

*На правах рукописи*



**Шишко Виктор Андреевич**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ОПТИЧЕСКИХ СВОЙСТВ АТМОСФЕРНЫХ  
ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛОВ НЕПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ**

Специальность 01.04.05 – Оптика

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание учёной степени  
кандидата физико-математических наук

Томск – 2020

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:** доктор физико-математических наук,  
**Коношонкин Александр Владимирович**

**Официальные оппоненты:** **Павлов Андрей Николаевич**  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт автоматизации и процессов управления Дальневосточного отделения Российской академии наук, Лаборатория лазерных методов исследования вещества, главный научный сотрудник;

**Шипилов Сергей Эдуардович**  
доктор физико-математических наук,  
Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский Томский государственный университет», кафедра радиофизики, и.о. заведующего кафедрой

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

Защита состоится 25 декабря 2020 г. в 14 ч 30 мин на заседании диссертационного совета Д 003.029.01, 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,  
<http://iao.ru/files/iao/theses/thesis106/text.pdf>

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2020 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,  
доктор физико-математических наук



Панина Е.К.

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы диссертации.** В настоящее время перистые облака являются объектом активного изучения как контактными, так и дистанционными методами, поскольку именно перистые облака являются основным источником неопределенности в современных моделях изменения климата и долгосрочного прогноза погоды [1, 2].

Наиболее распространенными методами дистанционного исследования перистых облаков являются пассивные измерения с помощью как наземных, так и космических радиометров. Относительная простота конструкции и неприхотливость в обслуживании в совокупности с невысокой стоимостью привели к созданию обширной наземной сети таких приборов – сети AERONET [3]. Помимо наземных исследований ведутся также систематические наблюдения и из космоса: MODIS [4], AVHRR [5], POLDER [4] и др.

Основным недостатком радиометров является их неспособность построить вертикальный профиль исследуемых параметров, что является важным при изучении перистых облаков. Для преодоления этого ограничения были созданы инструменты активного дистанционного зондирования, в первую очередь, лидары. В силу сложности конструкции лидары значительно дороже радиометров и количество таких инструментов существенно меньше. Однако они также объединены в многочисленные лидарные сети: EARLINET, AD-Net, LALINET/ALINET, MPLNet, NDACC, CIS-LINet и CREST. Стоит отметить, что помимо наземных существуют космические лидары: LITE, БАЛКАН, CALIOP, CATS (США), ALADIN. Планируется к запуску лидар ATLID на спутнике EarthCARE.

Несмотря на большую численность наземных и космических лидаров, основным объектом их исследования является атмосферный аэрозоль. Лишь небольшое количество исследований проводится по изучению перистых облаков. Например, в России исследования проводятся группами ученых под руководством Ю.С. Балина [6], И.В. Самохвалова [7], а за рубежом – под руководством К. Sassen [8], М. Hayman [9], J. Reichardt [10], М. del Guasta [11], V. Noel [12], D. Liu [13], Н. Okamoto [14] и др. Такое положение дел обусловлено отсутствием решения теоретической задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков, необходимого для интерпретации лидарных данных. Поэтому такие исследования ведутся либо с целью изучения качественных характеристик, либо с целью накопления данных в надежде, что в будущем их удастся интерпретировать.

Несмотря на активные попытки решить прямую задачу рассеяния света на частицах перистых облаков как точными численными методами, так и в рамках приближения геометрической оптики, существенный прорыв удалось

совершить только с применением к таким частицам приближения физической оптики А.А. Поповым и О.В. Шефер [15] в ИОА СО РАН. Стоит отметить, что впервые метод физической оптики был применен для решения задачи рассеяния света на сфероидах в 1982 году [16] и в дальнейшем развивался Mazon P. и Muller S. [17].

Благодаря методу физической оптики удалось решить задачу рассеяния света на идеальных ледяных кристаллических частицах перистых облаков и провести ряд успешных интерпретаций лидарных данных [18, 19]. Однако сравнения теоретических расчетов с результатами экспериментальных наблюдений показали, что перистые облака не могут быть представлены лишь частицами идеальной формы. Для корректной интерпретации лидарных данных необходимо дополнить банк данных решением задачи рассеяния света для частиц неправильной формы и частиц произвольной формы.

Таким образом, **целью данной диссертации** является исследование основных закономерностей в рассеянии света на ледяных кристаллах неправильной и случайной форм в рамках метода физической оптики, а также расчет матрицы рассеяния света для таких частиц в окрестности направления рассеяния назад, что имеет существенное значение для задач лазерного зондирования перистых облаков.

Поставленная цель потребовала решения следующих **задач**:

- исследование влияния искажения формы кристалла на решение задачи рассеяния света в направлении рассеяния назад;
- расчет матриц обратного рассеяния света для неидеальных гексагональных пластинок и столбиков;
- анализ оптических характеристик частиц неправильной формы;
- исследование когерентного и дифракционного пиков в обратном рассеянии;
- исследование перспектив совместного использования лидара и радара для изучения микрофизических параметров перистых облаков.

**Научная новизна результатов** состоит в следующем:

- Исследовано влияние искажения формы идеальных гексагональных частиц на пик обратного рассеяния света. Полученное решение для деформированных гексагональных столбиков и пластинок дополняет имеющийся в ИОА СО РАН банк данных матриц обратного рассеяния света и представлено в свободном доступе;
- Проработаны вопросы минимизации расчетной сетки по углам ориентации и деформации частицы, а также проведено обоснование полученных результатов в контексте распространений оптических пучков в частице;

- Показано, что для рассмотренных кристаллов существуют ограниченные наборы траекторий оптических пучков дающих преобладающий вклад в направлении рассеяния назад;
- Установлено, что использование смеси кристаллов идеальной и неправильной формы позволяет добиться лучшего согласия с экспериментальными данными, чем при использовании только ансамбля состоящего из идеальных кристаллов;
- Показано, что у гексагональных ледяных столбиков наблюдается эффект роста деполяризационного отношения при небольших углах искажения формы кристалла, в то время как у гексагональных пластинок данный эффект отсутствует;
- Получено решение задачи рассеяния света на сферических частицах свободное от высокочастотных осцилляций, позволяющее строить эффективные алгоритмы интерпретации лидарных данных;
- Показано, что в рамках приближения физической оптики рассеянный в обратном направлении свет может быть разделен на две качественно разные части: когерентную и некогерентную;
- Построена уникальная база данных отношений радарного сигнала к лидарному. Решение получено в рамках приближения физической оптики и метода дискретных диполей.

#### **Практическая значимость работы:**

- Построен банк данных матриц обратного рассеяния микроволнового излучения для ледяных частиц, характерных для перистых облаков для частот 35 и 94 ГГц. Банк данных представлен в открытом доступе [20];
- Построенный банк данных матриц обратного рассеяния света и отношения радар-лидар представляют собой большую практическую ценность для интерпретации радарных и лидарных данных;
- Полученное решение задачи рассеяния света на сферических частицах в рамках теории Г. Ми, свободное от высокочастотных осцилляций, позволяет строить эффективные алгоритмы интерпретации лидарных данных для прикладных задач;
- Результаты работы использованы при выполнении грантов: РФФИ 15-05-06100 «Исследования микрофизических характеристик перистых облаков сканирующим поляризационным лидаром» (2015–2017 гг.), 18-05-00568 «Разработка оптической и микрофизической модели перистых облаков для задач лидарного зондирования» (2018–2020 гг.), 18-55-53046 «Совместное использование лидарных и радарных сигналов при исследовании микрофизических характеристик перистых облаков» (2018–2019 гг.) и РФФИ № 18-77-10035 «Восстановление пространственной ориентации атмосферных кристаллических частиц из данных поляризационного сканирующего лидара и спутниковых наблюдений» (2018–2021 гг.).

### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Показано, что наблюдаемое при лазерном зондировании перистых облаков в условиях реализации однократного рассеяния деполяризационное отношение порядка 0,4 на длине волны 0,532 мкм, не может быть объяснено решением задачи рассеяния света на идеальных ледяных кристаллах, и обусловлено отсутствием у частиц в облаке уголкового отражения. Установлено, что уголковое отражение пропадает уже при небольшой деформации прямого двугранного угла гексагонального ледяного столбика на величину порядка  $0,38\lambda/D$  и больше (длина волны/диаметр окружности, описывающей основание гексагонального кристалла).

2. Для отдельно взятой хаотически ориентированной атмосферной ледяной кристаллической частицы случайной выпуклой формы в направлении рассеяния назад в рамках приближения геометрической оптики может существовать как резкий пик интенсивности угловым размером порядка  $\lambda/d$ , так и провал того же размера. Однако при усреднении по ансамблю таких частиц в окрестности направления рассеяния назад в рамках приближения геометрической оптики наблюдается гладкая функция без пиков и провалов. Здесь  $d$  – диаметр сферы, описывающей частицу.

3. При учете волновых свойств света в рамках метода физической оптики для ансамбля хаотически ориентированных ледяных кристаллических частиц случайной выпуклой формы с параметром размера  $x$  наблюдается когерентный пик интенсивности с угловой шириной  $\Delta\theta_{\text{coh}} \approx \pi/x$  в окрестности направления рассеяния назад. Коэффициент усиления такого когерентного пика не может превышать 2. Здесь параметр размера  $x$  равен  $\pi d/\lambda$ , где  $\lambda$  – длина волны,  $d$  – диаметр сферы, описывающей частицу.

4. Отношение коэффициентов обратного рассеяния ансамбля хаотически ориентированных атмосферных кристаллов различной формы для радарных длин волн (8565 и 3189 мкм) и лидарных длин волн (0,355; 0,532 и 1,064 мкм) пропорционально модальному размеру кристаллов в четвертой степени и практически не зависит от их формы в диапазоне модальных размеров от 10 до 100 мкм. Здесь ансамбль подчиняется гамма распределению частиц по размерам. Под размером понимается радиус сферы того же объема что и кристалл.

#### **Достоверность полученных результатов обеспечена:**

- физической непротиворечивостью и адекватностью используемых математических моделей;
- применением методов решения задачи рассеяния света, для которых установлены границы применимости и точность;
- хорошим согласием рассчитанных данных с результатами экспериментальных наблюдений, а также результатами других авторов;
- сеточной сходимостью расчетных данных.

### **Личный вклад автора**

Соискатель принимал непосредственное участие в постановке всех задач, рассмотренных в диссертации. Диссертант лично разрабатывал необходимые алгоритмы и лично провел все численные эксперименты, необходимые для исследования оптических свойств неидеальных частиц и частиц случайной формы. Соискатель лично проводил исследование оптических характеристик искаженных гексагональных столбиков в зависимости от угла искажения частицы, для чего провел оценку вклада оптических траекторий в направление рассеяния света назад и применил динамическую расчетную сетку. Соискателем также получено решение задачи рассеяния света на частицах произвольной формы как в рамках геометрической, так и физической оптики. Соискатель принимал непосредственное участие в анализе обнаруженного им когерентного пика обратного рассеяния у такого рода частиц. Соискатель лично построил банк данных решений задачи рассеяния электромагнитного излучения на атмосферных ледяных частицах для радаров, функционирующих на частотах 35 и 94 ГГц. Уникальный банк данных для интерпретации совместных лидарно-радарных исследований перистых облаков также построен при непосредственном участии соискателя. Обработка и анализ результатов выполнены диссертантом совместно с научным руководителем.

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**

Материалы по теме диссертации представлялись на следующих международных и всероссийских конференциях и симпозиумах: XXI Всероссийской конференции «Теоретические основы конструирования численных алгоритмов и решение задач математической физики» (Дюрсо, 2016); международной конференции «Remote sensing» (Edinburgh, UK, 2016); XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (Томск, 2016); международной молодежной научной школе «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2016); XXII–XXVI Рабочей группе «Аэрозоли Сибири» (Томск, 2015–2019); XXIII международной научно-практической конференции «Развитие науки в XXI веке» (Харьков, Украина, 2017); 55-й Международной научной студенческой конференции МНСК-2017 (Новосибирск, 2017); XXII–XXV международном симпозиуме «Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы» (Томск, 2016, 2018; Иркутск, 2017; Новосибирск, 2019); международном симпозиуме «Атмосферная радиация и динамика» (Санкт-Петербург-Петродворец, 2017); международной конференции «Electromagnetic and Light Scattering»

(Maryland, USA, 2017); 28-й и 29-й международной конференции «International Laser Radar Conference» (Bucharest, Romania, 2017; Hefei, China, 2019); Всероссийской научной конференции «ВНКСФ-24» (Томск, 2018); XV Международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы развития фундаментальных наук» (Томск, 2018); 8-й Международной научно-практической конференции «Актуальные проблемы радиофизики» (Томск, 2019).

### **Публикации**

Основные результаты исследований представлены в 26 публикациях, 7 из которых – в издании, входящем в перечень российских рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты диссертаций на соискание ученой степени кандидата наук, 2 статьи опубликованы в изданиях, входящих в международные реферативные базы данных и системы цитирования Web of Science и Scopus, 17 статей в материалах международных конференций.

**Диссертационная работа** состоит из введения, четырех глав, заключения, списка использованной литературы из 192 наименований. Каждая глава состоит из краткой аннотации, основной части и заключения в виде основных выводов по рассматриваемой главе. Общий объем работы 143 страницы, включая 60 рисунков и 4 таблицы.

## **КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

Во **введении** описывается важность выбранной темы, ее актуальность и место в мировой научной повестке, формулируются цель работы и защищаемые положения, отмечается новизна полученных результатов, кратко описано содержание диссертации по главам, приводятся данные о публикациях и личном вкладе автора.

В **первой главе** рассматривается постановка задачи рассеяния света на несферических частицах. Проводится обзор современных методов численного решения задачи рассеяния света. Вводятся системы координат и понятие матрицы рассеяния света. Обсуждаются микрофизические параметры и модели частиц перистого облака.

**Вторая глава** посвящена решению задачи рассеяния света на неидеальных ледяных гексагональных атмосферных кристаллах и анализу результатов, полученных в рамках приближения физической оптики и основана на публикациях [A1–A5]. В данной главе впервые проведен комплексный анализ оптических характеристик неидеальных гексагональных атмосферных кристаллов.

Решение задачи рассеяния света на идеальных гексагональных ледяных кристаллических частицах уже было получено в рамках метода физической оптики и хорошо исследовано. Однако искажение формы кристалла

приводит к нарушению симметрии частицы, и соответственно, вычислительная трудоемкость метода возрастает для гексагональных частиц в 6 раз. Поэтому остро встает задача оптимизации вычислений, которую можно осуществить, уменьшив количество рассчитываемых оптических пучков в алгоритме трассировки пучков.

Поскольку метод физической оптики реализован в рамках концепции оптических пучков, необходимо было провести предварительную оценку вклада различных оптических пучков в направлении рассеяния назад. Было выявлено, что основной вклад, а именно 99,9% энергии вносится лишь 3% оптических пучков, основные из которых представлены на рисунке 1.

Таким образом, предварительная оценка позволила отбросить 97% пучков и ускорить решение до 30 раз, ухудшив точность метода лишь на 0,1%. Однако список траекторий существенно меняется даже при небольшой (менее  $5^\circ$ ) деформации ледяного кристалла, что требует проведения новой оценки в рамках приближения геометрической оптики.

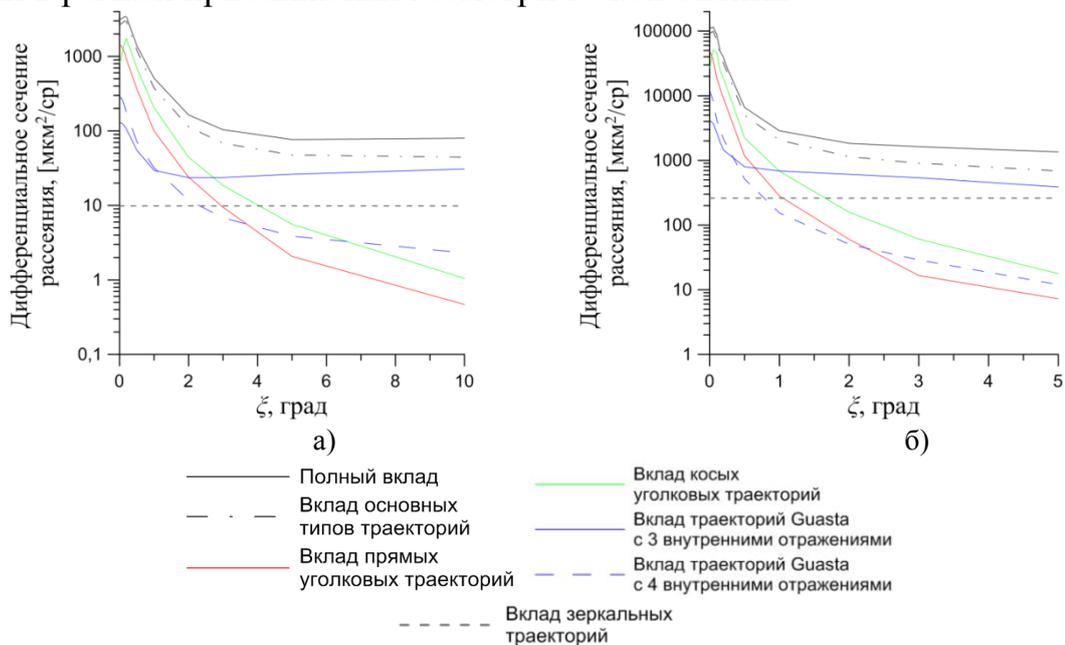


Рисунок 1 – Вклад основных типов траекторий в интенсивность обратного рассеяния в зависимости от угла искажения столбика  $\zeta$ . Длина столбика: а) 100 мкм, б) 1000 мкм. Длина волны – 0,532 мкм.

Однако, даже несмотря на осуществление предварительной выборки траекторий на основе их вклада, которая позволяет существенно сократить список траекторий и время расчета, задача рассеяния света на неидеальных гексагональных ледяных кристаллических частицах все еще является очень ресурсоемкой. Поэтому диссертантом было предложено использовать переменный шаг по углу наклона гексагонального столбика  $\beta$ , что в совокупности с динамической расчетной сеткой (см. рисунок 2) позволило существенно сократить время расчета.

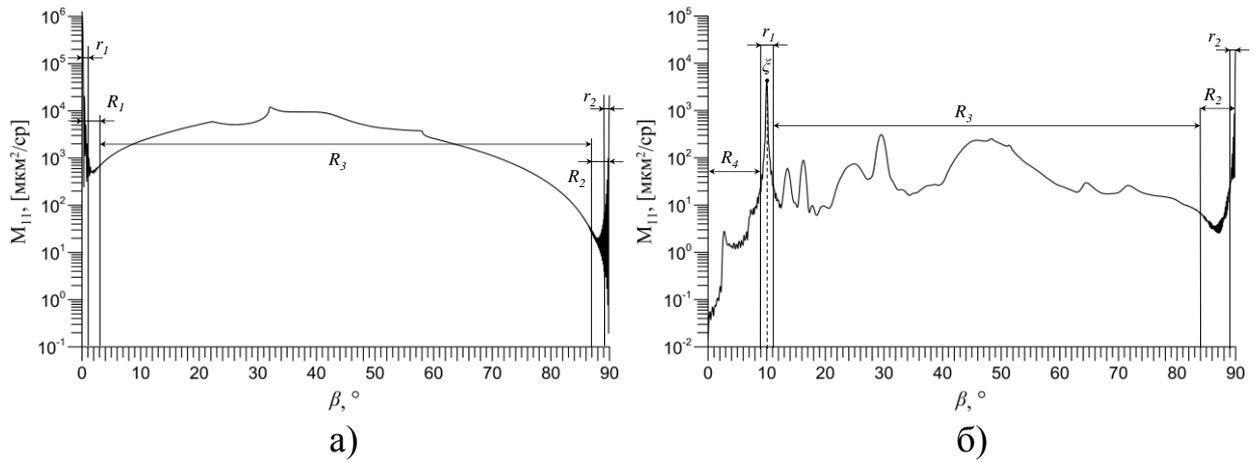


Рисунок 2 – Типичная зависимость элемента  $M_{11}$  от угла наклона столбика  $\beta$ :  
 а) идеальный столбик; б) столбик, искаженный на  $10^\circ$ . Длина столбика  $L = 100$  мкм,  
 диаметр  $D = 69,6$  мкм.

Оценочные формулы для динамической расчетной сетки, полученные диссертантом, представлены ниже:

$$r_1 \approx \begin{cases} \xi + I, & 0 \leq \xi \leq I, \\ 2I, & \xi > I, \end{cases}$$

где

$$I \approx 0,69 \frac{180}{\pi} \frac{\lambda}{D},$$

$$r_2 \approx 0,5 \frac{180}{\pi} \frac{\lambda}{L},$$

$$R_1 \approx \begin{cases} 40L^{-0,5}, & \lambda = 1,064 \text{ мкм}, \\ 29L^{-0,5}, & \lambda = 0,532 \text{ мкм}, \\ 22L^{-0,5}, & \lambda = 0,355 \text{ мкм}, \end{cases}$$

$$R_2 \approx \begin{cases} 37,5D^{-0,47}, & \lambda = 1,064 \text{ мкм}, \\ 27,5D^{-0,47}, & \lambda = 0,532 \text{ мкм}, \\ 21D^{-0,47}, & \lambda = 0,355 \text{ мкм}, \end{cases}$$

$$R_4 \approx \begin{cases} 0, & \xi \leq I, \\ \xi - I, & \xi > I. \end{cases}$$

Также получена оценочная формула для ширины пика обратного рассеяния (см. рисунок 1):

$$\xi_{width}(\lambda, D) = 1,2 \cdot \frac{\lambda}{D} \cdot \frac{180}{\pi}.$$

Наличие множителя  $1,2\lambda/D$  подтверждает дифракционную природу пика в окрестности рассеяния назад, наблюдаемого у гексагональных ледяных кристаллов.

Указанная выше методика позволила диссертанту получить решение задачи рассеяния света на неидеальных гексагональных столбиках в разумные сроки.

Сравнение оптических характеристик неидеальных гексагональных пластинок с неидеальными гексагональными столбиками показало, что наблюдаемый у гексагональных ледяных столбиков эффект роста деполяризационного отношения при небольших углах искажения формы ( $\xi < 1^\circ$ ) и угле флаттера больше  $20^\circ$  отсутствует у гексагональных пластинок (см. рисунок 3). Также видно, что при угле флаттера меньше  $20^\circ$  искажения формы гексагональной частицы не оказывают значительное влияние на ее оптические характеристики.

Расчеты, представленные в диссертации, позволили дополнить имеющийся банк данных матриц обратного рассеяния света (рассчитанный для кристаллических частиц идеальной формы) [20] матрицами для частиц неправильной формы, что позволило добиться лучшего согласия экспериментальных наблюдений и полученных расчетов [18, 19].

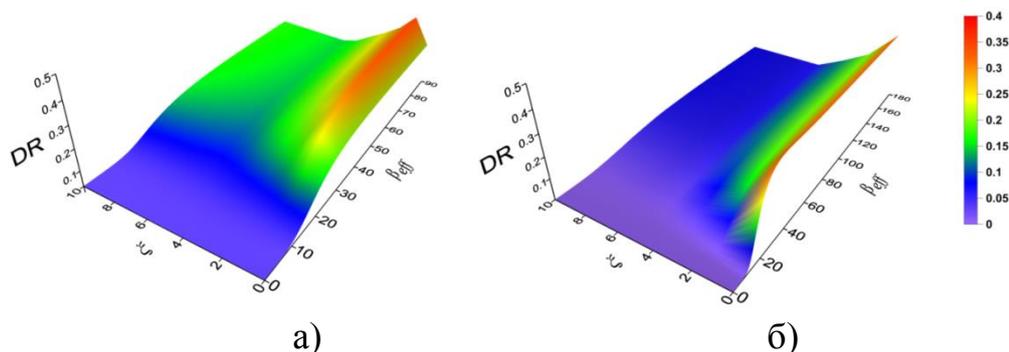


Рисунок 3 – Деполяризационное отношение, рассчитанное в зависимости от угла искажения  $\xi$  и угла флаттера  $\beta_{eff}$  частицы: а) для столбиков; б) для пластинок.

Во второй главе рассматривалась задача рассеяния света на неидеальных гексагональных ледяных кристаллах в направлении рассеяния назад. Было показано, что для таких частиц существует дифракционный пик, который уменьшается с ростом искажения прямого двугранного угла. Однако при решении задачи на частицах неправильной формы, у которых изначально отсутствуют прямые двугранные углы, остается открытым вопрос: будет ли существовать пик в окрестности направления рассеяния назад?

**Третья глава** посвящена ответу на данный вопрос и основывается на публикациях [А6, А8]. В главе представлено решение задачи рассеяния света на крупных (при параметрах размера  $x > 100$ ) случайно ориентированных несферических ледяных частицах с плоскими гранями, как в рамках

приближения геометрической, так и физической оптик, а также описан используемый в работе метод генерации частиц случайной формы.

При анализе четырех наборов ледяных частиц случайной формы, рассчитанных в рамках приближения геометрической оптики, было обнаружено, что для выпуклых ледяных частиц случайной формы выполняется следующая закономерность: в окрестности направления назад примерно в 25% случаев имеется «пик», в 25% случаев имеется «провал» и порядка в 50% случаев дифференциальное сечение рассеяния ведет себя стабильно. При этом усредненное по ансамблю дифференциальное сечение рассеяния не имеет ни «пиков», ни «провалов» (см. рисунок 4).

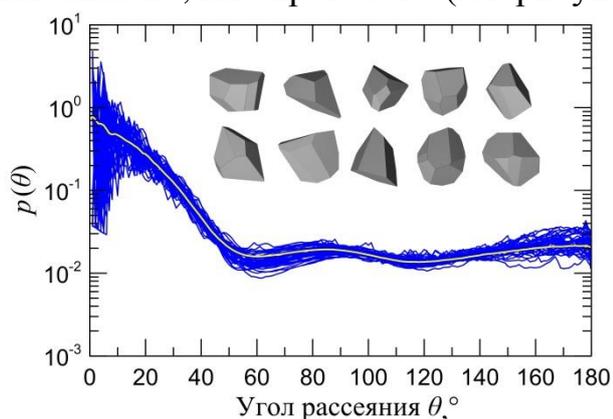


Рисунок 4 – Индикатрисы рассеяния, полученные в приближении геометрической оптики для набора из 300 ледяных частиц произвольной формы в зависимости от угла рассеяния  $\theta$ . Желтая линия – среднее значение по всему набору частиц.

Наличие «пика» или «провала» в дифференциальном сечении рассеяния, полученного в приближении геометрической оптики, объясняется прохождением в направлении строго назад ( $\theta = 180^\circ$ ) траекторий оптических пучков, имеющих равномерное распределение (см. рисунок 5, а) и неравномерное распределение (см. рисунок 5, б) в окрестности направления рассеяния назад.

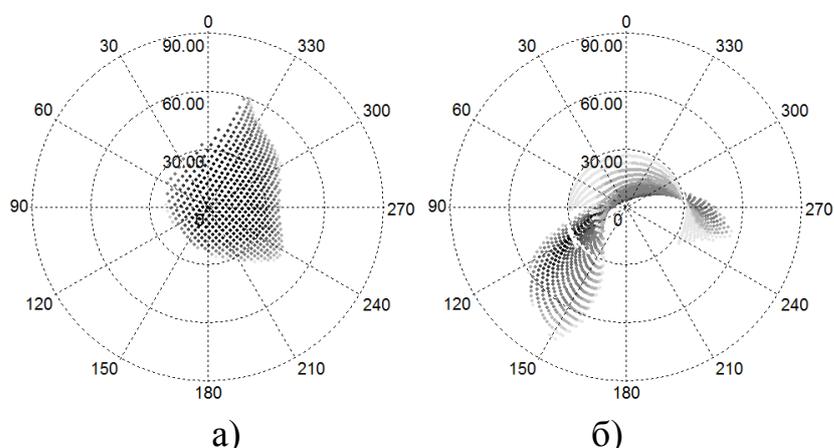


Рисунок 5 – Полусфера в направлении рассеяния назад, где точка в центре полусферы соответствует точке рассеяния строго назад: а) равномерное распределение траектории оптического пучка, б) неравномерное распределение траектории оптического пучка.

При решении задачи рассеяния света (в рамках приближения физической оптики) на крупных хаотически ориентированных ледяных частицах случайной формы использовались четыре формы кристаллов, имеющих (в рамках приближения геометрической оптики) в направлении рассеяния назад «пик», «квазиконстанту» и «провал» (см. рисунок 6).

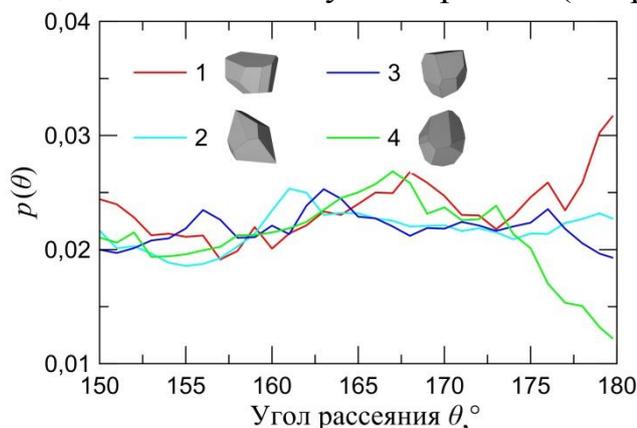


Рисунок 6 – Индикатрисы рассеяния для четырех кристаллов, имеющих в направлении рассеяния назад: «пик», «квазиконстанту» и «провал» соответственно. Решение получено в рамках приближения геометрической оптики.

Диссертантом показано, что решение, полученное в рамках приближения физической оптики, может быть разделено на две качественно разные составляющие  $p_{total} = p_{coh} + p_{incoh}$  (см. рисунок 7): когерентную (интерференционную) и некогерентную (дифракционную). Это позволило установить интерференционную природу пика интенсивности в окрестности направления рассеяния назад на частицах случайной формы.

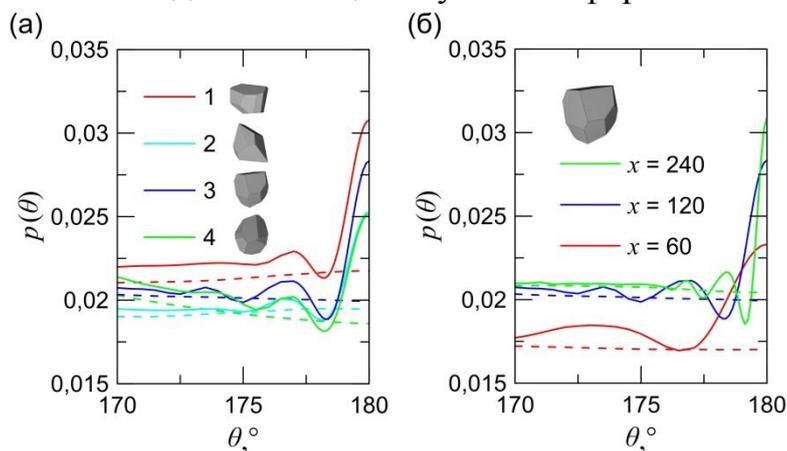


Рисунок 7 – Полная индикатриса рассеяния (сплошная линия) и ее некогерентная часть (пунктирная линия), рассчитанные в приближении физической оптики: а) для частиц 1, 2, 3 и 4 с исходным параметром размера  $x = 120$ ; б) для частицы 3 при различных параметрах размера ( $x = 60, 120$  и  $240$ ).

В диссертации показано, что коэффициент усиления  $\zeta = |p_{total}(180^\circ)|/|p_{incoh}(180^\circ)$  данного когерентного пика не может превышать 2. Это явление эквивалентно пику когерентного обратного рассеяния в многократно рассеивающих средах.

Вклад некогерентной компоненты  $p_{incoh}(\theta)$  увеличивается с ростом размера частицы и должен выходить (см. рисунок 8) на геометрикооптический режим при  $x \rightarrow \infty$ .

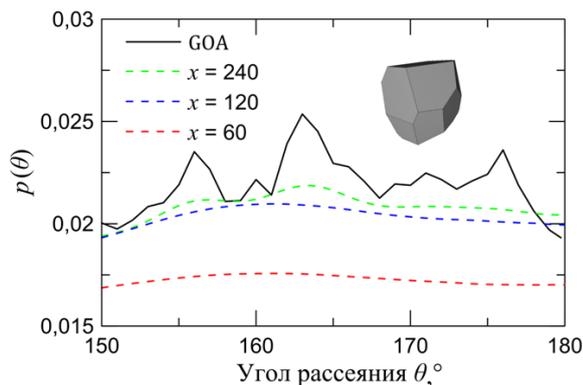


Рисунок 8 – Некогерентная составляющая индикатрисы рассеяния для частицы формы 3 при различных параметрах размера ( $x = 60, 120$  и  $240$ ). Черная линия соответствует приближению геометрической оптики.

Рассеянное поле, разделенное на некогерентную (дифракционную) и когерентную составляющие, показало принципиальное отличие между гексагональными кристаллами и выпуклыми частицами случайной формы. В случае, когда частица имеет случайную форму, когерентная составляющая формирует когерентный пик обратного рассеяния, в то время как в некогерентной компоненте рассеянного света у таких частиц отсутствуют пики обратного рассеяния (см. рисунок 7). Если частица имеет двугранные углы  $90^\circ$  между любыми гранями, некогерентная составляющая также создает дополнительный некогерентный пик обратного рассеяния (см. рисунок 9), вследствие эффекта уголкового отражения (дифракционный пик).

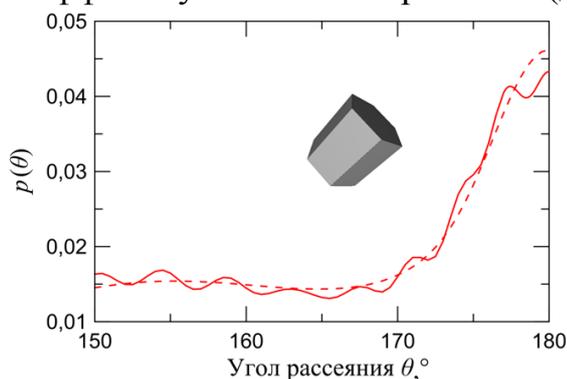


Рисунок 9 – Полная (сплошная) индикатриса рассеяния и ее некогерентная составляющая (пунктирная) для гексагонального ледяного столбика.

Таким образом, во 2-й и 3-й главах были получены решения задачи рассеяния света для несферических частиц перистых облаков, что является необходимым для интерпретации лидарного сигнала. Однако существуют случаи, когда в облаке помимо кристаллов могут содержаться и капли воды (например, высоко-кучевые и высоко-слоистые облака). Поэтому с точки зрения практического применения удобно дополнить существующий банк данных также решением задачи рассеяния света на сферических частицах.

**Четвертая глава** посвящена практическому приложению полученных диссертантом теоретических результатов и основана на публикациях [А7, А9]. В ней рассмотрены перспективы совместного использования лидара и радара для исследования микрофизических характеристик перистых облаков.

Несмотря на отсутствие теоретического решения, эксперименты по совместному зондированию перистой облачности лидаром и радаром проводятся уже около 30 лет. Начиная с работы [21], в которой описывалась теория, согласно которой при совместном использовании лидара и радара можно восстанавливать эффективный размер частицы. В рамках этой работы предлагалось строить соотношение радар-лидар либо в виде

$$\gamma_t = \frac{\sigma_{radar}}{\sigma_{lidar}},$$

либо в виде

$$\gamma_o = \frac{\eta_{radar}}{4\pi\beta_{lidar}},$$

где  $\sigma_{radar(lidar)}$  – дифференциальное сечение рассеяния радара (лидара),  $\beta_{lidar}$  – коэффициент обратного рассеяния лидара,  $\eta_{radar}$  – коэффициент отражения радара.

Однако в связи с недостаточной развитостью численных методов, рассеяние на частицах перистой облачности моделировалось в рамках теории рассеяния на сферах, что не является корректным, т.к. в основном в перистой облачности наблюдаются несферические частицы, ориентация и форма которых оказывает существенное влияние на рассеяние света. Несмотря на данный недочет, такой подход получил широкую известность для интерпретации экспериментальных данных.

В настоящий момент, после того как банк данных матриц обратного рассеяния света ИОА СО РАН [20] был дополнен решением для искаженных частиц и частиц случайной формы, появилась уникальная возможность корректно решить данную задачу.

Таким образом, четвертая глава диссертации посвящена заполнению сложившегося исторического пробела, а именно расчету отношения радарного сигнала к лидарному с учетом формы частиц и их пространственной ориентации. Для этого диссертантом была дополнительно решена задача отражения радарного сигнала от частиц перистых облаков. Также была решена задача рассеяния лазерного излучения на сферических частицах, для того чтобы оценить влияние формы и ориентации ледяных кристаллических частиц.

Как известно, задача рассеяния света на сферических частицах имеет точное аналитическое решение Г. Ми [22]. При условиях слабого

поглощения в данном решении содержатся существенные осцилляции в направлении рассеяния назад [23].

В диссертации указанные осцилляции сглажены методом скользящего среднего. Полученное гладкое решение (см. рисунок 10) удается легко усреднять по распределению частиц по размерам. Решение получено для длин волн и показателей преломления, представленных в таблице 1, и находится в свободном доступе в банке данных ИОА СО РАН [20].

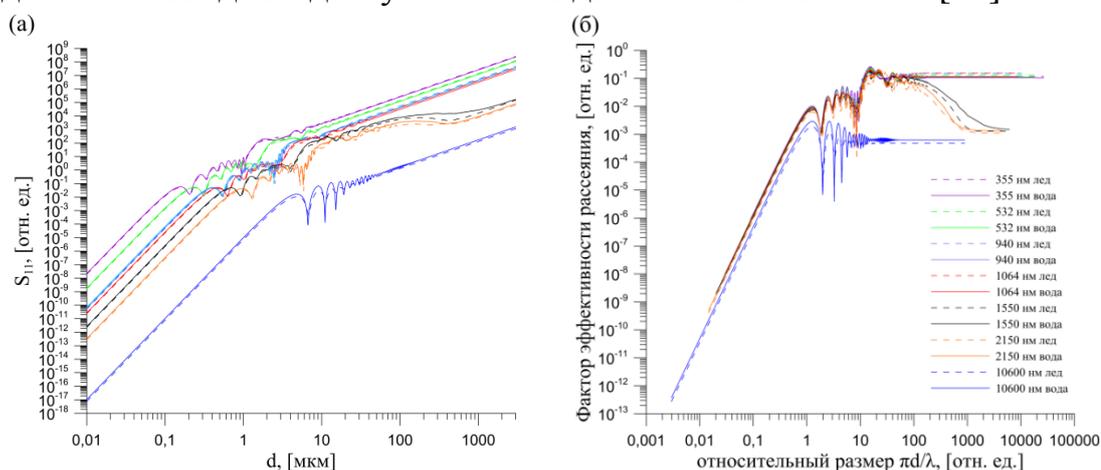


Рисунок 10 – Решение задачи рассеяния света для сферических частиц льда и воды для 8 лидарных длин волн, имеющих в банке данных: а) элемент  $S_{11}$  матрицы Мюллера; б) фактор эффективности рассеяния ( $M_{11}/\pi r^2$ ).

Таблица 1 – Показатели преломления для льда и воды

Длина волны $\lambda$ , мкм	Вода		Лед	
	n	k	n	k
0,355	1,3497	$2,42 \cdot 10^{-9}$	1,3249	$2 \cdot 10^{-11}$
0,532	1,3363	$1,82 \cdot 10^{-9}$	1,3116	$1,49 \cdot 10^{-9}$
0,905	1,3278	$5,12 \cdot 10^{-7}$	1,3031	$4,32 \cdot 10^{-7}$
0,940	1,3272	$2,20 \cdot 10^{-6}$	1,3025	$5,53 \cdot 10^{-7}$
1,064	1,3253	$1,28 \cdot 10^{-6}$	1,3004	$1,90 \cdot 10^{-6}$
1,55	1,3161	$1,34 \cdot 10^{-4}$	1,2893	$4,24 \cdot 10^{-4}$
2,15	1,2985	$4,03 \cdot 10^{-4}$	1,2663	$4,92 \cdot 10^{-4}$
10,6	1,1786	$7,23 \cdot 10^{-2}$	1,1031	$12,45 \cdot 10^{-2}$

Соискателем показано, что для крупных сферических частиц на длинах волн до 1 мкм решение существенно отличается от решения для длины волны 1,55 мкм. Этот факт объясняется сильным влиянием поглощения на длинах волн больше 1 мкм.

Для построения отношения радарного сигнала к лидарному необходимо было рассчитать отражение радарного сигнала от кристаллов перистых облаков. Решение было получено диссертантом с использованием метода дискретных диполей, разработанного М. Юркиным [24] и

представлено в виде банка данных матриц обратного рассеяния микроволнового излучения от кристаллических частиц перистых облаков для частот 35 и 94 ГГц. Пример решения приведен на рисунке 11.

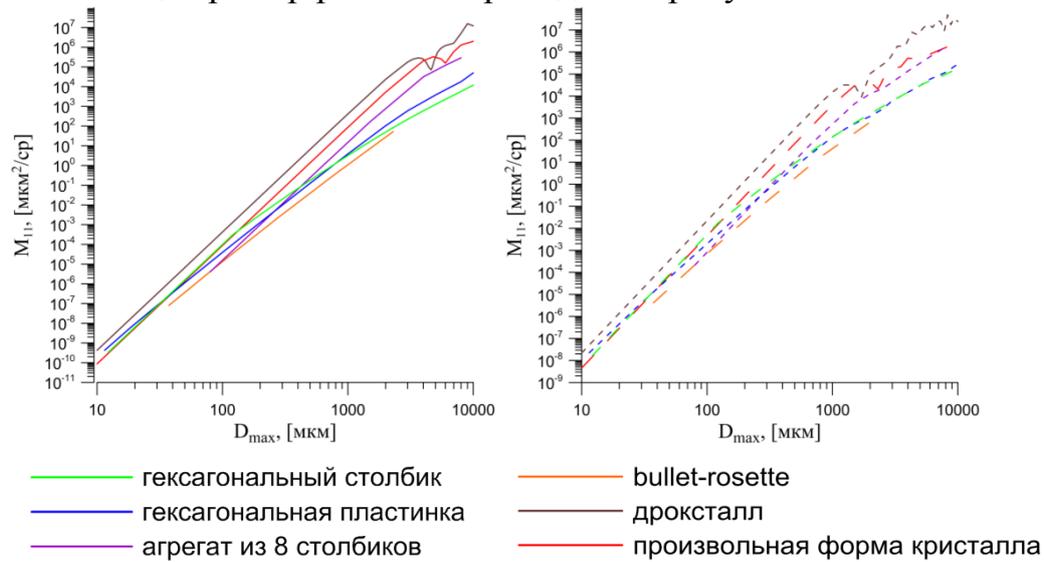


Рисунок 11 – Элемент матрицы рассеяния  $M_{11}$ , построенный в зависимости от максимального размера  $D_{\max}$  частицы. Длина волны радара 8565 мкм (слева) и 3189 мкм (справа).

Построенный банк данных позволил рассчитать отношение радарного сигнала к лидарному в виде:

$$\chi = \frac{\beta^r}{\beta^l} = \frac{c\sigma^r}{c\sigma^l} = \frac{\sigma^r}{\sigma^l},$$

где  $\beta^{r,l}$  – коэффициент обратного рассеяния, верхние индексы ( $r, l$ ) соответствуют радарным и лидарным измерениям,  $c$  – концентрация частиц в облаке,  $\sigma$  – дифференциальное сечение рассеяния одного кристалла в направлении назад, которое усредняется по статистическому ансамблю кристаллов в облаке.

В качестве универсального параметра размера несферических частиц использовался эквивалентный радиус  $R_{eq}$ , т.е. радиус сферической частицы того же объема. Полученное решение демонстрирует (см. рисунок 12), что определение размера через  $R_{eq}$  является предпочтительным при восстановлении модального размера из отношения радарного сигнала к лидарному.

Таким образом, в случае, если форма кристаллов в перистом облаке заранее известна, то несложно численно рассчитать отношение радар-лидар  $\chi(R_{mod})$  для этой модели. Затем по экспериментально измеренной величине отношения радар-лидар и численно рассчитанной функции  $\chi(R_{mod})$  можно оценивать искомый модальный размер. Однако на практике форма частиц в облаке заранее неизвестна. В этом случае при заданной экспериментально измеренной величине отношения радар-лидар из рисунка 12 можно получить интервал возможных значений модального размера частиц в облаке. Тогда

минимальное и максимальное значения модального размера будут соответствовать случаю частиц произвольной формы и гексагональных столбиков соответственно.

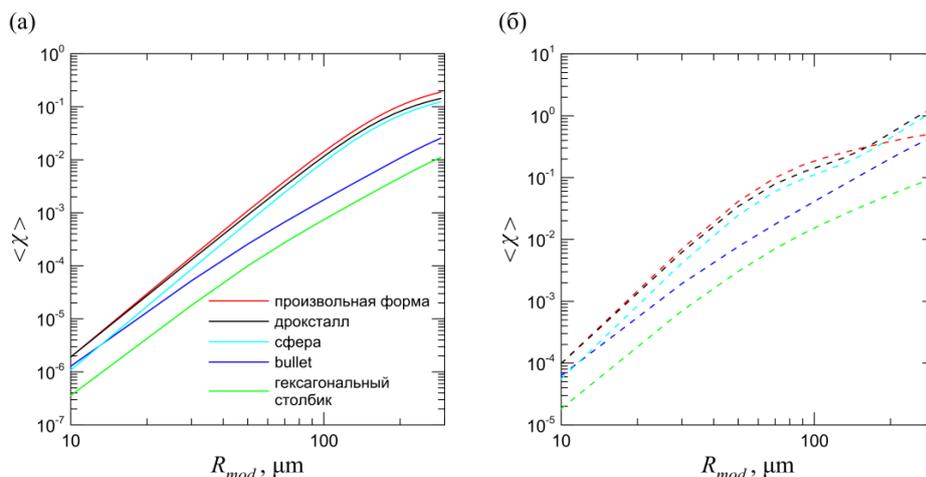


Рисунок 12 – Отношение радар-лидар, усредненное по ансамблю хаотически ориентированных ледяных кристаллов в зависимости от модального размера для длин волн радара: *а)* 8565 мкм (35 ГГц); *б)* 3189 мкм (94 ГГц). Длина волны лидара 0,532 мкм.

Диссертантом установлено, что лидарное линейное деполяризационное отношение для представленных форм кристалла слабо зависит от его размера, практически можно считать их константами. Поэтому данные отношения являются наиболее эффективной характеристикой для оценивания формы кристаллов перистых облаков (см. рисунок 13), в то время как деполяризационное отношение радара демонстрирует сложную зависимость как от формы, так и от размера кристалла (см. рисунок 14). Кроме того, величины деполяризационного отношения радара малы, что является дополнительным препятствием для их использования при восстановлении микрофизики.

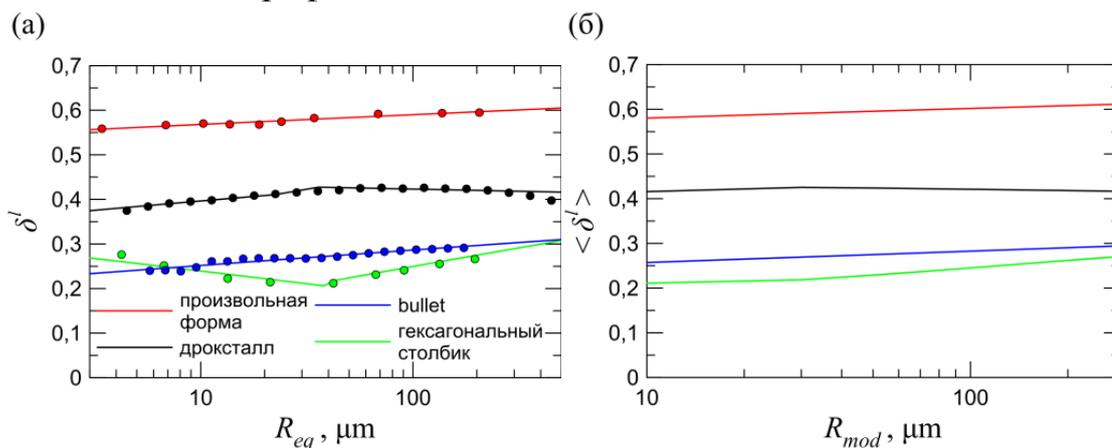


Рисунок 13 – Деполяризационное отношение лидара для различных форм кристалла в зависимости от: *а)* эквивалентного радиуса; *б)* модального размера. Длина волны лидара 0,532 мкм.

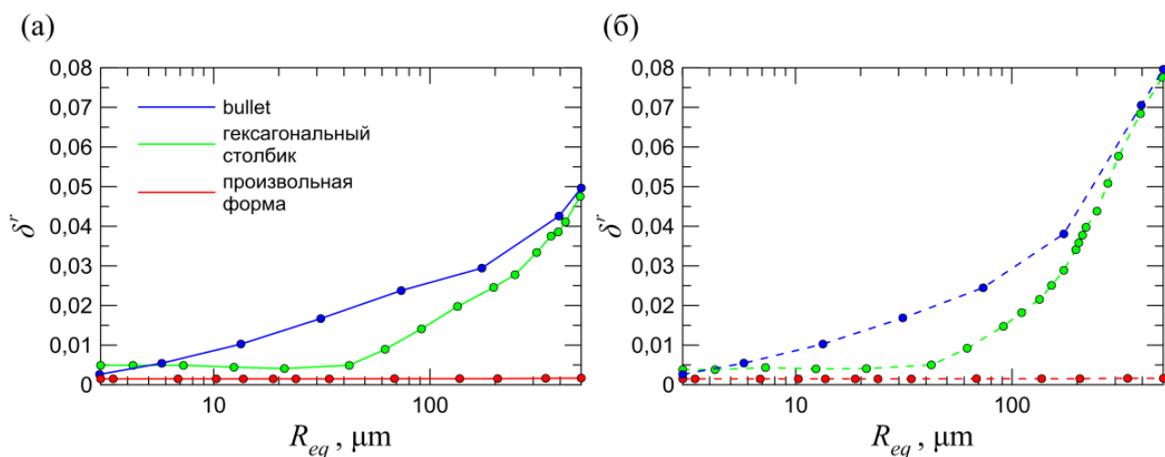


Рисунок 14 – Деполаризационное отношение радара для различных форм кристалла в зависимости от эквивалентного радиуса для длин волн радара:  
*а)* 8565 мкм (35 ГГц); *б)* 3189 мкм (94 ГГц).

Таким образом, в рамках приближения физической оптики и метода дискретных диполей впервые было однозначно получено отношение радар-лидар для адекватной модели размеров и форм ледяных кристаллов перистого облака. Показано, что именно отношение радар-лидар является наиболее информативным для создания алгоритмов восстановления размеров кристаллов, независимо от их формы. В свою очередь, деполаризационное отношение лидара является наиболее эффективным для восстановления формы кристаллов перистых облаков. Полученные факты являются полезными для интерпретации данных, полученных при совместном использовании радара и лидара.

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

1. Диссертантом впервые в мире исследовано влияние искажения формы идеальных гексагональных частиц на пик обратного рассеяния света. Полученное им решение для деформированных гексагональных столбиков и пластинок дополняет имеющийся в ИОА СО РАН банк данных матриц обратного рассеяния света [20].

2. Диссертантом показано, что предварительная оценка в рамках приближения геометрической оптики энергетического вклада оптических траекторий позволяет выбрать для расчета ограниченный список оптических пучков, что приводит к значительному ускорению получения решения в рамках приближения физической оптики. Обнаружено, что даже при небольшой деформации ледяного кристалла список траекторий существенно меняется, и, как следствие, требуется проведение новой оценки.

3. Получены оценочные формулы для интервалов разбиения расчетной сетки, позволяющие реализовать переменный шаг по углу наклона гексагонального столбика  $\beta$ , что позволяет существенно сократить время расчета.

4. Установлена природа пика обратного рассеяния, характерного для идеальных гексагональных кристаллов. Показано, что данный пик вызван дифракционным уширением геометрооптической сингулярности в направлении рассеяния назад и даже при незначительном искажении формы кристалла наблюдается значительное ослабление пика вплоть до полного его исчезновения.

5. Показано, что у гексагональных ледяных столбиков наблюдается эффект роста деполяризационного отношения при небольших углах искажения формы кристалла, в то время как у гексагональных пластинок данный эффект отсутствует.

6. Диссертантом впервые решена задача рассеяния света на крупных (при параметрах размера  $x > 100$ ) случайно ориентированных несферических частицах с плоскими гранями в рамках приближения как геометрической, так и физической оптик.

7. В приближении геометрической оптики установлено, что индикатрисы рассеяния для крупных частиц неправильной формы представляют собой сложные функции с множеством пиков и провалов с различным местоположением и шириной. Однако после усреднения по форме частиц эти пики и провалы сглаживаются в окрестности направления рассеяния назад ( $\theta \rightarrow 180^\circ$ ), и, как результат, усредненная индикатриса рассеяния не имеет в приближении геометрической оптики пиков в обратном рассеянии.

8. Диссертантом впервые показано, что в приближении физической оптики свет, рассеянный одной крупной частицей сложной формы, может быть разделен на две качественно разные части: когерентную и некогерентную. Такое деление ранее использовалось только для многократно рассеивающих сред. Для моделей частиц произвольной формы когерентная составляющая создает когерентный пик обратного рассеяния с угловой шириной  $\Delta\theta \approx \lambda/a$  (где  $a$  – максимальное расстояние между двумя взаимными пучками), в то время как в некогерентной компоненте отсутствуют пики обратного рассеяния. Также показано, что в приближении физической оптики некогерентная часть приближается к решению, полученному в рамках геометрической оптики при  $x \rightarrow \infty$ .

9. Показано, что, если частица имеет двугранные углы  $90^\circ$  между любыми гранями, некогерентная составляющая также создает некогерентный пик обратного рассеяния вследствие эффекта уголкового отражения (дифракционный пик). Угловая ширина некогерентного пика обратного рассеяния равна длине волны, деленной на поперечный размер плоскопараллельных пучков обратного рассеяния.

10. Диссертантом впервые получено решение задачи рассеяния света на сферических частицах, свободное от высокочастотных осцилляций.

Полученное решение позволяет строить эффективные алгоритмы интерпретации лидарных данных для прикладных задач. При этом погрешность такого решения для характерных для атмосферных условий распределений частиц по размерам не превышает 1,5%, что более чем достаточно для практического применения.

11. Рассчитан банк данных матриц обратного рассеяния микроволнового излучения для ледяных частиц, характерных для перистых облаков для частот 35 и 94 ГГц.

12. Диссертантом впервые в мире было получено отношение радар-лидар в рамках приближения физической оптики и метода дискретных диполей, а также была показана возможность оценивания размеров кристаллов независимо от их формы.

13. Установлено, что деполяризационное отношение лидара является наиболее эффективной характеристикой для оценивания формы кристаллов перистых облаков.

14. Построенные банк данных матриц обратного рассеяния света и отношения радар-лидар представляют собой большую практическую ценность для интерпретации радарных и лидарных данных.

## **ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

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

А1. Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Боровой А.Г. Методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад методом физической оптики для лидара с зенитным сканированием // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 1. С. 40–50.

А2. Wang Z., Шишко В.А., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Боровой А.Г., Матвиенко Г.Г., Xie C., Liu D., Wang Y. Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго-восточном Китае (г. Хефэй) // Оптика атмосферы и океана. 2016. Т. 29, № 12. С. 1050–1052.

А3. Кустова Н.В., Коношонкин А.В., Тимофеев Д.Н., Шишко В.А. Матрица экстинкции атмосферных ледяных кристаллов при их преимущественной пространственной ориентации для видимого и ИК диапазонов. // Оптика атмосферы и океана. 2018. Т. 31, № 12. С. 948–954.

А4. Шишко В.А., Брюханов И.Д., Ни Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В. Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 03. С. 186–192.

А5. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А., Кустова Н.В., Ни Е.В., Коношонкин А.В., Локтюшин О.Ю., Тимофеев Д.Н. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 03. С. 193–201.

А6. Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Шишко В.А., Боровой А.Г. Оценка влияния поглощения на рассеяние света на атмосферных ледяных частицах

для длин волн, характерных для задач лазерного зондирования атмосферы. // Оптика атмосферы и океана. 2019. Т. 32, № 05. С. 381–385.

A7. Шишко В.А., Коношонкин А.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н. Рассеяние света на сферических частицах для прикладных задач лидарного зондирования // Оптика атмосферы и океана. 2020. Т. 33, № 07. С. 522–528.

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

A8. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N., Borovoi A.G. Coherent and incoherent backscattering by a single large particle of irregular shape // Opt. Express. 2019. V. 27 (23). P. 32984–32993.

A9. Shishko V.A., Konoshonkin A.V., Kustova N.V., Timofeev D.N. Light scattering by spherical particles for data interpretation of mobile lidars // Opt. Eng. 2020. V. 59(8), (083103).

**Список цитируемой литературы**

1. Liou K.N. Influence of cirrus clouds on the weather and climate process: a global perspective // Mon. Weather Rev. 1986. V. 114. P. 1167–1199.

2. Intergovernmental Panel on Climate, Change. Climatechange 2007 – the physical science basis: contribution of working group I to the fourth. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

3. Aerosol Robotic Network (AERONET) Homepage [Электронный ресурс]. URL: <https://aeronet.gsfc.nasa.gov> (дата обращения 20 марта 2020).

4. Riedi J., Marchant B., Platnick S., Baum B., Thieuleux F., Oudard C., Parol F., Nicolas J.-M., Dubuisson P. Cloud thermodynamic phase inferred from merged POLDER and MODIS data // Atmos. Chem. Phys. Discuss. 2007. V. 7. P. 4103–4137.

5. Key J., Intrieri J. Cloud particle phase determination with the AVHRR // J. Appl. Meteorol. 2000. V. 39. P. 1797–1805.

6. Балин Ю.С., Кауль Б.В., Коханенко Г.П. Наблюдение зеркально отражающих частиц и слоев в кристаллических облаках // Оптика атмосферы и океана. 2012. Т. 25, N 4. С. 293–299.

7. 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, N 5. С. 403–411.

8. Sassen K., Zhu J., Benson S. Midlatitude cirrus cloud climatology from the facility for atmospheric remote sensing. IV. Optical displays // Appl. Opt. 2003. V. 42. P. 332–341.

9. Hayman M., Spuler S., Morley B. Polarization lidar observations of backscatter phase matrices from oriented ice crystals and rain // Opt. Express. 2014. V. 22. P. 16976–16990.

10. Reichardt J., Wandinger U., Klein V., Mattis I., Hilber B., Begbie R. RAMSES: German Meteorological Service autonomous Raman lidar for water vapor, temperature, aerosol, and cloud measurements // Appl. Opt. 2012. V. 51. P. 8111–8131.

11. del Guasta M., Vallar E., Riviere O., Castagnoli F., Venturi V., Morandi M. Use of polarimetric lidar for the study of oriented ice plates in clouds // Appl. Opt. 2006. V. 45. P. 4878–4887.

12. Haeffelin M., Barthès L., Bock O., Boitel C., Bony S., Bouniol D., Chepfer H., Chiriaco M., Cuesta J., Delanoë J., Drobinski P., Dufresne J.-L., Flamant C., Grall M., Hodzic A., Hourdin F., Lapouge F., Lemaître Y., Mathieu A., Noël V. SARTA, a ground-based atmospheric observatory for cloud and aerosol research // *Ann. Geophys.* 2005. V. 23. P. 253–275.
13. 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, No. 3. P. 209–215.
14. 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. P. D22209.
15. Попов А.А., Шефер О.В. Аналитическое выражение коэффициента ослабления излучения кристаллами в виде пластинок // *Оптика атмосферы.* 1989. Т. 2, № 5. С. 532–536.
16. Ravey J.-C., Mazon P. Light scattering in the physical optics approximation: application to large spheroids // *J. Opt. (Paris).* 1982. V. 13, № 5. P. 273–282.
17. Mazon P., Muller S. Light scattering by ellipsoids in a physical optics approximation // *Applied Optics.* 1996. V. 35, № 19. P. 3726–3735.
18. Шишко В.А., Брюханов И.Д., Ни Е.В., Кустова Н.В., Тимофеев Д.Н., Коношонкин А.В. Алгоритм интерпретации матриц обратного рассеяния света перистых облаков для восстановления их микрофизических параметров // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 3. С. 186–192.
19. Самохвалов И.В., Брюханов И.Д., Шишко В.А., Кустова Н.В., Ни Е.В., Коношонкин А.В., Локтюшин О.Ю., Тимофеев Д.Н. Оценка микрофизических характеристик конденсационных следов самолетов по данным поляризационного лидара: теория и эксперимент // *Оптика атмосферы и океана.* 2019. Т. 32, № 3. С. 193–201.
20. Банк данных матриц обратного рассеяния света, [Электронный ресурс]. URL: <ftp://ftp.iao.ru/pub/GWDT/> (дата обращения 17 июня 2020).
21. Intrieri J.M., Stephens G.L., Eberhard W.L., Uttal T. A method for determining cirrus cloud particle sizes using lidar and radar backscatter technique // *Journ. Appl. Meteorol.* 1993. V. 32. P. 1074–1082.
22. Mie G. Beiträge zur Optik trüber Medien, speziell kolloidaler Metallösungen // *Ann. Phys.* 1908. V. 25. P. 377–445.
23. Борен К., Хафман Д. Поглощение и рассеяние света малыми частицами / Пер. с англ. М.: Мир, 1986. 660 с.
24. Yurkin M.A., Maltsev V.P., Hoekstra A.G. The discrete dipole approximation for simulation of light scattering by particles much larger than the wavelength // *J. Quant. Spectrosc. Radiat. Transfer.* 2007. V. 106. P. 546–557.