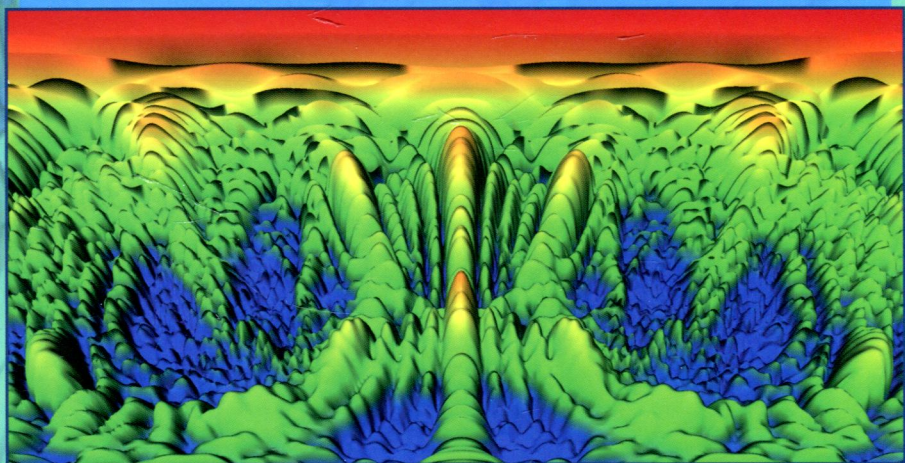


**РАССЕЯНИЕ СВЕТА
НА АТМОСФЕРНЫХ
ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛАХ
В ПРИБЛИЖЕНИИ
ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**



**РАССЕЯНИЕ СВЕТА
НА АТМОСФЕРНЫХ
ЛЕДЯНЫХ КРИСТАЛЛАХ
В ПРИБЛИЖЕНИИ
ФИЗИЧЕСКОЙ ОПТИКИ**



МОСКВА
ФИЗМАТЛИТ®
2022

УДК 535.4; 535.42
ББК 22.343
Р 24



Издание осуществлено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований по проекту 21-15-00029, не подлежит продаже

Авторский коллектив:

Коношонкин А.В., Боровой А.Г., Кустова Н.В., Шишко В.А.,
Тимофеев Д.Н.

Рассеяние света на атмосферных ледяных кристаллах в приближении физической оптики. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2022. — 384 с. — ISBN 978-5-9221-1927-6.

В монографии изложены вопросы рассеяния света на крупных атмосферных ледяных частицах в рамках приближений геометрической и физической оптики. Авторами впервые в отечественной и мировой литературе строго сформулирован метод физической оптики исходя из уравнений Максвелла. Представлено подробное исследование достоверности данного метода и границ его применимости. Изложена методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллических частицах перистых облаков применительно к задачам лазерного зондирования атмосферы и решения уравнений переноса излучения. Наиболее полно освещены вопросы построения оптической модели атмосферных ледяных частиц как идеальной, так и сложной формы.

Приводятся примеры практического использования построенной оптической модели для обнаружения слоев квазигоризонтально ориентированных кристаллических частиц, а также для определения их характеристик по данным лазерного зондирования атмосферы. Получены оптические модели слоев квазигоризонтально ориентированных кристаллических частиц для задач переноса излучения в атмосфере и моделирования климата.

Монография предназначена специалистам в области решения задачи рассеяния света на крупных несферических частицах, а также студентам и аспирантам, обучающимся по специальностям «оптика» и «физика атмосферы и гидросферы».

© ФИЗМАТЛИТ, 2022

ISBN 978-5-9221-1927-6

© Коллектив авторов, 2022

ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение	6
Глава 1. Приближение физической оптики в задаче рассеяния света на частицах, больших длины волны	12
1.1. Интегральное уравнение для рассеянного поля	13
1.2. Рассеянное поле	17
1.3. Рассеянное поле в дальней зоне. Три дифракционные формулы	20
1.4. Алгоритм трассировки пучков	25
1.5. Аprobация алгоритма трассировки пучков	38
1.6. Теорема взаимности	47
1.6.1. Теорема обратного рассеяния для сопряженных пучков	52
1.6.2. Теорема обратного рассеяния при произвольной ориентации кристалла	56
1.7. Численное сравнение трех дифракционных формул	59
1.8. Сравнение решений, полученных точными численными методами и в приближении физической оптики	71
1.9. Усреднение решения по ориентациям частиц в пространстве	81
Выводы	88
Глава 2. Применение метода физической оптики для решения задачи рассеяния света на атмосферных ледяных кристаллах	91
2.1. Граница применимости приближений геометрической оптики в задачах лазерного зондирования	93
2.2. Когерентное и некогерентное сложение световых пучков при решении задачи рассеяния света в приближении физической оптики	107
2.3. Методика решения задачи рассеяния света на ледяных кристаллах перистых облаков в направлении рассеяния назад в приближении физической оптики	114
Выводы	129
Глава 3. Пик обратного рассеяния для гексагональных ледяных кристаллических частиц	131
3.1. Траектории плоскопараллельных пучков, формирующих пик обратного рассеяния	131
3.2. Аналитическое описание пика обратного рассеяния	137
3.3. Дифракция и интерференция	141
Выводы	145

Глава 4. Оптические явления в атмосфере, вызванные ледяными кристаллами	146
4.1. Метод теневых функций в ореольном рассеянии	147
4.1.1. Теневая функция для тенеобразующего пучка	148
4.1.2. Теневые функции для прошедших пучков	159
4.2. Зеркальное рассеяние ледяными кристаллами с преимущественной ориентацией	162
4.2.1. Диффузная и зеркально отраженная компоненты рассеянного излучения	163
4.2.2. Индикатриса рассеяния пластинки с флаттером	164
4.2.3. Световые столбы, образованные солнечным излучением и наземными источниками	173
Выводы	178
Глава 5. Численное решение задачи рассеяния света на ледяных кристаллах в окрестности направления рассеяния назад	180
5.1. Усреднение по ориентациям	181
5.2. Модели физических параметров кристаллов в перистых облаках	184
5.3. Влияние вариаций размеров кристаллов на усредненную матрицу Мюллера	185
5.4. Оценка вклада различных траекторий в окрестности направления рассеяния назад	187
5.5. Численное решение задачи рассеяния на хаотически ориентированных кристаллах	191
5.5.1. Траектории, существенные для направления рассеяния назад	191
5.5.2. Решение задачи рассеяния света на хаотически ориентированных гексагональных столбиках	194
5.6. Рассеяние света на ледяных кристаллах, ориентированных преимущественно в горизонтальной плоскости	200
5.6.1. Матрица обратного рассеяния для наклонного или сканирующего лидаров	201
5.6.2. Микрофизическая модель для гексагональных ледяных пластинок	204
5.6.3. Зеркальная и уголковая компоненты рассеянного света	205
5.6.4. Банк данных матриц обратного рассеяния для наклонных лидаров	208
5.7. Сопоставление с экспериментальными данными	215
Выводы	217
Глава 6. Оптическая модель кристаллических частиц перистых облаков в зависимости от пространственной ориентации кристаллов для задач лазерного зондирования	218
6.1. Оптические свойства хаотически ориентированных ледяных гексагональных кристаллов	219
6.2. Оптическая модель хаотически ориентированных ледяных кристаллов	228
6.3. Оптическая модель квазигоризонтально ориентированных гексагональных ледяных столбиков и пластинок	237

6.4. Исследование оптических свойств перистых облаков в случае пре- имущественной азимутальной ориентации кристаллов	252
Выводы	281
Глава 7. Оптическая модель атмосферных кристаллических ча- стиц неидеальной формы для задач лазерного зондирования . . .	282
7.1. Влияние деформации ледяных кристаллов на их оптические харак- теристики	284
7.2. Оптическая модель деформированных атмосферных ледяных стол- биков	297
7.3. Влияние деформации формы гексагонального кристалла на оптиче- ские характеристики при квазигоризонтальной ориентации	309
Выводы	312
Глава 8. Приложения к задачам лазерного зондирования	314
8.1. Моделирование сигнала сканирующего лидара от облака квазиго- ризонтально ориентированных ледяных кристаллов	315
8.2. Исследование перистых облаков поляризационным лидаром в юго- восточном Китае (г. Хефей)	324
8.3. Восстановление доли ориентированных атмосферных кристаллов при совместных измерениях вертикально и наклонно ориентирован- ными лидарами	327
Выводы	335
Заключение	336
Список литературы	339