Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева
Сибирского отделения Российской академии наук

*На правах рукописи*



**Ткачев Илья Валерьевич**

# ОПТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КРИСТАЛЛОВ ПЕРИСТЫХ ОБЛАКОВ ДЛЯ ЗАДАЧ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В АТМОСФЕРЕ

Специальность 1.3.6 – Оптика

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Томск – 2026

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте оптики атмосферы им. В.Е. Зуева Сибирского отделения Российской академии наук (ИОА СО РАН)

**Научный руководитель:** кандидат физико-математических наук, **Шишко Виктор Андреевич**

**Официальные оппоненты:** **Фирсов Константин Михайлович**, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.05 – «Оптика», профессор кафедры теоретической физики и волновых процессов Федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Волгоградский государственный университет», г. Волгоград

**Фомин Борис Алексеевич**, доктор физико-математических наук по специальности 01.04.14 – «Теплофизика и молекулярная физика», главный научный сотрудник Отдела исследования состава атмосферы (ОИСА) Центральной Аэрологической Обсерватории (ФГБУ ЦАО), г. Долгопрудный

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт вычислительной математики и математической геофизики Сибирского отделения Российской академии наук (ИВМиМГ СО РАН), г. Новосибирск

Защита состоится “11” декабря 2026 г. в 14 ч 30 мин на заседании диссертационного совета 24.1.091.01, созданного на базе Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН, по адресу: 634055, Россия, г. Томск, пл. Академика Зуева, 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Института оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН,

Автореферат разослан «___»_____ 2026 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
доктор физико-математических наук Панина Е.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** Исследование оптических свойств ледяных кристаллов перистых облаков представляет собой одну из наиболее актуальных и динамично развивающихся областей современной атмосферной физики и климатологии [1]. Тематика исследования приобретает особую значимость в свете нарастающих требований к точности климатических прогнозов и глубокому пониманию процессов, определяющих эволюцию облачности и радиационный баланс Земли [2].

Перистые облака, покрывающие ~30% планеты, остаются главным источником неопределенности в климатических моделях из-за сложной микроскопической структуры, разнообразия форм и размеров составляющих их ледяных кристаллов [3]. Морфология кристаллов варьируется от простых гексагональных форм до сложных агрегатов, а их размеры (от единиц до тысяч мкм) и пространственная ориентация существенно усложняют интерпретацию данных дистанционного зондирования [4, 5].

Фактически лидарные исследования перистых облаков уступают по популярности аэрозольным. В России ими занимаются лишь отдельные лаборатории (Самохвалов И.В. [4, 6], Балин Ю.С. [5, 7]), тогда как за рубежом круг исследователей значительно шире (Heymsfield A.J. [8], Okamoto H. [9], Wang Z. [10], Katagiri S. [11], Tinel C. [12] и др.).

Функционирование лидарных систем требует разработки методологии интерпретации данных, базирующейся на решении прямой задачи рассеяния света и наличии адекватной оптической модели ледяных кристаллов. Для ее решения применяются: приближение геометрической оптики (GOM) [13] – простое в реализации, но имеющее сингулярности, что неприемлемо для точной локации; точные численные методы (FDTD [13], DDA [14], T-Matrix [15]) – слишком трудоемкие для реальных кристаллов (>20 – 30 мкм) из-за экспоненциально растущей вычислительной сложности; приближение физической оптики (учет волновых свойств и дифракции) – на сегодня единственный метод, пригодный для крупных ледяных частиц.

Метод физической оптики впервые был применен для частиц перистых облаков Поповым А.А. и Шефер О.В. [16 – 19] в 1985году, затем адаптирован для облаков верхнего яруса (перистых облаков) Ромашовым Д.Н. [20], в дальнейшем развитие проведено Боровым А.Г. [21], и доведено до работающего алгоритма Коношонкиным А.В. в 2015 году [22], где приобрел новое название как приближение физической оптики. В данный момент существуют также две другие реализации данного метода: метод PGOH [23], разработанный Bi L., и метод GOIE [24], разработанный Yang P. в США.

Несмотря на наличие подходов, главной проблемой остается получение полного решения задачи рассеяния света, учитывающего многообразие форм,

размеров и ориентаций несферических ледяных кристаллов, что для крупных частиц до сих пор не реализовано.

Хотя для лазерного зондирования традиционно важно обратное рассеяние, прикладные задачи навигационной системы ГЛОНАСС требуют детализированного исследования рассеяния вперед (от 0 до 25°). Квантово-оптические станции (КОС) лазерного дальномерного типа («Сажень-ТМ-Д», «Точка»), обеспечивающие субсантиметровую точность определения орбит спутников, критически зависят от метеоусловий и работают только при ясном небе.

Поскольку 60 – 70% поверхности Земли постоянно покрыто облаками (треть из них – кристаллические), они ограничивают временное окно сеанса связи. Для компенсации метеозависимости «Роскосмос» вынужден разворачивать дорогостоящую глобальную сеть из станций КОС различной ведомственной принадлежности [25].

Исследования АО «НПК “СПП”» [26] показали, что при визировании зенитного угла ($\theta \approx 0°$) сигнал до высокоорбитальных спутников (ГЛОНАСС) фиксируется даже при большой оптической толщине ($\tau$ <5 – 7). Для уточнения амплитудно-временных и поляризационных характеристик от АО «НПК “СПП”» поступил запрос на построение оптической модели рассеяния вперед ($\theta$ от 0 до 25°) с высокой детализацией. Существующие банки данных имеют явные ограничения: недостаточную детализацию в диапазоне углов рассеяния 0–25° и неполноту спектра размеров и форм частиц. Разрабатываемый в ходе работы банк данных позволяет устранить эти недостатки.

Таким образом, **целью** данной диссертации является решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных атмосферных кристаллах, характерных для перистых облаков, с учетом многообразия их форм и размеров, для задач распространения лазерного излучения в атмосфере, включая лазерное поляризационное зондирование.

Поставленная цель потребовала решения следующих **задач:**

1. Исследовать трудоемкость приближения физической оптики в задаче рассеяния света на выпуклых и невыпуклых кристаллических частицах перистых облаков в зависимости от значений входных параметров алгоритма расчета.

2. Построить решение задачи рассеяния света в виде матриц обратного рассеяния для различных ледяных частиц выпуклых и невыпуклых форм в диапазоне размеров от 10 до 1000 мкм.

3. Анализ рассчитанных оптических характеристик (лидарное, деполяризационное и спектральное отношения) ледяных частиц выпуклых и невыпуклых форм.

4. Построить решение в виде матриц обратного рассеяния света для гексагональных частиц размером от 10 до 100 мкм в диапазоне углов

рассеяния от 0 до 180°, а также для частиц размером от 100 до 1000 мкм в диапазонах $\theta$ от 0 до 25° и от 150 до 180°.

5. Исследовать влияние эффекта Умова для крупных кристаллических частиц произвольной формы и установить взаимосвязь геометрического альбедо частиц от максимальной величины степени линейной поляризации и мнимой части комплексного показателя преломления.

**Научная новизна результатов** состоит в следующем:

1. Разработан принципиально новый свободно распространяемый банк данных матриц рассеяния света для частиц перистых облаков, не имеющий мировых аналогов, также включающий матрицу для гексагональных частиц по всей сфере направлений рассеяния света.

2. Подробно рассчитаны частицы не только выпуклых форм (гексагональные столбики и пластинки, дроксталлы, пули, частицы произвольной формы), но и невыпуклые (полые столбики), а также частицы типа агрегат.

3. Представлены результаты исследования эффекта Умова для крупных по сравнению с длиной волны падающего излучения кристаллических частиц произвольной формы.

4. Обеспечена высокая детализация расчетов рассеяния света в диапазоне углов от 0° до 25°, что является критически важным для лазерной локации спутников, в частности российских навигационных систем «ГЛОНАСС».

**Научная и практическая значимость работы:**

1. Построен банк данных матриц обратного рассеяния света для несферических частиц характерных для перистых облаков, представляющий особую значимость для решения задач лидарного зондирования перистых облаков. Банк данных свободно распространяется в открытом доступе.

2. Построено решение для хаотически ориентированных частиц произвольной формы в диапазоне размеров от 100 до 200 мкм с варьирующимися показателями преломления и поглощения. Установлена взаимосвязь геометрического альбедо частиц от величины степени линейной поляризации для проверки эффекта Умова.

3. Построен банк данных матриц рассеяния света для всей сферы направлений рассеяния (от 0 до 180°). Особое внимание уделялось конусу «вперед», характеризующему прохождение прямого сигнала, и конусу «назад», определяющему характеристики отраженного сигнала. Банк данных содержит гексагональные частицы размером от 10 до 1000 мкм.

4. Достоверность банка данных матриц обратного рассеяния света подтверждена на основе эмпирических данных, полученных с использованием сканирующего многоволнового поляризационного лидара «ЛОЗА–М3» ИОА

СО РАН [27], а также группой китайских коллег из института «Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics» (г. Хэфей) [28].

5. Полученные диссертантом результаты использованы при выполнении следующих научных проектов, в которых автор являлся исполнителем: гранты РНФ № 21-77-00083, № 21-71-10076, № 23-77-01084, № 25-17 00087, № 25-77-10053, грант РФФИ № 21-55-53027, грант Президента РФ МД-3149.2022.1.5, а также Соглашение с Минобрнауки № 075-03-2026-28/с и Государственное задание № FWRU-2026-0007.

**Положения, выносимые на защиту:**

1. Диаграмма спектрально-деполяризационного отношения позволяет различать ледяные кристаллические частицы по форме (гексагональная, произвольная, дрокстал). В частности, частицы гексагональной формы локализуются в диапазоне значений деполяризационного отношения от 0,2 до 0,35 (диапазон спектрального отношения – от 0,35 до 0,8), дроксталлы – в диапазоне от 0,35 до 0,45 (диапазон спектрального отношения – от 0,6 до 1,0), а частицы произвольной формы – в диапазоне от 0,43 до 0,67 (диапазон спектрального отношения – от 0,6 до 1,2).

2. При концентрации полых столбиков выше 50%, можно определить их долю, используя диаграмму спектрально-деполяризационного отношения. При этом данные диаграммы для смеси полых и идеальных столбиков не пересекаются с диаграммами для идеальных гексагональных пластинок и дроксталлов, что важно для практического применения оптической модели при анализе реальных данных лидарного зондирования перистых облаков.

3. При мнимой части показателя преломления меньше 0,001 для частиц произвольной формы размерами от 100 до 200 мкм – эффект Умова выполняется. Однако он нарушается, когда мнимая часть показателя преломления больше 0,001, и в решении начинает доминировать зеркальная компонента рассеянного излучения.

**Достоверность полученных результатов** обеспечена:

1. Физической непротиворечивостью и адекватностью используемых математических моделей;

2. Применением методов, для которых установлены четкие границы применимости и точность;

3. Хорошим согласием рассчитанных данных с результатами экспериментальных наблюдений, а также результатами других авторов.

**Личный вклад автора**

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке всех задач, рассмотренных в диссертации. Диссертант лично оптимизировал входные параметры программы для проведения численного исследования оптических характеристик несферических частиц. Соискатель лично проводил исследование оптических характеристик выпуклых частиц (гексагональные

столбики и пластинки, частицы произвольной формы, частицы типа пуля, дрокsталл), а также невыпуклых форм (полые частицы и сложные агрегаты) в зависимости от размера частицы для решения задачи полученной в обратном направлении рассеяния света $\theta = 180°$.

Соискателем также лично получено решение для направлений рассеяния света в диапазонах углов $\theta$ от 0 до 180°, где особое внимание уделялось конусу «вперед», характеризующему прохождение прямого сигнала, и конусу «назад», определяющему характеристики отраженного сигнала, используя для расчетов подобранную динамическую расчетную сетку.

Соискатель лично построил банк данных решений применимый не только для лидарных задач, но и для задач спутникового позиционирования.

Вошедшие в диссертацию оригинальные результаты получены автором совместно с научным руководителем либо самостоятельно. В диссертации отсутствует заимствование материалов без ссылки на авторов или источник заимствования. В списке опубликованных работ указаны все соавторы.

**Апробация работы**

Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих конференциях и симпозиумах: XXVII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Москва, 2021); XXVII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн» (г. Калининград, 2021); Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» XVII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (г. Иркутск, 2022); XXVIII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2022); VIII International Conference «Atmosphere, Ionosphere, Safety» (AIS-2023) (г. Калининград, 2023); XXIX Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2023); XXX Юбилейный Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Санкт – Петербург, 2024); Международная Байкальская молодежная научная школа по фундаментальной физике «Физические процессы в космосе и околоземной среде» XVIII Конференция молодых ученых «Взаимодействие полей и излучения с веществом» (г. Иркутск, 2024); XXXI Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2025); XXXII конференция «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2025); XXXI конференция «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2024); XXX конференция «Аэрозоли Сибири» (г. Томск, 2023); XXXII Международный симпозиум «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (г. Томск, 2026); 11-я Международная научно-практическая конференция «Актуальные проблемы радиофизики АПР-2025» (г. Томск, 2025); XV Международная Школа молодых ученых «Физика

окружающей среды» им. А.Г. Колесника (г. Томск, 2022); XXVII Всероссийская открытая конференция «Распространение радиоволн» (г. Калининград, 2021); 59-я Международная научная студенческая конференция (г. Новосибирск, 2021); 60-я Международная научная студенческая конференция (г. Новосибирск, 2022); 23-я Международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» (г. Москва, 2025); 32nd International Laser Radar Conference 2026 (ILRC32) (г. Хиросима, Япония, 2026).

**Публикации**

По теме диссертации опубликовано 50 работ, в том числе 21 рецензируемая статья. Из них, 11 в российских научных журналах из списка ВАК; 10 статей в зарубежных научных журналах, индексируемых библиографическими базами данных Web of Science и/или Scopus. Опубликовано 25 статей в сборниках материалов конференций и симпозиумов. Получено 4 свидетельства о государственной регистрации базы данных.

**Диссертационная работа состоит** из введения, четырех глав, заключения, списка использованных источников и литературы, списка основных публикации по теме диссертации и 1 приложения. Объем диссертации 155 страниц, она содержит 76 рисунков, 10 таблиц. Список используемых источников и литературы содержит 159 наименований.

## КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы, сформулированы цель, гипотезы и положения, выносимые на защиту, а также представлены публикации и отражен личный вклад автора.

В **первой главе** проанализированы методы решения задач рассеяния света на атмосферных частицах, представлены их достоинства, недостатки и области применения. Обоснован выбор подходов для моделирования рассеяния на ледяных кристаллах перистых облаков.

**Вторая глава**, опирающаяся на публикации [A1, A3–A7, A9–A11, A15–A17, A19–21], посвящена оптимизации входных параметров алгоритма расчета методом физической оптики. Подобраны значения, ускорившие вычисления в десятки раз без потери точности, что подтверждено сравнением с известными экспериментальными и расчетными данными. Построен банк данных матриц обратного рассеяния, обладающий существенными преимуществами для интерпретации результатов лазерного зондирования. Обсуждены полученные результаты и степень соответствия модели реальным условиям.

Практический интерес представляют не отдельные матрицы рассеяния, зависящие от ориентации и параметров частиц, а их усредненные значения,

характеризующие облако в целом. Обычно предполагается, что частицы в облаке ориентированы хаотически, тогда усредненную матрицу Мюллера можно записать в виде:

$$\langle M(D)\rangle = \int_{\alpha}\int_{\beta}\int_{\gamma} M(\alpha,\beta,\gamma,D) sin\beta d\gamma d\beta d\alpha\,, \tag{1}$$

где ориентация частицы определяется тремя углами Эйлера: $\alpha$ – определяет вращение вокруг вертикального направления, $\beta$ – угол между вертикальным направлением и главной осью кристалла, $\gamma$ описывает вращение вокруг главной оси; $D$ – характерный размер частицы.

Для каждого типа частиц используется свой набор параметров размера: длина $L$ и ширина $D$ (для гексагональных столбиков), максимальное расстояние между точками $D_{\max}$ (для частиц произвольной формы и дроксталлов), высота пирамиды $h$ (для частиц типа «пуля»), глубина полости $\mu$ или тангенс угла полости (для полых столбиков).

Усреднение по углу $\alpha$ выполняется аналитически, по углам $\beta$ и $\gamma$ – численным интегрированием.

Необходимое число ориентаций частицы для интегрирования (1) определяется из условия, при котором угловой шаг должен быть в два раза меньше, чем:

$$\xi = 0{,}69\frac{\lambda}{l_{\max}}\,, \tag{2}$$

где $l_{\max}$ - максимальная длина грани в частице.

На основании этой оценки, минимальный шаг по углам ориентаций частицы выбирается в соответствии с формулой:

$$\Delta\beta, \Delta\gamma < \frac{\xi}{2}. \tag{3}$$

Существует два подхода к оптимизации времени расчета в приближении физической оптики: минимизация числа ориентаций частицы и ограничение глубины рекурсии (максимального числа внутренних столкновений оптических пучков, $N_{\text{Itr}}$), что влияет на точность решения.

Влияние числа пространственных ориентаций ($\beta$ и $\gamma$) и глубины рекурсии на точность решения, исследовалось для пяти типов частиц (гексагональные пластинки и столбики, пули, частицы произвольной формы и дроксталлы) размером 50 – 1000 мкм. Поскольку сходимость индивидуальна для каждой формы, проводилось отдельное исследование для каждого типа частиц. Зависимость сходимости (на примере дифференциального сечения рассеяния и деполяризационного отношения) от глубины рекурсии приведена на рис. 1.

Анализ показал, что для частиц размером 50 мкм достаточная точность достигается при $N_{\text{Itr}}$ = 8. С ростом размера частицы требуемая глубина

рекурсии увеличивается: например, для гексагональной пластинки выше 100 мкм минимальное $N_{\mathrm{Itr}}$ возрастает до 12, а для 1000 мкм – до 29.

Данная тенденция наиболее выражена для гексагональных пластинок из-за изменения коэффициента формы (aspect ratio) и возникновения волноводного эффекта у тонких крупных частиц. Для частиц произвольной формы коэффициент формы от размера не зависит, поэтому оценка $N_{\mathrm{Itr}}$, полученная для 50 мкм, остается верной для любых размеров.

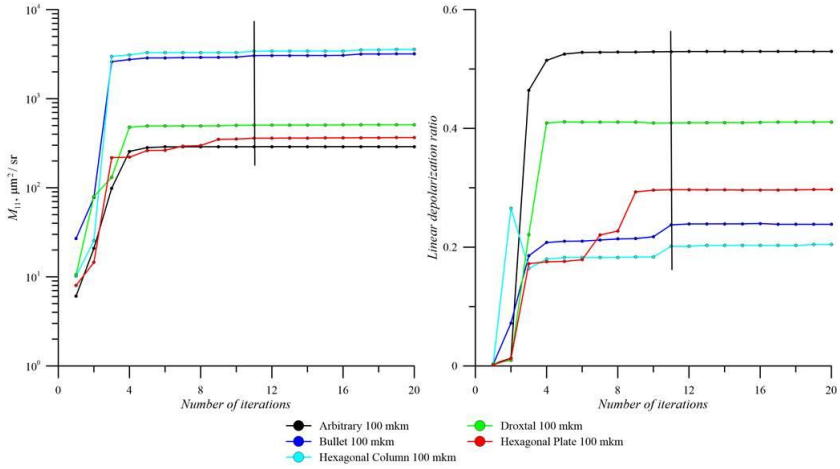



Рисунок 1 – Зависимость дифференциального сечения рассеяния (слева) и линейного деполяризационного отношения (справа) от глубины рекурсии ($N_{\mathrm{Itr}}$) оптических пучков для пяти основных типов частиц. Размер частиц – 100 мкм, длина волны – 0,532 мкм

Подробное описание глубины рекурсии приведено в таблицах 1–5 диссертационной работы.

Для оптимизации времени расчета приближения физической оптики необходима также минимизация числа ориентаций частицы.

Благодаря симметрии гексагональных пластинок, столбиков и дроксталлов расчет по углам $\beta$ и $\gamma$ достаточно проводить в диапазонах 90° и 60°, соответственно. Частицы произвольной формы требуют учет полного диапазона (180° и 360°), а для буллитов (симметрия только по $\gamma$) используются $\beta = 180°$ и $\gamma = 60°$.

Исследование сходимости по числу ориентаций (рис. 2) для частиц 100 мкм при длине волны 0,532 мкм показало, что оценка 815×407 (331705) ориентаций, использованная для частиц $< 100$ мкм, является избыточной, однако была использована при расчете мелких частиц. Эта оценка также справедлива для длин волн $> 0{,}532$ мкм из-за увеличения размера дифракционных колец. Для частиц $> 100$ мкм значения ориентаций определялись по формулам (1, 2 и 3) и также приведены в таблицах 1–5.

Далее начался процесс наполнения банка, необходимого для задач интерпретации данных лазерного поляризационного зондирования перистых облаков. Основным задаваемыми параметрами для расчета банка данных в

направлении рассеяния назад $\theta = 180°$ были: глубина рекурсии, количество ориентаций, размер частиц, показатель преломления и длина волны.

Расчет частиц 10 – 100 мкм не вызывал существенной нагрузки на сервер. Однако, поскольку вычислительная сложность метода пропорциональна квадрату размера частицы, расчет диапазона 100 – 1000 мкм без специальных методик потребовал бы в 1000 раз больше процессорного времени, чем диапазон 10 – 100 мкм, что делает эту задачу практически нерешаемой.

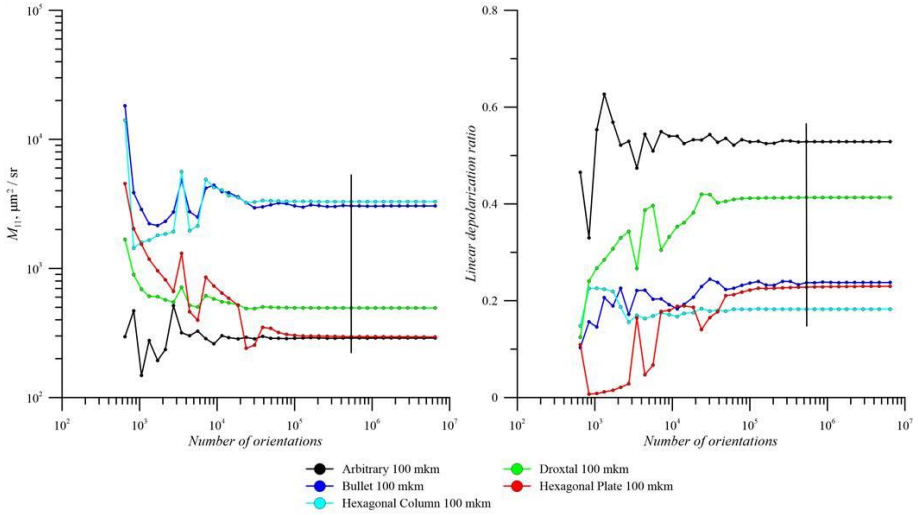



Рисунок 2 – Зависимость дифференциального сечения рассеяния (слева) и линейного деполяризационного отношения (справа) от числа ориентаций частицы для 5 основных типов частиц размером 100 мкм. Длина волны – 0,532 мкм

Для обхода этого ограничения в работе для некоторых частиц рассчитывался не весь диапазон 100 – 1000 мкм, а лишь узловые точки и их небольшие окрестности. Это позволило сократить время построения базы данных решений задачи рассеяния на частицах перистых облаков примерно в 250 раз. Результаты расчета для гексагонального столбика приведены на рис. 3.

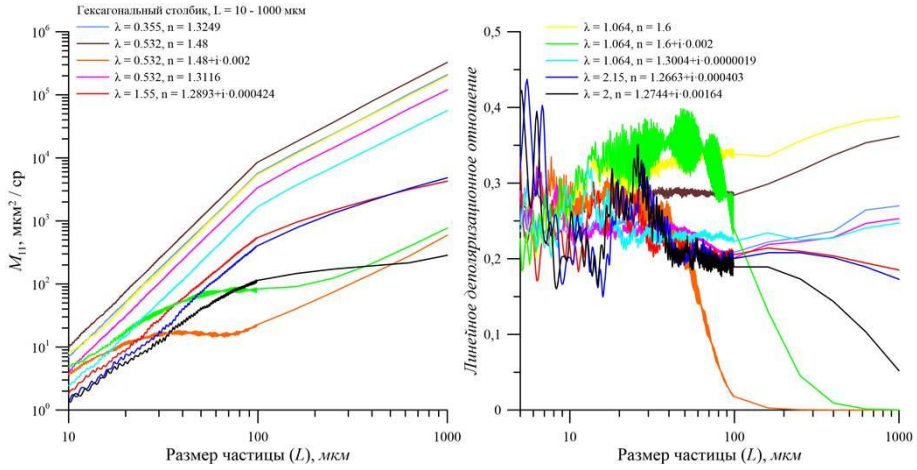



Рисунок 3 – Зависимость дифференциального сечения рассеяния (слева) и линейного деполяризационного отношения (справа) от длины гексагонального столбика ($L$). Длина волны – 0,532 мкм

Используя этот подход, был построен банк данных матриц обратного рассеяния света для основных типов ***выпуклых*** ледяных частиц перистых облаков.

Гексагональные столбики могут иметь углубления на основаниях, кардинально меняющие их оптические и аэродинамические свойства. Они представляют интерес как простая модель невыпуклой частицы для исследования влияния полостей на оптические характеристики и поведение смесей частиц.

Модель полого гексагонального столбика близка к реально наблюдаемым частицам: предполагается, что симметричные конусообразные полости, сужающиеся к центру, образуются с обоих оснований. Параметр $\mu$ определяет степень пустотелости в диапазоне от 0 до 1:

$$\mu = 2\frac{h}{L}\,, \tag{4}$$

где ($h$ – высота глубины полости), $\mu$ = 0 представляет собой сплошной столбик, а $\mu$ = 1 – полости, достигающие центра столба.

Модель полого столбика показана на рисунке 4.

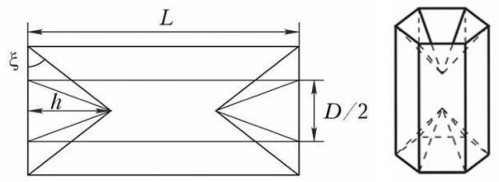



Рисунок 4 – Модель частицы «полый столбик».

Параметр $\mu$ связан с углом $\xi$, образованным основанием шестиугольного столбика и краем полости, следующим образом:

$$tan\xi = \frac{h}{D/_2} = \frac{L}{D}\mu. \tag{5}$$

Согласно исследованиям [29], глубина полости зависит от размера кристалла. Для крупных кристаллов (L > 85 мкм) параметр полости $\mu$ лежит в диапазоне 0,7 – 0,9 с максимумом в точке 0,8. Для меньших размеров наблюдается монотонная зависимость наиболее вероятного $\mu$ от длины $L$ (черная линия на рис. 5, а). Для удобства расчетов была подобрана полиномиальная функция, хорошо описывающая поведение наиболее вероятного $\mu$ от длины кристалла $L$, когда $L$ < 85 мкм.

$$\mu_m(L) = 0{,}196 + 0{,}01314L - 7{,}1 \cdot 10^{-5} \cdot \mathrm{L}^2, \tag{6}$$

при этом отклонение эмпирических $\mu$ от подобранной функции не превышает ±0,1. Предполагается, что отклонение параметра $\mu$ от наиболее

вероятного значения $\mu_m$ подчиняется нормальному закону распределения, и плотность вероятности $p$ имеет вид:

$$p(\mu, s, \mu_m) = \frac{\exp\left(-\frac{(\mu-\mu_m)^2}{s^2}\right)}{\int_0^1 exp\left(-\frac{(\mu-\mu_m)^2}{s^2}\right) d\mu}, \quad (7)$$

где $s$ = 0,05, что определяет необходимую ширину распределения ±0,1. Пример функции $p$ для случая $L$ = 100 мкм представлен на рисунке 5 (б).

Расчеты для полых столбиков (типичный размер 30–300 мкм) выполнены в диапазоне 10 – 316 мкм. Это дополнило решение ранее созданного банка данных, добавляя три основные лидарные длины волны (0,355; 0,532 и 1,064 мкм).

На основе объединенного банка выпуклых и невыпуклых частиц рассчитаны измеряемые лидаром оптические характеристики (рис. 6): линейное деполяризационное ($\delta$), спектральное ($\chi$) и лидарное ($S$) отношения:

$$\beta_1 = \mathrm{cM}_{11};\ \delta = \frac{M_{11}-M_{22}}{M_{11}+M_{22}};\ \chi = \frac{M_{11}(\lambda_1)}{M_{11}(\lambda_2)};\ S = \frac{c\sigma_{\mathrm{ext}}}{\beta_1} \approx \frac{2A}{M_{11}}, \quad (8)$$

где $c$ – концентрация частиц в облаке; $\sigma_{\mathrm{ext}}$ - сечение экстинкции (поглощения); $A$ – площадь поверхности частицы.

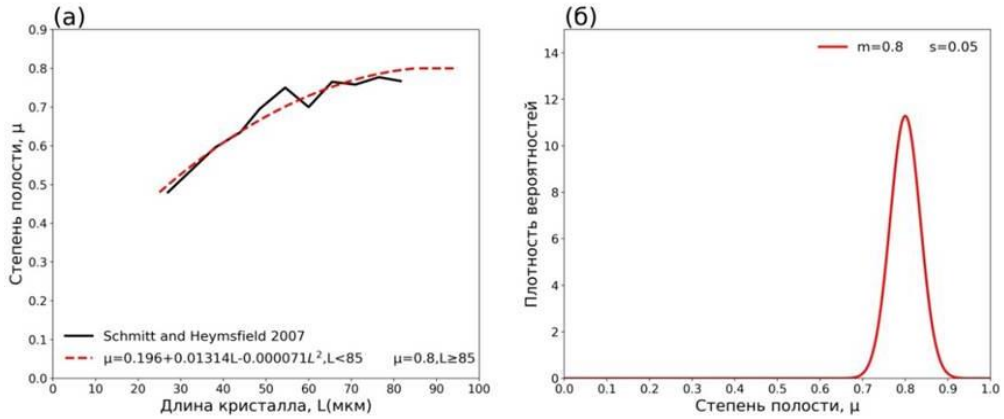



Рисунок 5 – Зависимость параметров μm от размера кристалла (а) и вид распределения $p$ для случая $L$=100 и $s$=0,05 (б)

Оптические характеристики были усреднены по параметру $\mu$ и размеру частиц, после чего смоделированы различные пропорции смесей идеальных (SC) и полых (HC) столбиков (рис. 7). Для наглядности на диаграмму также нанесены зависимости для гексагональных пластинок и дроксталлов.

Рис. 7 демонстрирует, что добавление даже 5% идеальных столбиков к полым существенно снижает лидарное отношение. Это согласуется с экспериментальными данными и подтверждает гипотезу об отсутствии чистых полых столбиков в перистых облаках

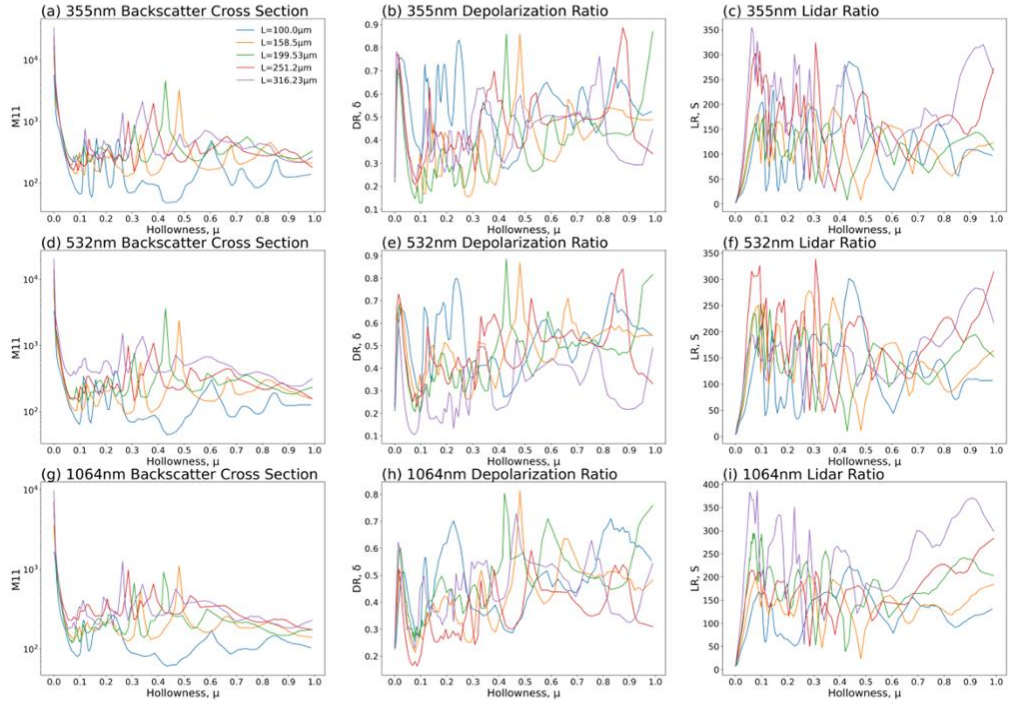



Рисунок 6 – Зависимость дифференциального сечения рассеяния, линейной деполяризации ($DR$) и лидарного отношения ($LR$) от глубины полости частицы ($\mu$)

При доле полых столбиков свыше 50% их концентрацию можно точно определить, в частности по почти линейной зависимости на диаграмме спектрально-деполяризационного отношения. Важно, что кривые смесей столбиков не пересекаются с областями идеальных пластинок и дроксталлов, что обеспечивает надежность практического применения оптической модели при анализе реальных лидарных данных.

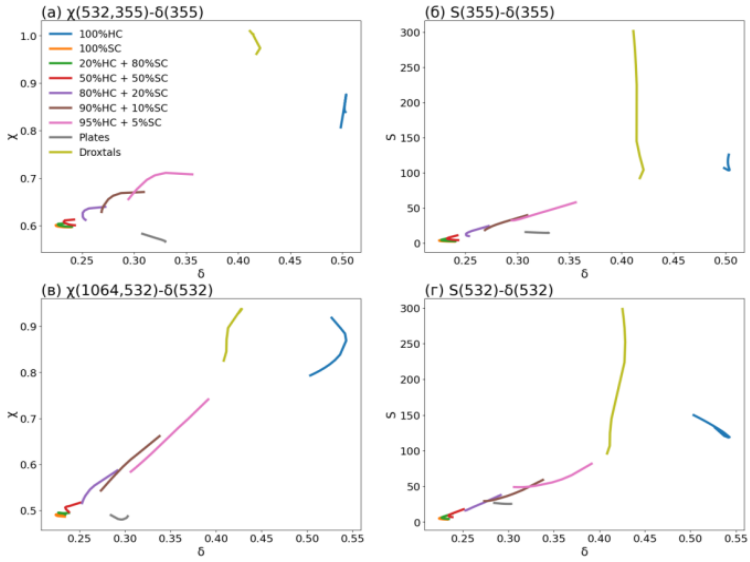



Рисунок 7 – Диаграммы зависимости оптических характеристик для смеси идеальных столбиков (SC) и полых столбиков (HC) в различных пропорциях, а также пластинок и дроксталлов. Зависимости: (а) – $\chi$ (532,355) от $\delta$ (355), (б) – $S$ (355) от $\delta$ (532), (в) – $\chi$ (1064,532) от $\delta$ (532), (г) – $S$ (532) от $\delta$ (532). В скобках указаны длины волн лидара в нм

Таким образом, установлено, что зависимость спектрального отношения от деполяризации позволяет отличать гексагональные частицы от произвольных частиц и дроксталлов, а также оценивать долю полых частиц.

**Третья глава** посвящена исследованию и моделированию оптических свойств частиц произвольной формы и сложных агрегатов, состоящих из них. Рассмотрен эффект Умова, или закон Умова, устанавливающий связь между максимумом степени линейной поляризации рассеянного на объекте света и геометрическим альбедо. Глава основана на публикациях [А2, А8, А13, А18]. В ней также показано, что количество граней у частиц произвольной формы, число единичных элементов, а также их расположение в агрегате слабо влияет на оптические характеристики.

Для анализа были сгенерированы 140 частиц для трех наборов (15, 20 и 40 граней), внешний вид которых представлены на рисунке 8.

Построение зависимости $\chi$ от $\delta$ и $\eta$ от $\delta$ для всего набора размеров и форм частиц, имеющихся в банке данных, позволяет увидеть общую картину. Именно такой подход позволяет дифференцировать частицы гексагональной формы, произвольной формы и дроксталлы, что подтверждается рисунком 9 (цвет частиц произвольной формы соответствует выбранному на рисунке 8).

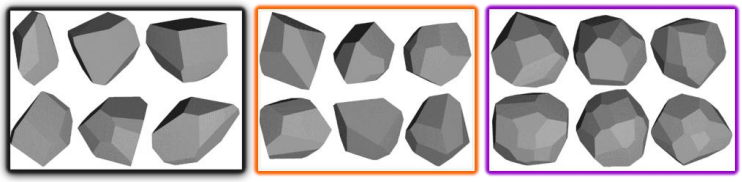


Рисунок 8 – Модели произвольных частиц (слева-направо: 15, 20 и 40 граней)

Видно, что частицы гексагональной формы локализуются в диапазоне значений $\delta$ от 0,2 до 0,35, дроксталлы – в диапазоне от 0,35 до 0,45, а частицы произвольной формы – в диапазоне от 0,43 до 0,67.

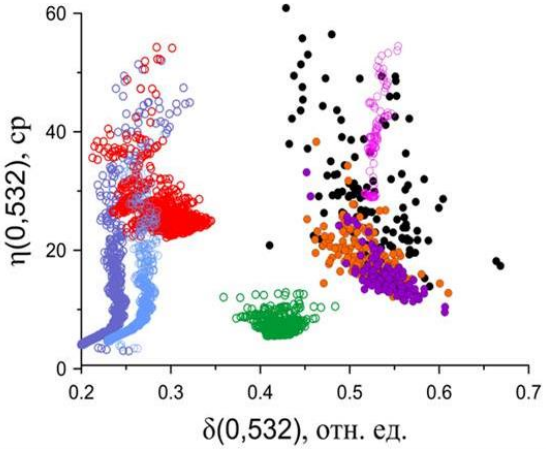



Рисунок 9 – Зависимость спектрального отношения ($\chi$) от линейного деполяризационного отношения ($\delta$) (слева); Зависимость лидарного отношения ($\eta$) от линейного деполяризационного отношения ($\delta$) (справа). Для $\lambda_1$ = 1,064 и $\lambda_2$ = 0,532 мкм

Помимо единичных частиц существуют агрегаты – сложные скопления нескольких ледяных кристаллов (пример на рис. 10).

Ввиду практической значимости удельной интенсивности введена величина $P_{11}$ – отношение элемента $M_{11}$ к среднему геометрическому значению площади агрегата. Зависимость $P_{11}$ и ее отклонения (от линии тренда) от номера генерации частицы представлена на рисунке 11.

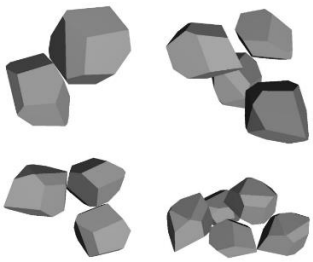


Рисунок 10 – Пример частиц агрегатов сложной формы от двух единичных элементов до пяти

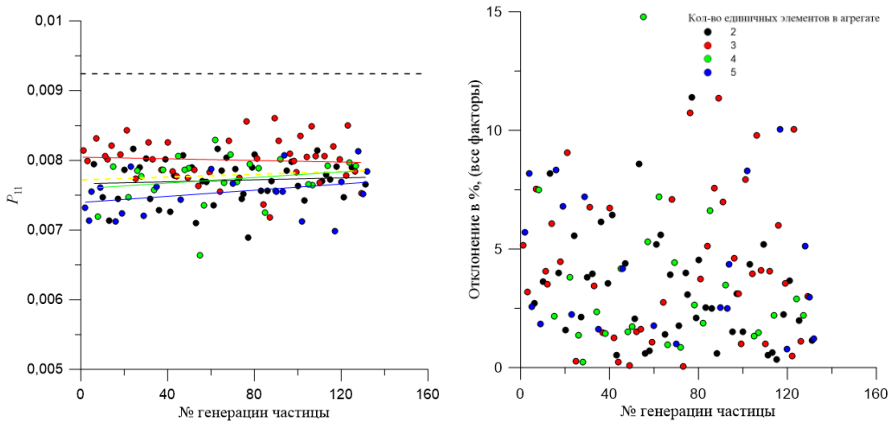



Рисунок 11 – Зависимость $P_{11}$ от номера генерации частицы (а) и зависимость отклонения из-за всех факторов (количества единичных элементов, их расположения в пространстве и т.д.) от номера генерации частицы (б). Пунктирная линия «эталонная» частица из банка данных

Полученные данные показывают, что для «эталонной» единичной частицы значение $P_{11}$ составляет 0,0093, а для агрегатов варьируется в пределах 0,0065–0,0086. Это снижение обусловлено частичным перекрытием кристаллов при их случайном расположении, что уменьшает интенсивность рассеянного света. Трендовые линии, отражающие усредненные значения для ансамблей с одинаковым числом элементов, демонстрируют отклонение $P_{11}$ в зависимости от формы агрегата. В большинстве случаев это отклонение не превышает 10%, что подтверждает слабое влияние количества единичных элементов и их взаимного расположения на оптические характеристики.

***Эффект Умова для частиц произвольной формы размером значительно большим длины волны падающего излучения*** проявляется как обратная корреляция между максимумом линейной поляризации рассеянного света и геометрическим альбедо. Он также выражается через связь лидарного

отношения $S$ и максимума линейной поляризации (элемент $-m_{12}$), то есть между обратным рассеянием и рассеянием под углами 70–110°.

Строгая проверка эффекта для всего разнообразия крупных несферических частиц требует колоссальных вычислительных ресурсов, поэтому в работе она проведена лишь для крупных частиц пылевого аэрозоля, хорошо описываемых рассмотренной ранее моделью произвольной формы.

Диаграмма Умова для мнимой части показателя преломления $\kappa < 0{,}001$ (рис. 12, а) демонстрирует линейные зависимости, тогда как при $\kappa > 0{,}001$ (рис. 12, б) поведение зависимостей существенно усложняется.

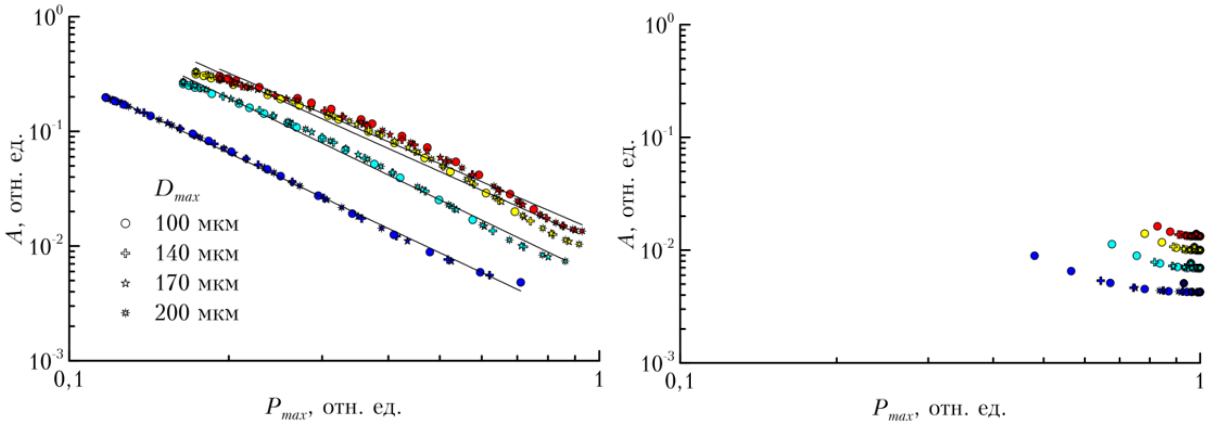



Рисунок 12 – Диаграмма Умова для случая, когда мнимая часть показателя преломления менее 0,001 (слева) и более 0,001 (справа) для различных вещественных частей показателя преломления Re(n): синий – 1,3, бирюзовый – 1,4, желтый – 1,5, красный – 1,6

Таким образом, установлено, что для частиц размером 100 – 200 мкм при мнимой части показателя преломления < 0,001 эффект Умова выполняется с высокой точностью. При значении > 0,001 эффект нарушается из-за доминирования зеркальной компоненты рассеяния, при этом геометрическое альбедо и максимум степени поляризации выходят на плато насыщения.

**Четвертая глава**, основанная на публикациях [A12, A14], посвящена изучению рассеяния света на всей сфере направлений (0 – 180°), что критически важно для навигационных систем, в частности ГЛОНАСС. Эффективность мониторинга космического сегмента ГЛОНАСС ограничена возможностями лазерных дальномерных технологий при наличии облачности, которая покрывает значительную часть планеты. Для оценки воздействия кристаллических частиц на оптический сигнал квантово-оптических станций (КОС) типа «Сажень-ТМ» необходимы расчеты в диапазоне 0 – 180° с высокой детализацией в конусе «вперед» (0 – 25°) вблизи зенита. Это позволит уточнить амплитудно-временные характеристики и поляризацию излучения, учитывая его поведение как при прямом прохождении через атмосферу, так и при отражении от спутников.

Разработанный в работе банк данных устраняет ограничения существующих баз: недостаточную детализацию в направлении «вперед» (0 – 25°) и неполноту спектра размеров и форм частиц.

На основе подходов второй главы были оптимизированы параметры расчета для трех интервалов углов: конус «вперед» (0 – 25°), конус «назад» (170 – 180°) и промежуточный диапазон (25 – 170°). В качестве примера на рис. 13 приведены высокодетализированные решения задачи рассеяния для всей сферы направлений при длине волны 0,532 мкм для различных элементов матрицы рассеяния.

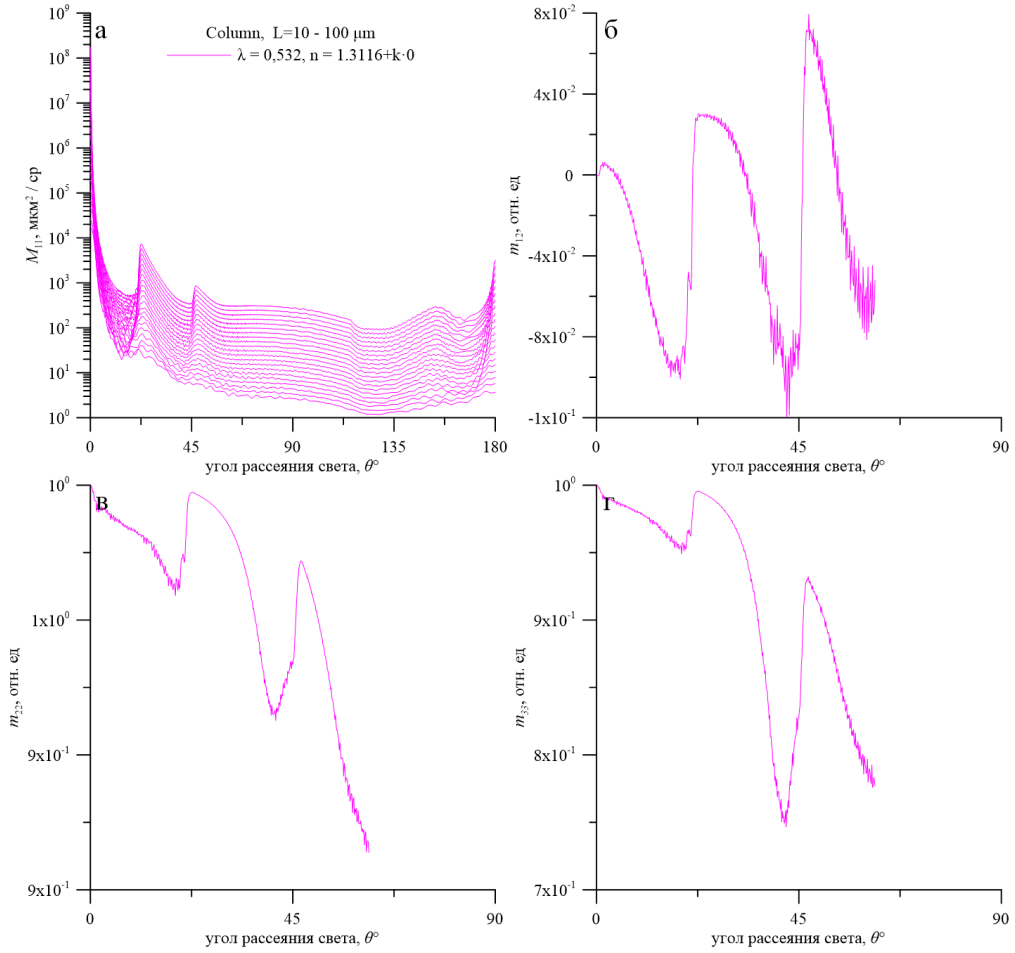



Рисунок 13 – Зависимость элементов ($M_{11}$ (а), $m_{12}$(б), $m_{22}$(в), $m_{33}$(г)) от угла рассеяния света ($\theta°$) для гексагональных столбиков размером от 10 до 100 мкм, $\lambda$ = 0,532 мкм

Благодаря оптимизациям в приемлемые сроки были выполнены расчеты для шести длин волн (1,55 – 0,355 мкм) на гексагональных столбиках размером 10 – 100 мкм.

Для крупных гексагональных столбиков получены решения в конусах «вперед» и «назад» (рис. 14 и 15). Поскольку расчет на всей сфере рассеяния для крупных частиц значительно сложнее (серверная нагрузка), чем для диапазона 10 – 100 мкм, для них рассчитывались только указанные конусы, а

результаты сравнивались с ранее полученными в лаборатории решениями геометрической оптики.

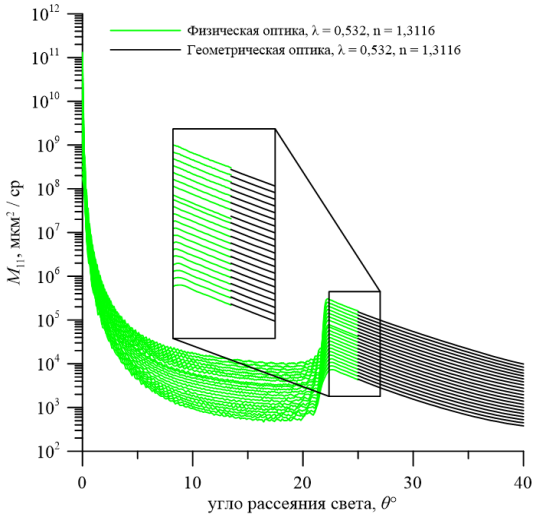



Рисунок 14 – Результат объединения результатов PO и GO в диапазоне углов рассеяния света $\theta$ = 0 – 40° для $\lambda$ = 0,532 мкм и размеров от 100 до 1000 мкм, полученный для гексагонального столбика

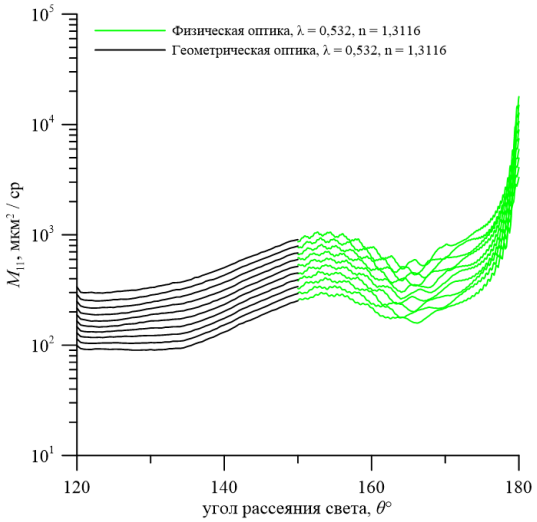



Рисунок 15 – Результат объединения результатов PO и GO в диапазоне углов рассеяния света $\theta$ = 120 – 180° для $\lambda$ = 0,532 мкм и размеров от 100 до 281,8 мкм, полученный для гексагонального столбика

Полученные результаты подтверждают хорошее согласие геометрической и физической оптики, что служит дополнительной апробацией последней.

В **заключении** сформулированы основные результаты диссертационной работы:

1. Установлено согласие приближений физической оптики и дискретных диполей (DDA). Физическая оптика наиболее точна для размеров частиц > 10 – 15 мкм, однако основные тенденции решений совпадают с DDA и для частиц < 10 мкм (при погрешности 10–15%).

2. Проведен комплексный анализ сходимости метода физической оптики для мелких и крупных несферических частиц. Сравнение выполнено как с точными численными методами (ADDA, IITM), так и с аналогами (геометрическая оптика, IGOM).

3. Показано, что зависимость спектрального отношения от деполяризации позволяет дифференцировать гексагональные частицы, частицы произвольной формы и дроксталлы, а также восстанавливать их форму.

4. Создан и опубликован в открытом доступе банк данных матриц обратного рассеяния света для выпуклых и невыпуклых несферических частиц перистых облаков, имеющий высокую значимость для задач лидарного зондирования атмосферы.

5. Получены решения для хаотически ориентированных частиц произвольной формы (100 – 200 мкм) при различных показателях преломления. Подтвержден эффект Умова через установленную зависимость геометрического альбедо от максимума степени поляризации.

6. Сформирован банк данных матриц рассеяния для всей сферы направлений (0 – 180°) с детальной проработкой конусов «вперед» (характеризует прямой сигнал) и «назад» (отраженный сигнал).

## ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

***Публикации в российских изданиях, включенных в Перечень ВАК:***

А1. **Ткачев И.В**., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Банк данных матриц обратного рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах размерами 10–100 мкм для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 3. С. 199–206. DOI: 10.15372/AOO20210306.

А2. **Ткачев И.В**., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В., Шмирко К.А. Эффект Умова для крупных частиц неправильной формы // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 8. С. 585–590. DOI: 10.15372/AOO20210803.

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

**Tkachev I.V**., Timofeev D.N., Kustova N.V., Konoshonkin A.V., Shmirko K.A. The Umov Effect for Large Irregular-Shaped Particles // Atmospheric and Oceanic Optics, 2021. V.34. No. 6. P. 596-602. DOI: 10.1134/S1024856021060269. (Scopus Q3)

А3. Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Кан Н., **Ткачев И.В**., Masuda K., Ishimoto H., Okamoto H., Боровой А.Г. Характеристики обратного рассеяния оптических и электромагнитных волн при совместном зондировании перистых облаков поляризационным лидаром (0,355 мкм) и 94-ГГц радаром // Оптика атмосферы и океана. 2022. Т. 35. № 08. С. 664–669. DOI: 10.15372/AOO20220810.

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Shishko V.A., Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Kan N., **Tkachev I.V**., Masuda K., Ishimoto H., Okamoto H., Borovoi A.G. Backscattering Characteristics of Optical and Electromagnetic Waves in Joint Sensing of Cirrus Clouds by a Polarizing Lidar (0.355 μm) and a 94-GHz Radar // Atmospheric and Oceanic Optics, 2022, V. 35. 10.1134/s1024856022060239. (Scopus Q4)

А4. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кан Н., **Ткачев И.В**., Боровой А.Г., Коханенко Г.П., Балин Ю.С. Расчет сигнала сканирующего лидара при зондировании перистых облаков, содержащих преимущественно горизонтально ориентированные кристаллы // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 02. С. 116–121. DOI: 10.15372/AOO20230206. (К2)

А5. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кан Н., **Ткачев И.В**., Сальников К.С., Боровой А.Г. Поляризационные характеристики когерентного пика обратного рассеяния крупных несферических частиц с хаотической ориентацией в пространстве // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 01. С. 66–72. DOI: 10.15372/AOO20230109. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Timofeev D.N., Kan N., **Tkachev I.V**., Salnikov K.S., Borovoi A.G. Polarization Characteristics of the Coherent Backscattering Peak for Large Nonspherical Particles with Random Orientation in Space // Atmospheric and Oceanic Optics. 2023. V. 36. No. 03. P. 244–255. DOI: 10.1134/S1024856023030156. (Scopus Q4)

А6. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., **Ткачев И.В**., Бакуте Е., Бабинович А.Е., Zhu X., Wang Z. Характеристики обратного рассеяния света на полых ледяных гексагональных столбиках для построения оптической модели перистых облаков. // Оптика атмосферы и океана. 2023. Т. 36. № 12. С. 1013–1019. DOI: 10.15372/AOO20231208. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Timofeev D.N., **Tkachev I.V**., Bakute E., Babinovich A.E., Zhu X., Wang Z. Properties of Light Backscattering on Hollow Hexagonal Ice Columns for Optical Models of Cirrus Clouds // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37. No. 02. P. 252–261. DOI: 10.1134/S1024856024700313. (Scopus Q4)

А7. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., **Ткачев И.В**., Бакуте Е., Бабинович А.Е., Zhu X., Wang Z. Оптическая модель перистого облака, состоящего из полых ледяных гексагональных столбиков, для задач лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 09. С. 785–793. DOI: 10.15372/AOO20240909. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Shishko V.A., Timofeev D.N., **Tkachev I.V**., Bakute E., Babinovich A.E., Zhu X., Wang Z. Optical Model of a Cirrus Cloud Consisting of Hollow Ice Hexagonal Columns for Lidar Applications // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37. No. 06. P. 896–904. DOI: 10.1134/S102485602470115X. (Scopus Q4)

А8. Шишко В.А., **Ткачев И.В**., Тимофеев Д.Н., Кустова Н.В., Коношонкин А.В. Оптические характеристики ледяных атмосферных кристаллов произвольной формы с разным количеством граней для задач лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 10. С. 868–873. DOI: 10.15372/AOO20241009. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Shishko V.A., **Tkachev I.V**., Timofeev D.N., Kustova N.V., Konoshonkin A.V. Optical Properties of Atmospheric Ice Crystals of Arbitrary Shape with Different Number of Facets for Problems of Laser Sensing // Atmospheric and Oceanic Optics. 2025. V. 38. No. 01. P. 90–95. DOI: 10.1134/S1024856024701343. (Scopus Q4)

А9. Коношонкин А.В., Шишко В.А., Кустова Н.В., Liu D., Wang Z., Тимофеев Д.Н., **Ткачев И.В**., Сальников К.С., Zhu X., Wang Y. ScIce-2023 – банк данных матриц обратного рассеяния света для ледяных кристаллов перистых облаков для интерпретации данных лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 08. С. 665–672. DOI: 10.15372/AOO20250810. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Konoshonkin A.V., Shishko V.A., Kustova N.V., Liu D., Wang Z., Timofeev D.N., **Tkachev I.V**., Salnikov K.S., Kan N., Zhu X., Wang Y. ScIce-2023 Database of Backscattering Mueller Matrices of Ice Crystals of Cirrus Clouds for Lidar Applications // Atmospheric and Oceanic Optics. 2025. V. 38. No. 06. P. 751–758. DOI: 10.1134/S1024856025700666. (Scopus Q4)

А10. Сальников К.С., Коношонкин А.В., **Ткачев И.В**., Кустова Н.В., Шишко В.А., Тимофеев Д.Н., Кан Н. Верификация методом дискретных диполей приближения физической оптики при расчете рассеяния света в направлении назад // Оптика атмосферы и океана. 2025. Т. 38. № 10. С. 865873. DOI: 10.15372/AOO20251012. (К2)

*в переводной версии журнала входящей в Scopus:*

Salnikov K.S., Konoshonkin A.V., **Tkachev I.V**., Kustova N.V., Shishko V.A., Timofeev D.N., Kan N. Verification of Physical Optics Approximation by the Discrete Dipole Method in Calculations of Light Backscattering // Atmospheric and Oceanic Optics. 2026. V. 39. No. 01. P. 81–90. DOI: 10.1134/S1024856025701015. (Scopus Q4)

А11. Тимофеев Д.Н., **Ткачев И.В**., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А. Исследование спектрального отношения атмосферных ледяных частиц для оценки их характерного размера в задачах лазерного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2026. Т. 39. № 07. С. 594–601. DOI: 10.15372/AOO20260707.

***Публикации в изданиях, индексируемых Web of Science и Scopus:***

А12. Salnikov K.S., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., **Tkachev I.V**., Kan N.V., Shaleev A.V., Timofeev D.N., Shishko V.A. Limits of Applicability of the Physical Optics Approximation: Dependence on Particle Size, Shape, and Scattering

Angle // Russ. Phys. J. 2026. V. 68. P. 2180–2185. DOI:10.1007/s11182-026-03667-5.

A13. **Tkachev I.V**., Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Kan N. Light Scattering by Ice Crystal Aggregates in Physical Optics Approximation // Russ. Phys. J. 2025. V. 68. P. 1768–1773. DOI: 10.1007/s11182-025-03617-7. (Scopus Q3)

A14. Salnikov K.S., Kustova N.V., Timofeev D.N., **Tkachev I.V**., Konoshonkin A.V. Absorption Effect on Light Scattering by Dust Particles in Physical Optics Approximation // Russ. Phys. J. 2025. V. 68. No.7. P. 972–977. DOI: 10.1007/s11182-025-03517-w. (Scopus Q3)

A15. Zhu X., Konoshonkin A., Wang Zh., Kustova N., Shishko V., Timofeev D., **Tkachev I**., Wang Y., Liu D. Backscattering Properties of Quasi-Horizontally Oriented Ice Crystals for Scanning Lidars with Small Tilt Angles // Optics Express. 2025. V. 33. No.6. P. 14012. DOI: 10.1364/oe.551337. (Scopus Q1)

A16. Zhu X., Wang Zh., Konoshonkin A., Kustova N., Shishko V., Timofeev D., **Tkachev I**., Liu D. Backscattering Properties of Randomly Oriented Hexagonal Hollow Columns for Lidar Application // Optics Express. 2023. V. 31. No.12. P. 35257. DOI: 10.1364/oe.502185. (Scopus Q1)

A17. Kustova N., Konoshonkin A., Shishko V., Timofeev D., **Tkachev I**., Wang Z., Borovoi A. Depolarization Ratio for Randomly Oriented Ice Crystals of Cirrus Clouds // Atmosphere. 2022. V. 13. No. 10. DOI: 10.3390/atmos13101551. (Scopus Q2)

A18. Konoshonkin A.V., **Tkachev I.V**., Timofeev D.N., Kustova N.V., Shmirko K.A., Zubko E.S. Umov Effect for Large Nonspherical Particles // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 1. P. S104–S107. DOI: 10.3103/S1062873822700484. (Scopus Q3)

A19. Konoshonkin A., Kustova N., Wang Zh., Zhu X., Liu D., Shishko V., Timofeev D., **Tkachev I**., Salnikov K., Wang Y. A Database of Backscattering Mueller Matrices of Ice Crystals of Cirrus Clouds for Lidar Applications // Geophysical Research Letters. 2025. V. 52. No. 17. DOI: 10.1029/2025gl117090. (Scopus Q1)

A20. Razenkov I.A., Wang Zh., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Zhu X., Shishko V.A., Li Ch., Timofeev D.N., Salnikov K.S., **Tkachev I.V**., Kan N.V., Wu D., Liu D., Trigub M.V. Two-Beam Polarization Lidar for the Estimation a Flutter of Horizontally Oriented Crystals in Cirrus Clouds // Atmospheric and Oceanic Optics. 2025. V. 38. No. S1. P. S47–S54. DOI: 10.1134/S1024856025700769. (Scopus Q4)

A21. Babinovich A.E., Shishko V.A., Timofeev D.N., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., **Tkachev I.V**., Salnikov K., Kan N. Important Aspects of Light Scattering on Hollow Column Ice Particles // Atmospheric and Oceanic Optics. 2024. V. 37. No. S1. P. S127–S134. DOI: 10.1134/S1024856024701392. (Scopus Q4)

## Список цитируемой литературы


1. Järvinen E., Jourdan O., Neubauer D., Yao B., et al. Additional global climate cooling by clouds due to ice crystal complexity // Atmospheric Chemistry and Physics. 2018. V. 18. No. 21. P. 15767–15781. DOI: 10.5194/acp-18-15767 2018.
2. Журавлева Т.Б., Насртдинов И.М. Влияние микроструктуры и горизонтальной неоднородности разорванной кристаллической облачности на средние потоки солнечной радиации в видимой области спектра: результаты численного моделирования // Оптика атмосферы и океана. 2021. Т. 34. № 10. С. 792–802. DOI: 10.15372/AOO20211006.
3. Kuehn R., Holz R., Eloranta E., Vaughan M., Hair J. Developing a Climatology of Cirrus Lidar Ratios Using Univeristy of Wisconsin HSRL Observations // EPJ Web of Conferences. 2016. V. 119. No. 16009. DOI: 10.1051/epjconf/201611916009.
4. Самохвалов И.В., Кауль Б.В., Насонов С.В., Животенюк И.В., Брюханов И.Д. Матрица обратного рассеяния света зеркально отражающих слоев облаков верхнего яруса, образованных кристаллическими частицами, преимущественно ориентированными в горизонтальной плоскости // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25. № 5. С. 403–411.
5. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосферы и океана. 2011. Т. 24. № 4. С. 293 – 299.
6. Kaul B.V., Samokhvalov I.V., Volkov S.N. Investigating Particle Orientation in Cirrus Clouds by Measuring Backscattering Phase Matrices with Lidar // Appl. Opt. 2004. V. 43. No. 36. P. 6620–6628. DOI: 10.1364/AO.43.006620.
7. Borovoi A., Balin Y., Kokhanenko G., Penner I., Konoshonkin A., Kustova N. Layers of Quasi-horizontally Oriented Ice Crystals in Cirrus Clouds Observed by a Two-Wavelength Polarization Lidar // Optics Express. 2014. V. 22. No. 20. P. 24566–24573. DOI: 10.1364/OE.22.024566.
8. Heymsfield A.J., McFarquhar G.M., Collins W.D., Goldstein J. A., Valero F.P.J., Spinhirne J., Hart W., Pilewskie P. Cloud Properties Leading to Highly Reflective Tropical Cirrus: Interpretations from CEPEX, TOGA COARE, and Kwajalein, Marshall Islands // JGR Atmospheres. 1998. V. 103, No. D8. DOI: 10.1029/97JD03679.
9. Okamoto H., Sato K., Hagihara Y. Global Analysis of Ice Microphysics from CloudSat and CALIPSO: Incorporation of Specular Reflection in Lidar Signals // J. Geophys. Res. 2010. V. 115. No. D22. DOI: 10.1029/2009JD013383.
10. Wang Z., Liu D., Xie C., Zhou J. An Iterative Algorithm to Estimate LIDAR Ratio for Thin Cirrus Cloud over Aerosol Layer // Journal of the Optical Society of Korea. 2011. V. 15, № 3. P. 209–215.
11. Katagiri S., Hayasaka T., Shimizu A., Matsui I., Nishizawa T., Sugimoto N., Takamura T. Long Term Analysis of Cirrus Clouds Effects on Shortwave and Longwave Radiation Derived from Data Acquired by Ground-based and Satellite-borne Observations // AIP Conference Proceedings. 2013. V. 1531. No. 1. P. 492–495. DOI: 10.1063/1.4804814.

12. Tinel C., Testud J., Pelon J., Hogan R.J., Protat A., Delanoe J., Bouniol D. The Retrieval of Ice-cloud Properties from Cloud Radar and Lidar Synergy // Journal of Applied Meteorology. 2005. V. 44. No. 6. P. 860–875. DOI: 10.1175/JAM2229.1.

13. Yang P., Liou K.N. Light Scattering by Hexagonal Ice Crystals: Comparison of Finite-difference Time Domain and Geometric Optics Models // J. Opt. Soc. Am. A. 1995. V. 12. No. 1. P. 162–176. DOI: 10.1364/JOSAA.12.000162.

14. Yurkin M.A., Moskalensky A.E. Open-source Implementation of the Discrete-dipole Approximation for a Scatterer in an Absorbing Host Medium // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 2015. No. 1. DOI: 10.1088/1742-6596/2015/1/012167.

15. Peterson B., Ström S. Matrix for Electromagnetic Scattering from an Arbitrary Number of Scatterers and Representations of E (3) // Phys. Rev. D. 1973. V. 8. No. 10. P. 3661–3678. DOI: 10.1103/PhysRevD.8.3661.

16. 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.

17. Попов А.А., Шефер О.В. Аналитическое выражение коэффициента ослабления оптического излучения полидисперсной системой кристаллов в виде пластинок // Оптика атмосферы. 1989. Т. 2. № 5. С. 532–535.

18. 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.

19. Попов А.А. Разработка и исследование вычислительных методов для некоторых классов прикладных задач электродинамики: автореферат дис. ... доктора физико-математических наук: 01.04.03 / Томск. ун-т. Томск, 1992. 41 с.

20. Ромашов Д.Н. Матрица обратного рассеяния для монодисперсных ансамблей гексагональных ледяных кристаллов // Оптика атмосферы и океана. 1999. Т. 12. № 5. С. 392– 400.

21. Borovoi A.G., Grishin I.A. Scattering Matrices for Large Ice Crystal Particles // Journal of the Optical Society of America A. 2003. V. 20, No. 11. P. 2071–2080. DOI: 10.1364/JOSAA.20.002071.

22. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Осипов В.А., Боровой А.Г., Masuda K., Ishimoto H., Okamoto H. Метод физической оптики для решения задачи рассеяния света на кристаллических ледяных частицах: сравнение дифракционных формул // Оптика атмосферы и океана. 2015. Т. 28. № 09. С. 830–843. DOI: 10.15372/AOO20150909.

23. 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. No. 9. P. 1492 1508. DOI: 10.1016/j.jqsrt.2011.02.015.

24. Yang P., Liou K.N. Geometric-optics–integral-equation Method for Light Scattering by Nonspherical Ice Crystals // Applied Optics. 1996. V. 35. No. 33. P. 6568–6584. DOI: 10.1364/ao.35.006568.

25. Глотов В.Д., Карутин С.Н., Кожинов А.Л., Митрикас В.В., Пафнутьев А.А. О возможных направлениях использования квантово-оптических станций в программе ГЛОНАСС // Труды Института прикладной астрономии РАН. 2019. вып. 50. DOI: 10.32876/ApplAstron.50.23-30.

26. Бусыгин В.П., Кузьмина И.Ю. Пропускание лазерного излучения кристаллическими облаками на трассах «земля – космос» // Оптика атмосферы и океана. 2024. Т. 37. № 02. С. 176–183. DOI: 10.15372/AOO20240213.

27. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Timofeev D.N., Kustova N.V., Borovoi A.G., Kokhanenko G.P., Balin Yu.S. Calculation of the Signal of a Scanning Lidar for Remote Sensing of Cirrus Clouds Containing Predominantly Horizontally Oriented Crystals // Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics. 2023. V. 86. P. S207–S210. DOI: 10.3103/S1062873822700708.

28. Kustova N., Konoshonkin A., Kokhanenko G., Wang Z., Shishko V., Timofeev D., Borovoi A. Lidar backscatter simulation for angular scanning of cirrus clouds with quasi-horizontally oriented ice crystals // Optics Letters. 2022. V. 47. No. 15. P. 3648–3651. DOI: 10.1364/OL.463282.

29. Heymsfield A. Ice Crystal Terminal Velocities // J. Atmos. Sci. 1972. V.29. No. 7. P.1348 – 1357. 0469(1972)029<1348:ICTV>2.0.CO;2.