391 страницах текста, состоит из введения, семи глав, заключения и списка литературы, включающего 304 наименования, из которых 104 публикации автора диссертации. Работа содержит 137 рисунков (графиков) и 11 таблиц.

Во **введении** обосновывается актуальность темы диссертации, приводится общая характеристика работы, формулируется цель и основные задачи исследования.

Представлены положения, выносимые на защиту. Описывается научная новизна, показана научная и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен краткий обзор физических характеристик реальной атмосферы, содержащей кристаллические облака. Указанную информацию диссертант в дальнейшем использует в работе как априорную для построения моделей микроструктуры и последующих расчетов оптических характеристик кристаллических облаков. Кратко рассматриваются основные методы и средства определения оптических характеристик аэродисперсной среды. Особое внимание уделяется используемому в работе методу физической оптики и его особенностям.

Во **второй главе** приводится алгоритмическое представление оптических характеристик рассеяния излучения для крупного пластинчатого кристалла. Дается обоснование выбора этой модели как базовой в данной работе. Показана возможность рассмотрения влияния на оптические характеристики рассеяния излучения в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн размеров ледяных кристаллов и величины комплексного показателя преломления льда. Учитывается произвольное расположение источника и приемника излучения, что позволяет сформулировать определенные требования к параметризации модели кристаллического облака.

В **третьей главе** иллюстрируется разработанная физико-математическая модель полидисперсной среды применительно к моно-бистатическому зондированию облаков, в состав которых входят крупные преимущественно ориентированные ледяные пластинки. Приводятся результаты численного исследования оптических характеристик зеркально отраженного излучения в зависимости от размеров частиц, величины  $m = n - ik$ , длины волны и состояния поляризации падающего излучения. Демонстрируются оригинальная схема для оценки ряда микрофизических, оптических и ориентационных параметров частиц по данным энергетических и поляризационных характеристик аномального рассеяния полидисперсной средой, содержащей преимущественно ориентированные ледяные пластинки.

В **четвертой главе** приводятся выражения, полученные в рамках метода физической оптики для расчета матрицы экстинкции для пластинки и сечений ослабления оптического излучения крупными кристаллами, имеющими плоскопараллельные и скошенные грани. Представлены результаты расчета характеристик ослабления в зависимости от размеров частиц, показателя преломления  $m = n - ik$ , различных положений пластинки в пространстве, длины волны и поляризации падающего излучения.

В **пятой главе** показаны результаты расчета энергетических и поляризационных характеристик ослабления для системы кристаллов различных размеров, формы и характером ориентации, выполненные с применением метода физической оптики и теории Ми. Исследования особенностей ослабления системой крупных кристаллов с учетом анизотропии и дихроизма относятся к принципиально новым и значимым результатам. Наблюдается заметное проявление поляризационных свойств ослабления оптического излучения ледяными пластинками.

В **шестой главе** рассматриваются полученные диссертантом аналитические выражения для расчета основных оптических характеристик однократного рассеяния, полученного для системы крупных горизонтально ориентированных ледяных пластинок. Эти формулы для расчета коэффициентов ослабления и поглощения, а также альбедо однократного рассеяния позволяют проводить количественные оценки влияния микрофизических параметров частиц, величины показателя преломления льда на

спектральную зависимость оптических характеристик полидисперсной среды. Приводятся результаты расчета спектральной зависимости основных характеристик рассеяния для крупных пластинок и частиц, соизмеримых с длиной волны

В **седьмой** главе рассмотрена модель газовой-дисперсной среды для исследования ослабления и пропускания видимого и инфракрасного излучения с учетом молекулярного поглощения отдельными газовыми компонентами атмосферы и ослабления дисперсной составляющей с различными микрофизическими, оптическими и ориентационными параметрами. Проведены численные эксперименты по расчету функции пропускания различными газовой-аэрозольными слоями. Для рассмотренных ситуаций указаны диапазоны длин волн, где в наибольшей мере проявляется селективность тех или иных компонентов среды на оптические характеристики. Получено, что для крупных пластинчатых кристаллов и частиц, соизмеримых с длиной волны, наблюдается выраженная спектральная зависимость пропускания инфракрасного излучения

В **заключение** диссертации сформулированы основные выводы и результаты работы, а также приводятся перспективы дальнейшей разработки темы. **Степень обоснованности основных положений и выводов** связана с детальным и последовательным в рамках предложенной диссертантом модели кристаллической среды рассмотрением оптических характеристик однократно рассеянного излучения.

По тексту диссертации можно сделать ряд замечаний

1. Выражение (2.30) представляет амплитуду электрического поля отраженного и прошедшего излучения от поверхности раздела двух оптически различных сред (одна вакуум, другая – чистый лед). Никакой пластинки, как утверждает диссертант, нет. Обращаю внимание, что в монографии (в списке литературы под номером 7) приводится точное решение для определения составляющих электрического поля, отраженного и прошедшего сквозь плоскопараллельную пластинку произвольной толщины  $d$  при падении линейно поляризованного излучения при различных углах падения на пластинку. Следствием использования упомянутого выражения является неучет внутренних отражений света на плоскопараллельной части пластинки особенно при небольшом поглощении излучения льдом (величины  $k$ ) и отсутствие зависимости рассматриваемых оптических характеристик от толщины пластинки. Подобным изъяном обладают и выражения (2.55), (2.66), (6.19), полученные для так называемого полупрозрачного слоя. Все вышесказанное приведет к дополнительным погрешностям полученных диссертантом вышеуказанных выражений.
2. На рис.4.1 представлены расчеты факторов эффективности ослабления излучения. Положения их максимумов при одинаковых значениях параметра  $\beta$  и разных значениях реальной части комплексного показателя преломления льда  $n$  могут быть объяснены фазовым сдвигом дифрагированного и преломленного на частице излучения  $\rho$ . Он был впервые введен ван де Хюлстом для так называемых мягких частиц сферической формы (ссылка в списке литературы [8]). При нормальном падении излучения на плоскопараллельную пластинку параметр  $\rho = 2x(n-1)$ , при котором наблюдается максимум фактора эффективности ослабления, имеет место при  $\rho = 2\pi$ . При произвольном угле падения излучения  $\alpha$  на плоскопараллельную пластинку указанный параметр определяется по выражению, представленному в источнике ([7] ссылка в списке литературы).
3. В разделе 1.14 приводятся данные о величине комплексного показателя преломления оптического излучения чистым льдом (рис.1.1). В диапазоне длин волн падающего излучения  $\lambda$  от 0 до 20 мкм величина  $n$  не превышает 1.5, а мнимая часть  $k$  изменяется в пределах от  $10^{-8}$  до  $10^{-0}$ . В диссертации на многих рисунках приводятся расчеты

оптических характеристик ледяных пластинок для ряда длин волн падающего излучения. Естественно, что значения величины  $m$  для них должны были представлены в численном виде в таблицах, так как на рисунке невозможно определить используемое значение  $m$ . Укажем также на некоторую странность. На рис. 2.5, 2.13, 3.1, 4.11, в таблицах 3.1-3.5 приводятся данные оптических характеристик при  $\lambda = 10.6$  мкм при величинах  $m$ , не соответствующих данным на рис. 1.1.

4. В диссертации недостаточно подробно представлены сведения, касающиеся оценок точности выполненных расчетов и особенностям самих расчетов по методу так называемой физической оптики в зависимости как от отношения размеров пластинки к длине волны падающего излучения, так и возможных значений комплексного показателя преломления и факторов формы. В частности для данных  $S_{\pi}$ , представленных на рис. 2.13, 4.9, 4.13, 7.11. 7.11., ничего не говорится о периодах осцилляций и с каким шагом по исследуемым переменным приводятся результаты расчетов. Оцененная погрешность полученных данных позволит объяснить нулевые значения факторов эффективности и показателей ослабления для отдельных длин волн в ИК диапазоне длин волн, которые наблюдаются на рис. 5.1.

5. На стр. 288 отмечено, что коэффициент поглощения не несет информации о форме кристаллов, а связан с их объемами. Указанное положение диссертант мог бы просто проверить, сравнив указанные характеристики для пластинки и сферы с одинаковыми объемами. Скорее всего, указанное утверждение справедливо только в определенных случаях.

6 Совершенно не понятно, что такое полупрозрачные частицы и оптическая толщина кристалла (с.301). В тексте диссертации нет пояснения или ссылки на литературные источники, где они впервые определяются.

7. В разделе 1.1 представлены так называемые «группы частиц дисперсных компонент атмосферных образований». В списке литературных источников по данной теме, на мой взгляд, отсутствуют главные из них. Отметим только несколько (Зуев В.Е., Кабанов М.В. Оптика атмосферного аэрозоля. Л., Гидрометеиздат, 1987. 254 с., Зуев В.Е., Креков Г.М. Оптические модели атмосферы. Л., Гидрометеиздат, 1986. 256 с., Ивлев Л. С., Андреев С. Д. Оптические свойства атмосферных аэрозолей. Л., Гидрометеиздат, 1986. 359 с., Report of the experts meeting on aerosols and their climate effects. A preliminary cloudless standard atmosphere for radiation computation. Ed. A. Deepak, H.E. Gerber, Boulder, Colorado, 1986. pp. 24 - 27). Отсутствуют литературные ссылки на заимствованные диссертантом формулы из разных источников. Например, на формулы (2.5), (2.17), (3.8), 4.13), (4.16)). Примеры можно множить.

Перечисленные замечания и недостатки не имеют принципиального характера и не снижают общую положительную оценку работы. Содержание диссертации соответствует критериям, установленным Положением ВАК. Основные выводы и выносимые на защиту положения, содержательны и обоснованы. Оформление диссертации и автореферата в основном соответствует предъявляемым требованиям. Автореферат в полной мере соответствует содержанию работы. Результаты диссертационной работы использовались при выполнении научных проектов по грантам РФФИ и государственного задания Минобрнауки России.

Материалы диссертации могут быть полезны широкому кругу специалистов, занимающихся научно-исследовательской работой в области переноса оптического излучения в атмосферах Земли и планет, а также и лазерном зондировании дисперсных сред. Полученные результаты и выводы целесообразно использовать в ряде учреждений РАН и Росгидромета. В частности, в Московском, Томском и Санкт-Петербургском госуниверситетах, Институте физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН, Институте



оптики атмосферы им В.Е. Зуева СО РАН, Институте вычислительной математики и математической геофизики СО РАН, Институте космических исследований РАН, НПО «Тайфун» Росгидромета, ЦАО Росгидромета и т.д.

**Заключение.** Рассматриваемая диссертационная работа О.В. Шефер выполнена на актуальную тему, на высоком научном уровне и представляет собой законченную научно-исследовательскую и квалификационную работу. Она содержит обоснованные защищаемые положения и теоретические, методические и алгоритмические решения, которые очень важны при изучении особенностей оптики атмосферы, связанных с теорией переноса оптического излучения через кристаллические облака и при лазерном и пассивном зондировании этих облаков. Диссертационная работа обладает внутренним единством и завершенностью, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на защиту, совокупность которых обеспечивает решение крупной научной проблемы, имеющей важное значение для развития приоритетных для мирового сообщества направлений фундаментальных и прикладных исследований кристаллических и смешанных по фазовому составу облаков, использующих оптические методы.

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 физико-математические науки и области исследования: п.3 «Строение и физика средней атмосферы (стратосфера, мезосфера), верхней атмосферы (термосфера, экзосфера)», а ее автор О.В. Шефер заслуживает присуждения ему ученой степени доктора физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Официальный оппонент, д.ф.-м.н, доцент,  
профессор кафедры высшей математики  
Обнинского института атомной энергетики –  
филиала Федерального государственного автономного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Национального исследовательского ядерного университета  
«МИФИ» 249040 г. Обнинск Калужской обл. Студгородок, 1  
тел.8(915)892 82 80  
petrushin-2005@mail.ru

Петрушин Александр Григорьевич,  
доктор физико-математических наук,  
специальность: 25.00.29 – физика атмосферы  
и гидросферы



Петрушин А.Г.

05.05.2019.

Подпись д.ф.-м.н. А.Г. Петрушина заверяю

И.о. зам.директора ИАТЭ НИЯУ МИФИ



Ткаченко М.Г.