

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 09.03.01. Информатика и вычислительная техника  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение информационных технологий

### БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА

Тема работы
Параметризация микрофизических свойств кристаллического облака для расчета ослабления лучистой энергии

УДК 004.832.2:548.0:535.23

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В6Б	Сергиенко Александр Романович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Шефер О.В.	д.ф.-м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Матвиенко В.В.			

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Погребной А.В.	к.т.н.		

## ПЛАНИРУЕМЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ОБУЧЕНИЯ ПО ООП

Код результатов	Результат обучения (выпускник должен быть готов)	Требования ФГОС, критерии АИОР
<b>Профессиональные компетенции</b>		
Р1	Применять базовые и специальные естественнонаучные и математические знания в области информатики и вычислительной техники, достаточные для комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-7, ОПК-5, ПК-3), критерий 5 АИОР (п. 1.1) 06.019, специалист по технической документации в области информационных технологий; 06.027, Специалист по администрированию сетевых устройств информационно-коммуникационных систем
Р2	Применять базовые и специальные знания в области современных информационных технологий для решения инженерных задач.	Требования ФГОС (ОК-7, ОК-9, ОПК-2, 5, ПК-1, 3), критерий 5 АИОР (п.1.1, 1.2) 06.001, программист; 06.003, архитектор программного обеспечения.
Р3	Ставить и решать задачи комплексного анализа, связанные с созданием аппаратно-программных средств информационных и автоматизированных систем, с использованием базовых и специальных знаний, современных аналитических методов и моделей.	Требования ФГОС (ОК-6, ОПК-1, ПК-2, 4, ПК-6), критерий 5 АИОР (п. 1.2) Профессиональные стандарты (код, название): 06.001, программист; 06.028, Системный программист; 06.027, Специалист по администрированию сетевых устройств информационно-коммуникационных систем
Р4	Разрабатывать программные и аппаратные средства (системы, устройства, блоки, программы, базы данных и т. п.) в соответствии с техническим заданием и с использованием средств автоматизации проектирования.	Требования ФГОС (ОК-7, ОПК-2, 4, ПК- 1, 2, ПК-6), критерий 5 АИОР (п. 1.3) Профессиональные стандарты (код, название): 06.001, программист; 06.028, Системный программист; 06.027, Специалист по администрированию сетевых устройств информационно-коммуникационных систем
Р5	Проводить теоретические и экспериментальные исследования, включающие поиск и изучение необходимой научно-технической информации, математическое моделирование, проведение эксперимента, анализ и интерпретация полученных данных, в области создания аппаратных и программных средств информационных и автоматизированных систем.	Требования ФГОС (ОК-5, ОПК-5, ПК-1, 2, 3), критерий 5 АИОР (п.1.4) Профессиональные стандарты (код, название): 06.001, программист; 06.028, Системный программист; 06.027, Специалист по администрированию сетевых устройств информационно-коммуникационных систем
Р6	Внедрять, эксплуатировать и обслуживать современные программно-аппаратные комплексы, обеспечивать их высокую эффективность, соблюдать правила охраны здоровья, безопасность труда, выполнять требования по защите окружающей среды.	Требования ФГОС (ОК-8, 9, ОПК-1, 2, 4, ПК-3, 4, 5, ПК-6), критерий 5 АИОР (п. 1.5) Профессиональные стандарты (код, название): 06.001, программист; 06.003, архитектор программного обеспечения.
<b>Универсальные компетенции</b>		
Р7	Использовать базовые и специальные знания в области проектного менеджмента для ведения комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-3, ОПК-3, 5), критерий 5 АИОР (п. 2.1) Профессиональные стандарты (код, название): 06.016, руководитель проектов в области информационных технологий

P8	Владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать и защищать результаты комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-5, 7, ПК-3, 4), критерий 5 АИОР (п. 2.2) Профессиональные стандарты (код, название): 06.019, специалист по технической документации в области информационных технологий
P9	Эффективно работать индивидуально и в качестве члена группы, состоящей из специалистов различных направлений и квалификаций, демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	Требования ФГОС (ОК-2, 3, 6, 7), критерий 5 АИОР (п. 2.3, 2.4) Профессиональные стандарты (код, название): 06.016, руководитель проектов в области информационных технологий
P10	Демонстрировать знания правовых, социальных, экономических и культурных аспектов комплексной инженерной деятельности.	Требования ФГОС (ОК-1, 2, 3, 4, 5), критерий 5 АИОР (п. 2.5)
P11	Демонстрировать способность к самостоятельному обучению в течение всей жизни и непрерывному самосовершенствованию в инженерной профессии.	Требования ФГОС (ОК-5, 7), критерий 5 АИОР (п. 2.6)

**Министерство образования и науки Российской Федерации**  
 федеральное государственное автономное образовательное учреждение  
 высшего образования  
**«НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ  
 ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

---

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки 09.03.01. Информатика и вычислительная техника  
 Отделение школы (НОЦ) Отделение информационных технологий

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Погребной А.В.  
 (Подпись) (Дата) (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ  
 на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Бакалаврская работа (бакалаврской работы, дипломного проекта/работы, магистерской диссертации)
---

Студенту:

Группа	ФИО
8В6Б	Сергиенко Александру Романовичу

Тема работы:

Параметризация микрофизических свойств кристаллического облака для расчета ослабления лучистой энергии	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№140-47/с от 19.05.2020 г.

Срок сдачи студентом выполненной работы:

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

Исходные данные к работе	<ul style="list-style-type: none"> <li>– План работы</li> <li>– Список рекомендуемой литературы</li> <li>– Ряд статей, монографий в электронном варианте</li> <li>– Базы данных</li> </ul>
Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов	<ul style="list-style-type: none"> <li>– Подготовить обзор литературы по указанной теме</li> <li>– Изучить формализм, используемый для разработки параметризованной модели полидисперсной среды применительно к определению ослабления лучистой энергии</li> <li>– Разработать алгоритм для расчета характеристик ослабления в рамках оптической модели, представленной крупными пластинчатыми кристаллами</li> <li>– Разработать программный комплекс для расчета характеристик ослабления оптического излучения системой горизонтально</li> </ul>

	<p>ориентированных пластинок</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>– Провести численный эксперимент по определению характеристик ослабления с различными микрофизическими параметрами среды для ледяных пластинок</li> <li>– Оформить полученные результаты расчета в графическом редакторе</li> <li>– Оформить работу согласно правилам оформления бакалаврской работы</li> <li>– Подготовить и представить доклад к защите бакалаврской работы</li> </ul>
Перечень графического материала	– Презентация
Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы	
Раздел	Консультант
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и энергосбережение	Конотопский В.Ю.
Социальная ответственность	Матвиенко В.В.
Названия разделов, которые должны быть написаны на иностранном языке:	
нет	

Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику	
--	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Шефер О.В.	д.ф.-м.н.		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В6Б	Сергиенко Александр Романович		

**ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА  
«ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И  
РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»**

Студенту:

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>
8В6Б	Сергиенко Александру Романовичу

<b>Школа</b>	<b>ИШИТР</b>	<b>Отделение школы (НОЦ)</b>	<b>ОИТ</b>
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	09.03.01 Информатика и вычислительная техника

**Исходные данные к разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»:**

1. <i>Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Использовать действующие ценники и договорные цены на потребленные материальные и информационные ресурсы, а также указанную в МУ величину тарифа на эл. энергию</i>
2. <i>Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	—
3. <i>Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Действующие ставки единого социального налога и НДС</i>

**Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:**

1. <i>Оценка коммерческого потенциала, перспективности и альтернатив проведения НИ с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения</i>	<i>Оценка готовности полученного результата к выводу на целевые рынки, краткая характеристика этих рынков</i>
2. <i>Планирование и формирование бюджета научных исследований</i>	<i>Построение плана-графика выполнения ВКР, составление соответствующей сметы затрат, расчет величины НДС и цены результата ВКР</i>
3. <i>Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования</i>	<i>Качественная и количественная характеристика экономического и др. видов эффекта от внедрения результата, определение эффективности внедрения</i>

**Перечень графического материала** (с точным указанием обязательных чертежей):

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности технических решений</li> <li>2. Матрица SWOT</li> <li>3. Альтернативы проведения НИ</li> <li>4. График проведения и бюджет НИ - <u>выполнить</u></li> <li>5. Оценка ресурсной, финансовой и экономической эффективности НИ - <u>выполнить</u></li> </ol>
---

<b>Дата выдачи задания для раздела по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал консультант:**

<b>Должность</b>	<b>ФИО</b>	<b>Ученая степень, звание</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
Доцент ОСГН	Конотопский В.Ю.	к.э.н.		27.02.2020 г.

**Задание принял к исполнению студент:**

<b>Группа</b>	<b>ФИО</b>	<b>Подпись</b>	<b>Дата</b>
8В6Б	Сергиенко А.Р.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
8В6Б	Сергиенко Александру Романовичу

Школа	ИШИТР	Отделение школы (НОЦ)	ОИТ
Уровень образования	бакалавриат	Направление/специальность	09.03.01 Информатика и вычислительная техника

### Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:

1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Объект исследования: программа для расчета характеристик оптического излучения. Область применения: физика атмосферы.
--	--

Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:

<b>1. Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности:</b> -специальные (характерные при эксплуатации объекта исследования, проектируемой рабочей зоны) правовые нормы трудового законодательства; -организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны.	– СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы. – ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования
<b>2. Производственная безопасность:</b> 2.1. Анализ выявленных вредных и опасных факторов 2.2. Обоснование мероприятий по снижению воздействия	Вредные и опасные факторы: – Отклонение показателей микроклимата – Механические колебания твердых тел и их поверхностей – Отсутствие или недостаток искусственного освещения – Повышенный уровень электромагнитного излучения – Акустические колебания – Ионизирующее излучение – Психофизиологические нагрузки – Поражение током
<b>3 Экологическая безопасность:</b>	– Электромагнитное загрязнение атмосферы при использовании излучения
<b>4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	Типичная ЧС - пожар в рабочем помещении.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент	Матвиенко В.В.			

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
8В6Б	Сергиенко А.Р.		

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации  
 федеральное государственное автономное  
 образовательное учреждение высшего образования  
 «Национальный исследовательский Томский политехнический университет» (ТПУ)

Школа Инженерная школа информационных технологий и робототехники  
 Направление подготовки (специальность) 09.03.01. Информатика и вычислительная техника

Уровень образования высшее

Отделение школы (НОЦ) Отделение информационных технологий

Период выполнения (весенний семестр 2019/2020 учебного года)

Форма представления работы:

Бакалаврская работа
---------------------

(бакалаврская работа, дипломный проект/работа, магистерская диссертация)

### КАЛЕНДАРНЫЙ РЕЙТИНГ-ПЛАН выполнения выпускной квалификационной работы

Срок сдачи студентом выполненной работы:	
--	--

Дата контроля	Название раздела (модуля) / вид работы (исследования)	Максимальный балл раздела (модуля)
20.04.2020	<i>Обзор литературы по указанной теме</i>	10
30.04.2020	<i>Представление базовых формул для расчета характеристик ослабления в приближении метода физической оптики</i>	5
04.05.2020	<i>Постановка задач</i>	5
08.05.2020	<i>Разработка алгоритма для расчета характеристик ослабления в рамках оптической модели, представленной крупными пластинчатыми кристаллами</i>	20
11.05.2020	<i>Выбор среды программирования</i>	5
14.05.2020	<i>Реализация программного комплекса для расчета характеристик ослабления оптического излучения системой горизонтально ориентированных пластинок</i>	25
22.05.2020	<i>Численное исследование параметризованного представления распределения частиц по размерам</i>	15
28.05.2020	<i>Численное исследование характеристик ослабления оптического излучения системой ледяных пластинок</i>	15

**СОСТАВИЛ:**

**Руководитель ВКР**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Шефер О.В.	д.ф.-м.н.		

**СОГЛАСОВАНО:**

**Руководитель ООП**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОИТ	Погребной А.В.	к.т.н.		

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа 130 с., 66 рис., 15 табл., 40 источников, 3 прил.

Ключевые слова: Оптическое излучение, ледяные пластинки, ориентация, параметризованная модель, ослабление, C++.

Объектом исследования является параметризованная модель полидисперсной среды, с помощью которой производится анализ спектральной зависимости ослабления с различными микрофизическими и оптическими параметрами.

Цель работы – разработка численной параметризованной модели кристаллического облака для исследования особенностей ослабления лучистой энергии. В качестве модели рассмотреть простейшую, но реально существующую в атмосфере полидисперсную среду, где проявляются ярко выраженные особенности экстинкции.

В процессе исследования проводились расчеты для функции плотности распределения частиц по размерам, фактора ослабления и коэффициента ослабления.

В результате исследования в рамках метода физической оптики был реализован комплекс программ для расчета характеристик ослабления при использовании модифицированного гамма-распределения.

Степень внедрения: низкая.

Область применения: физика атмосферы.

Экономическая эффективность/значимость работы: высокая.

В будущем планируется продолжать работу по данной тематике.

## Содержание

Введение.....	14
1 Основные физико-химические свойства облачных кристаллов .....	17
1.2 Формы и размеры облачных кристаллов.....	17
1.2 Концентрация облачных кристаллов .....	24
1.3 Функции распределения облачных кристаллов по размерам .	26
1.4 Ориентация облачных кристаллов .....	30
2 Оценка параметров распределения частиц по размерам .....	37
3 Основы для расчета характеристик ослабления .....	48
3.1 Постановка задачи .....	48
3.2 Формализм для расчета характеристик ослабления.....	50
3.3 Аналитическое выражение для расчета ослабления .....	52
4 Разработка программного комплекса для расчета характеристик ослабления .....	55
4.1 Алгоритм расчета ослабления .....	55
4.2 Особенности разработанной программы.....	58
5 Результаты численных экспериментов .....	60
6 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение.. .....	80
6.1 Потенциальные потребители результатов исследования .....	80
6.2 Анализ конкурентных технических решений.....	81
6.3 SWOT-анализ.....	83
6.4 Организация и планирование работ.....	86
6.4.1 Продолжительность этапов работ.....	87
6.5 Расчёт накопления готовности проекта.....	90

6.6	Расчёт сметы на выполнение проекта.....	91
6.6.1	Расчёт затрат на материалы .....	92
6.6.2	Расчёт заработной платы.....	93
6.6.3	Расчёт затрат на страховые взносы.....	94
6.6.4	Расчёт затрат на электроэнергию .....	95
6.6.5	Расчёт амортизационных расходов.....	96
6.6.6	Расчёт прочих расходов .....	97
6.6.7	Расчёт суммарной себестоимости разработки.....	97
6.6.8	Расчёт прибыли .....	98
6.6.9	Расчёт НДС .....	98
6.6.10	Цена разработки проекта .....	98
6.6.11	Оценка экономической эффективности проекта.....	99
	Вывод по разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»: .....	99
7	Социальная ответственность .....	100
	Введение.....	100
7.1	Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности .....	100
7.1.1	Специальные правовые нормы трудового законодательства	101
7.1.2	Организационные мероприятия при компоновке рабочей зоны .....	101
7.2	Производственная безопасность .....	103
7.2.1	Анализ опасных и вредных производственных факторов ....	104
7.3	Экологическая безопасность .....	109

7.3.1	Анализ влияния объекта исследования на окружающую среду . .....	110
7.3.2	Анализ влияния процесса исследования на окружающую среду .....	110
7.3.3	Обоснование мероприятий по защите окружающей среды ..	111
7.4	Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	111
7.4.1	Анализ вероятных ЧС, которые могут возникнуть при проведении расчета характеристик оптического излучения .....	112
7.4.2	Комплекс мероприятий по предотвращению пожара .....	113
	Выводы по разделу «Социальная ответственность» .....	114
	Заключение .....	116
	Список использованных источников .....	118
	Приложение А .....	122
	Приложение Б .....	129
	Приложение В .....	130

## ВВЕДЕНИЕ

### Актуальность исследований

Кристаллические облака постоянно простираются в атмосфере на 20%–30% покрывая поверхность нашей планеты. Эти облака сильно влияют на климат в глобальном и локальном масштабе. Перистые облака могут привести как к возникновению парникового эффекта, так и обеспечивать выхолаживание атмосферы. В состав ледяных облаков входят разнообразные по формам и размерам кристаллы. Свойства радиационного потока, трансформированного при взаимодействии света с облаками, зависят от микрофизических частиц, в состав которых они входят. В силу сложности численной реализации моделей ледяных облаков для исследования их оптических свойств, процесс взаимодействия оптического излучения с крупными облачными кристаллами слабо изучен [1–3]. Ослабление (или экстинкция) излучения является одной из основных оптических характеристик среды, которую используют при решении различных задач. К таким задачам относятся: изучение распространения света через атмосферные образования, лазерное и пассивное зондирование аэродисперсных сред, изучение радиационного баланса атмосферы.

По результатам экспериментального исследования атмосферных образований установлено, что в состав ледяных облаков, как правило, входят пластинчатые кристаллы. При определенных условиях атмосферы (температура, влажность, давление, активность динамических процессов и др.) облако может состоять по большей части из крупных горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. Особенности ослабления оптического излучения кристаллическим облаком, в состав которого входят крупные преимущественно ориентированные пластинки, в подавляющем большинстве определяются характером прохождения лучистой энергии именно через такие частицы.

Эта работа посвящена численной реализации модели кристаллического облака, представленного системой горизонтально ориентированных крупных пластинок. Модель позволит исследовать особенности спектральной зависимости ослабления с различными микрофизическими и оптическими параметрами. В модели рассматриваются различные параметры распределения частиц по размерам, фактор формы, учитывается взаимосвязь между оптическими свойствами кристаллов, определяющих природу их вещества, и длины волны падающего излучения. Такая модель обеспечивает возможность реализации численного эксперимента, согласованного с соответствующими данными лазерного (и пассивного) зондирования.

**Целью** данной работы является разработка численной параметризованной модели кристаллического облака для исследования особенностей ослабления лучистой энергии. В качестве модели следует рассмотреть простейшую, но реально существующую в атмосфере полидисперсную среду, где проявляются ярко выраженные особенности экстинкции. При этом должна быть возможность реализации алгоритма и разработки комплекса программ для проведения расчетов с использованием приемлемых вычислительных ресурсов

Для этого ставятся и решаются следующие **задачи**:

– Численно сформировать и разработать комплекс программ для расчета характеристик ослабления для отдельного крупного пластинчатого кристалла с возможностью изменять размеры частиц, фактор формы, размерной параметр, значения комплексного показателя преломления, связанный с длиной волны падающего излучения.

– Разработать алгоритм и реализовать программу для рассмотрения различных законов распределения частиц по размерам с их различными параметрами. Провести численное исследование особенностей закона распределения с различными параметрами. В качестве объекта исследования

использовать распределения, согласующееся с экспериментальными данными микрофизических свойств ледяных облаков.

– Сформировать базу данных для расчета значений комплексного показателя преломления ледяных кристаллов, связанного с длиной волны видимого и ИК излучения с высоким разрешением.

– Разработать комплекс программ для расчета интегральных характеристик ослабления применительно к полидисперсной среде.

– Провести численную оценку интегральных характеристик ослабления оптического излучения для полидисперсной среды, представленную горизонтально ориентированными крупными пластинками.

Личный вклад автора:

- Формулы для расчета характеристик ослабления для отдельной частицы приведены к системе выражений в алгоритмической форме, на основе которых разработан соответствующий комплекс программ.

- Разработан алгоритм и реализован программный комплекс для расчета характеристик ослабления для системы частиц.

- На основе литературных данных выделены, разработаны алгоритмы и программно реализованы с последующим численным исследованием законы распределения частиц по размерам, их характеристики.

- Проведено численное исследование характеристик ослабления для системы частиц для видимого и ИК диапазонов длин волн для различных параметров распределения частиц по размерам.

- Результаты численного исследования обработаны в специализированном графическом пакете Origin, который широко используется в научной практике.

- Опубликовано работа: Численная модель для расчета ослабления лучистой энергии горизонтально ориентированными пластинками // Молодежь и современные информационные технологии. – Томск, 2020. – С.123–124.

# 1 ОСНОВНЫЕ ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

## 1.2 ФОРМЫ И РАЗМЕРЫ ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

По внешнему виду атмосферных частиц существует множество классификаций (некоторые из них представлены на рисунках 1.1–1.3). Одна из наиболее полных систематизаций представляет примерно 80 видов [1,2]. Практически все типы кристаллов были обнаружены в кристаллических облаках на высоте от примерно одного до несколько десятков километров.

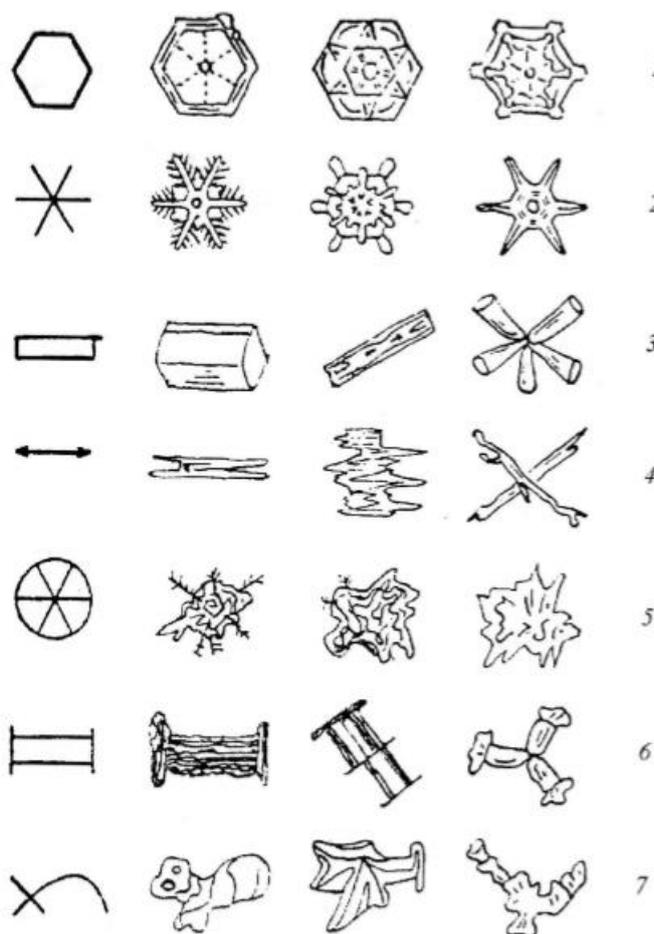


Рисунок 1.1. – Международная классификация форм ледяных кристаллов: 1 – гексагональные пластинки; 2 – звездочки, плоские дендриты; 3 – гексагональные столбики (включая пучки столбиков); 4 – иглы; 5 – пространственные дендриты; 6 – запонки; 7 – кристаллы неправильной формы [2].

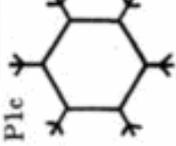
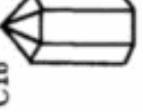
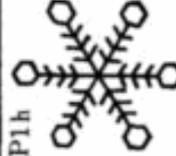
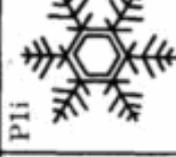
N1a		P1a		CP1a		R1	
N1b		P1b		CP1b		R2	
N2		P1c		P2c		CP1c	
C1a		P1d		P3a		CP2a	
C1b		P1e		P3b		CP2b	
C1c		P1f		P4		CP3	
C2a		P1g		P5a		S	
C2b		P1h		P5b		I1	
		P1i				I2	
						R4b	
						R4c	

Рисунок 1.2 – Классификация ледяных кристаллов по Накая [2]

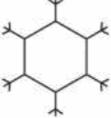
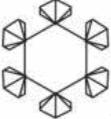
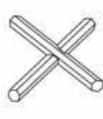
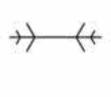
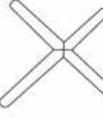
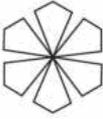
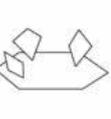
	<b>N1a</b> Простые иглы		<b>C1f</b> Неправильные столбики		<b>P2b</b> Звездчатый кристалл с центроподобными концами
	<b>N1b</b> Группы простых игл		<b>C1g</b> Правильные толстые пластинки		<b>P2c</b> Дендритный кристалл с пластинками на концах
	<b>N1c</b> Простые столбики		<b>C1h</b> Толстые пластинки скелетной формы		<b>P2d</b> Дендритный кристалл с центроподобными концами
	<b>N1d</b> Группа простых столбиков		<b>C1i</b> Спираль		<b>P2e</b> Пластинка с простыми удлинениями
	<b>N1e</b> Вытянутые иглы		<b>C2a</b> Сочетание пулеобразных кристаллов		<b>P2f</b> Пластинка с центроподобными удлинениями
	<b>N2a</b> Сочетание игл		<b>C2b</b> Сочетание столбиков		<b>P2g</b> Пластинка с дендритными удлинениями
	<b>N2b</b> Сочетание столбиков		<b>P1a</b> Гексагональная пластинка		<b>P3a</b> Дважды разветвленный кристалл
	<b>N2c</b> Сочетание правильных вытянутых столбиков		<b>P1b</b> Кристалл с центральным ответвлением		<b>P3b</b> Трижды разветвленный кристалл
	<b>C1a</b> Пирамидальные		<b>P1c</b> Кристалл с широким ответвлением		<b>P3c</b> Четырежды разветвленный кристалл
	<b>C1b</b> Чашеобразные		<b>P1d</b> Звездчатый кристалл		<b>P4a</b> Разветвленный кристалл с 12 широкими разветвлениями
	<b>C1c</b> Однородные пулеобразные кристаллы		<b>P1e</b> Простой дендритный кристалл		<b>P4b</b> Дендритный кристалл с 12 ответвлениями
	<b>C1d</b> Полюе пулеобразные кристаллы		<b>P1f</b> Древоподобный кристалл		<b>P5</b> Бесформенный кристалл
	<b>C1e</b> Правильные столбики		<b>P2a</b> Звездчатый кристалл с пластинками на концах		<b>P6a</b> Пластинка с пространственными пластинками

Рисунок 1.3 – Классификация Магоно и Ли [4]

В настоящее время принято выделять семь основных видов кристаллов: гексагональные пластинки, звездчатые дендриты, пространственные дендриты, гексагональные столбики, иглы, столбцы с наконечником (запонки) и неправильной формы.

Перистые (ледяные кристаллы) облака преимущественно состоят из несферических ледяных кристаллов различной формы и размеров и, как следствие, оказывают существенное влияние на радиационный баланс Земля-атмосфера. Любые изменения их микрофизических характеристик будут иметь существенную обратную связь по изменению климата [5].

Перистые облака холодные и, как таковые, состоят из частиц льда, размеры которых могут варьироваться от 10 мкм до многих тысяч микрон [6]. Синоптически сгенерированные перистые облака, такие как найденные в средних широтах, обычно состоят из слоев ледяных кристаллов, при этом средний размер ледяного кристалла (взвешенный по количеству или массе) увеличивается с глубиной облака, измеряемой относительно вершины облака. Типичный диапазон размеров кристаллов льда, обнаруживаемых в перистых срединных широтах, может варьироваться от около 10 мкм на вершине облака [6] до около 2000–4000 мкм в направлении дна облака [7]. В Арктике размер кристаллов льда может варьироваться в зависимости от типа ледяных кристаллов, например, более сложные кристаллы льда могут варьироваться в размерах от примерно 100 мкм до примерно 1000 мкм [8,9].

При температуре от  $-8$  до  $-25^{\circ}\text{C}$  кристаллы льда растут в виде гексагональных пластин. В диапазоне от  $-12$  до  $-15^{\circ}\text{C}$ , где наблюдается наибольшая скорость роста, также могут образовываться дендритные пластинчатые кристаллы, хотя для этого требуется среда, насыщенная водой. Если пластинчатые кристаллы присутствуют в облаке смешанной фазы, то прикрепление мелких замороженных капель (риминг) будет происходить, когда диаметр кристалла превышает 400 мкм [10].

В таблице 1.1 представлены данные по формированию определенной формы кристаллов в зависимости от температуры.

Таблица 1.1 – Наблюдаемое изменение формы облачных кристаллов при изменении температуры

Температура, К	Форма кристаллов
$\geq 269,5$	Простые гексагональные пластинки (без внутренней структуры)
269,5...269	Сплошные и пустотелые столбики
269...267	Игольчатые столбики (иглы)
267...265	Пустотелые столбики (ножны)
265...263,5	Сплошные и пустотелые столбики
263,5...261	Толстые пластинки (с внутренней структурой и без нее на поверхности призмы)
261...259	Гексагональные пластинки (с внутренней структурой и ответвлениями на ребрах и на базовой поверхности)
259...256	Звездочки, включая разветвленные дендриты разной формы
256...254	Гексагональные пластинки (с внутренней структурой)
254...251	Толстые пластинки (с пустотелой структурой на поверхности призмы)
251...241	Пластинчатые и столбчатые кристаллы (включая неправильные агрегаты столбиков, секторы, пульки и др.)

На рисунке 1.4 иллюстрируются графики, которые показывают изменения абсолютного и относительного пересыщения надо льдом в зависимости от температуры, а также диаграмма, поясняющая образование разных форм кристаллов при разных условиях. Ось ординат на нем демонстрирует разность между давлением пара над поверхностью кристаллов и упругостью насыщения над водой в относительных единицах. Пунктирные кривые представляют пересыщение надо льдом.

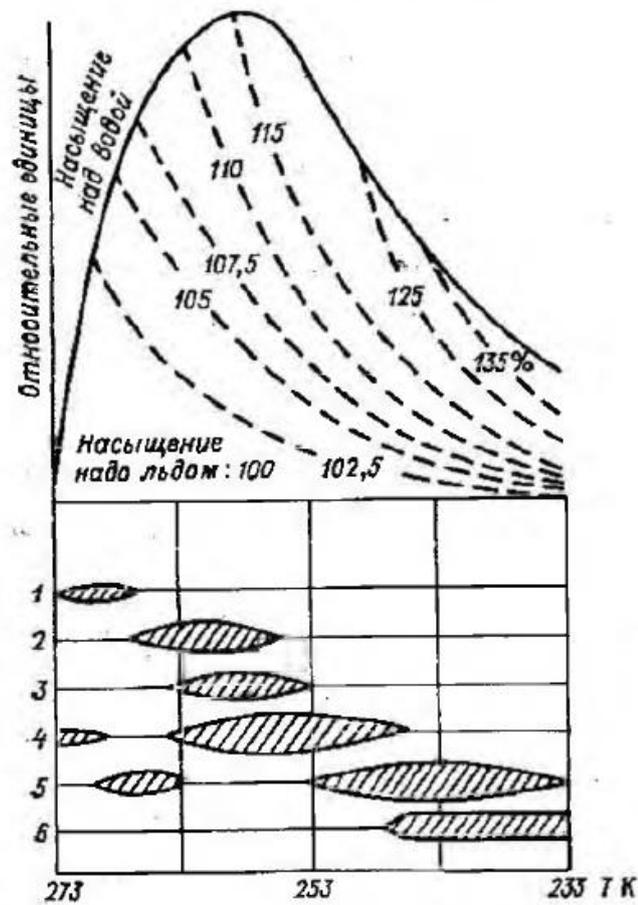


Рисунок 1.4 – Формы ледяных кристаллов в зависимости от температуры и пересыщения над льдом [10]. 1 – иглы; 2 – дендриты; 3 – секторные пластинки; 4 – толстые и тонкие пластинки; 5 – сплошные столбики, одиночные и двойные; 6 – полые столбики, пучки столбиков.

При выращивании кристаллов снега в лаборатории в контролируемых условиях, разные исследователь обнаруживали, что образуются различные типы кристаллов снега, форма которых зависит главным образом от температуры и влажности воздуха. Эта зависимость иллюстрируется "морфологической диаграммой", показанной на рисунке 1.5.

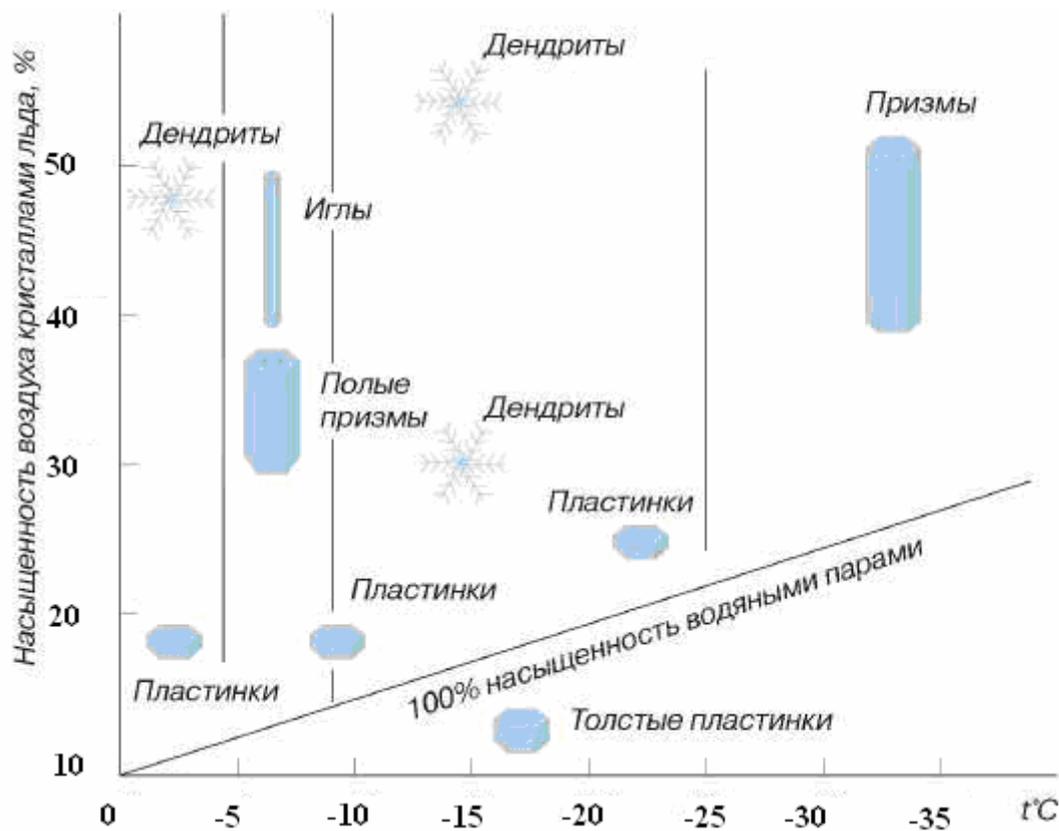


Рисунок 1.5 – Зависимость форм кристаллов от атмосферных условий

При рассмотрении этой диаграммы можно заметить, что на очень низких уровнях пересыщения, скажем меньше, чем несколько процентов относительно льда, кристаллы растут главным образом в виде простых шестиугольных призм. При понижении температуры сначала происходит образование пластинок ( $-2^{\circ}\text{C}$ ), столбиков ( $-5^{\circ}\text{C}$ ), затем в обратном порядке – пластики ( $-15^{\circ}\text{C}$ ), и снова столбики ( $-30^{\circ}\text{C}$ ). С ростом перенасыщения кристаллы становятся более структурированными; так, например при  $-15^{\circ}\text{C}$  мы наблюдаем правильные шестигранные. В небе уровень перенасыщения обычно близок к уровню насыщенности воды или ниже его (отмечен линией на диаграмме); в облаках уровень перенасыщения устанавливается вблизи значения для воды, в виду того, что облако содержит очень много маленьких переохлажденных капелек. В следствии с этим звездных дендритов практически не должно быть в естественном снегопаде, однако в действительности они наблюдаются. Решение этого парадокса заключается в

том, что кристаллы снега в атмосфере находятся в постоянном хаотическом движении, в результате которого с поверхности снежинок частично испаряется вода, поднимая эффективный уровень перенасыщения, при котором возможно образование дендритов.

Информация по формам и размерам облачных кристаллов используется для формирования моделей кристаллических облаков, в состав которых входят определенной формы и размерам. На рисунке 1.6 иллюстрируются примеры таких моделей.

Ice crystal model used for MODIS ice cloud product

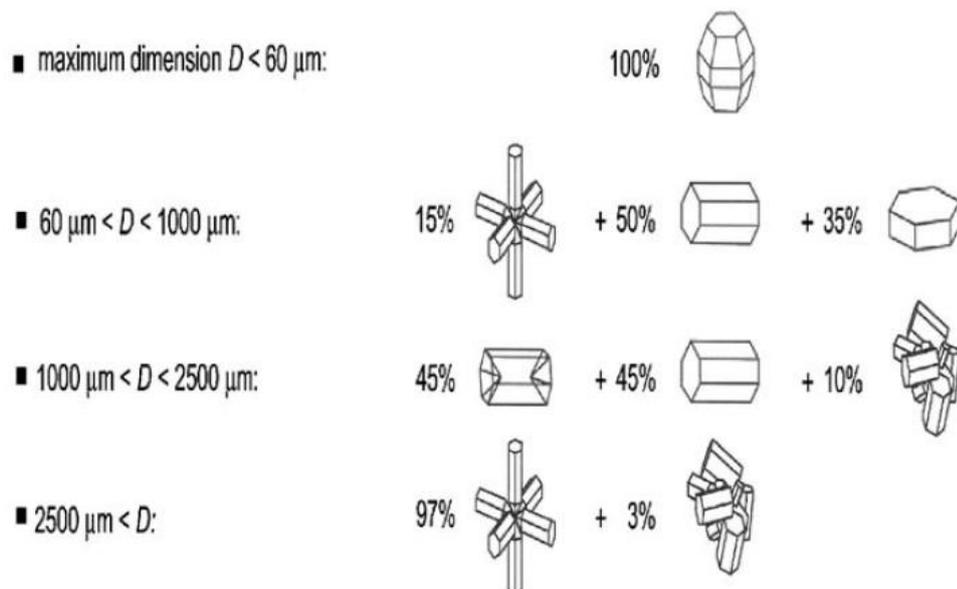


Рисунок 1.6 – Текущая модель ледяных кристаллов MODIS, используемая для восстановления свойств ледяных облаков [9].

## 1.2 КОНЦЕНТРАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Концентрация кристаллов в облаках обычно на два-три порядка меньше, чем концентрация капель. Она существенно зависит от температуры. По данным работы [12], при понижении температуры в облаках с 271 по 253 К концентрация кристаллов увеличилась с 12 до 24 л<sup>-1</sup>. Обобщенные данные

о концентрации частиц в кристаллических облаках разных форм содержатся в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Концентрация кристаллов в облаках разных форм [2]

Форма облаков	Температура, К			Концентрация кристаллов, $N, л^{-1}$	Водность, $г \cdot м^{-3}$
	Основание облака	Точка намерения	Вершина облака		
Sc		264...263	263...262	0,01...0,2	
St			263	0,002...0,02	
St			257	0,03...0,3	
Sc, St, As			263	0,03...500	
Sc, As			267	20...1000	
Ns		263		5...100	
		257		5...100	
		249		4...60	
Ci		231...215		400	0,3
Ci		230...227		200	0,2
Ci, Cs		259...228		300	0,075
Cs		238...228		200	0,025
Ns	263			2	
Ns	257			20	
Ac	263			<0,005	
Ci	257			2	
Ci	249			200	
Ci	231		217	0,4	0,004
Ci	227		219	0,4	0,006
Ci	237		217	0,9	0,023
Ci	239		228	0,8	0,024
Ci	241		230	0,9	0,026

В данной работе особый акцент был сделан на горизонтально ориентированных пластинках, которые могут входить в состав облаков в диапазоне температур от 265 до 248 К. Особо можно выделить интервал от 261 до 258 К, где наблюдается их интенсивная скорость роста [10]. Также в работе [13], используя космические лидарные наблюдения с двумя конфигурациями наведения луча, иллюстрируется наличие горизонтально ориентированных ледяных пластин в атмосфере. В литературе исследования зависимости оптических свойств несферических кристаллов льда от ориентаций частиц в основном ограничиваются угловым распределением

рассеянной электромагнитной энергии. Эта заметка представляет собой отчет о зависимости сечения экстинкции от поляризационного состояния излучения и ориентации гексагонального ледяного кристалла на основе расчетов по методу дискретного дипольного приближения.

В работе [14] проведен анализ данных за 1 месяц, который показывает распределение фракции частиц пластин, часть из которых является горизонтально ориентированными. В ней подчеркивается, что их свойства имеют существенную зависимость от температуры, что приводит к их широким изменениям. По их данным фракция горизонтально ориентированных пластинок составляет около 0,003% при температуре среднего облака  $-80\text{ }^{\circ}\text{C}$  и 0,01% при средне облачной температуре  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Однако отмечается, что эти величины могут быть неопределенными из-за неопределенности в среднем угле наклона, но температурная зависимость пластин является устойчивой.

### **1.3 ФУНКЦИИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ ПО РАЗМЕРАМ**

Диапазон изменения размеров кристаллов в облаках весьма широк. Могут наблюдаться пластинки и звездочки с гексагональным диаметром до 104 мкм, столбики и иглы длиной свыше  $10^3$  мкм. Самые маленькие кристаллы, которые наблюдались в облаках, имели размеры около 10 мкм. Возможно, кристаллы меньших размеров не удалось обнаружить по методическим причинам. Результаты наиболее детального исследования размеров кристаллов разных форм приведены в работах [15, 16, 17, 18]. Авторами этих работ было установлено, что для большинства форм кристаллов зависимость между размерами кристаллов по большой и малой осям удается аппроксимировать степенной функцией вида

$$l=Ad^\beta, \quad (1)$$

где  $A$  и  $\beta$  – эмпирические константы. Константы  $A$  и  $\beta$ , определенные разными авторами для кристаллов пластинчатых и столбчатых форм, сводка которых дана в работах [15, 18], приведены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Эмпирические константы соотношений между  $d$  и  $l$  для кристаллов разной формы.

Формы кристаллов	$A$	$\beta$	Диапазон размеров по наибольшей оси, мкм
Гексагональные пластинки	1,79	0,474	10...3000
Толстые пластинки	2,02	0,449	15...5000
Пластинки с лучами	1,07	0,778	10...1000
	2,13	0,423	30...250
Звездочки	2,18	0,415	10...2000
	2,03	0,431	10...1500
Дендриты	2,80	0,377	–
Столбики			
$l > 200$ мкм	$2,86 \cdot 10^{-3}$	2,415	200...4000
$l/d > 2$	2,07	1,079	10...1000
$l/d \leq 2$	1,18	1,044	10...1000
Длинные столбики	$1,48 \cdot 10^{-3}$	2,288	–
Иглы	0,86	1,637	15...3000
Пустотелые столбики			
$l/d > 2$	2,10	1,075	10...1000
$l/d < 2$	0,86	1,121	10...1000
Пульки			
$l > 300$ мкм	$5,47 \cdot 10^{-2}$	1,880	–
$l \leq 2$	0,89	1,273	–

В общем случае распределение несферических частиц будет определяться параметрами, характеризующими их размеры и форму, т. е. будет многопараметрическим. Концентрация частиц в смешанном облаке определится как

$$N = N_k + N_{кр} = \int_0^\infty f_k(a_0) da_0 + \int_0^\infty f_{кр}(x_1, x_2, \dots, x_n) dx_1, x_2, \dots, x_n, \quad (2)$$

где  $N_k$  и  $N_{кр}$  – концентрация капель и кристаллов;  $f_k(a_0)$  – функция распределения капель по радиусам;  $f_{кр}(x_1, x_2, \dots, x_n)$  – функция распределения кристаллов;  $x_1, x_2, \dots, x_n$  – параметры, характеризующие размеры и форму кристаллов.

Для большинства атмосферных сред, в состав которых входят кристаллы, функция распределения  $N(a)$  является одномодальной и удовлетворительно аппроксимируется модифицированным гамма-распределением

$$N(a) = C \frac{\mu^{\mu+1}}{\Gamma(\mu+1)} \cdot \frac{1}{a_m} \cdot \left(\frac{a}{a_m}\right)^\mu \exp\left(-\frac{\mu a}{a_m}\right). \quad (3)$$

Здесь  $a_m$  – определяющий размер кристалла, соответствующий максимуму функции  $N(a)$ ,  $\mu$  – безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума,  $\Gamma(\mu+1)$  – гамма-функция,  $C$  – концентрация частиц [19].

Гистограммы распределений по размерам пластинчатых (по  $d$ ) кристаллов облаков  $S_i$  приведены на рисунке 1.7:

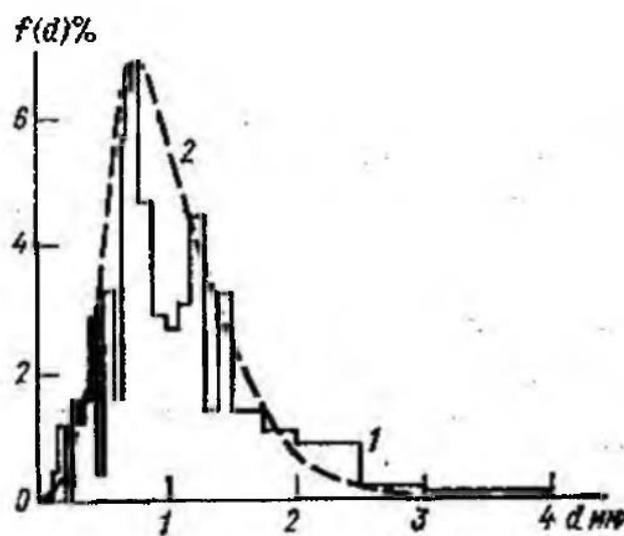


Рисунок 1.7 – Распределение по размерам  $d$  пластинчатых кристаллов в облаке: 1 – эксперимент; 2 – гамма-распределение с параметрами  $a_m = 0.8$  мм,  $\mu = 4$ .

На рисунке 1.8 показаны гистограммы фракции горизонтально ориентированных пластинок для каждого этапа диагностики облачности CALIOP. Их доля обычно выше в пикселях ориентированных кристаллов льда, чем в пикселях льда, и медианные значения доли горизонтально ориентированных пластинок составляют 0,024% и 0,0064% по сравнению с ориентированными кристаллами льда и пикселями льда соответственно. Таким образом, фракции горизонтально ориентированными пластинок из этого исследования в основном согласуются с обнаружениями ориентированных кристаллов льда CALIOP [14].

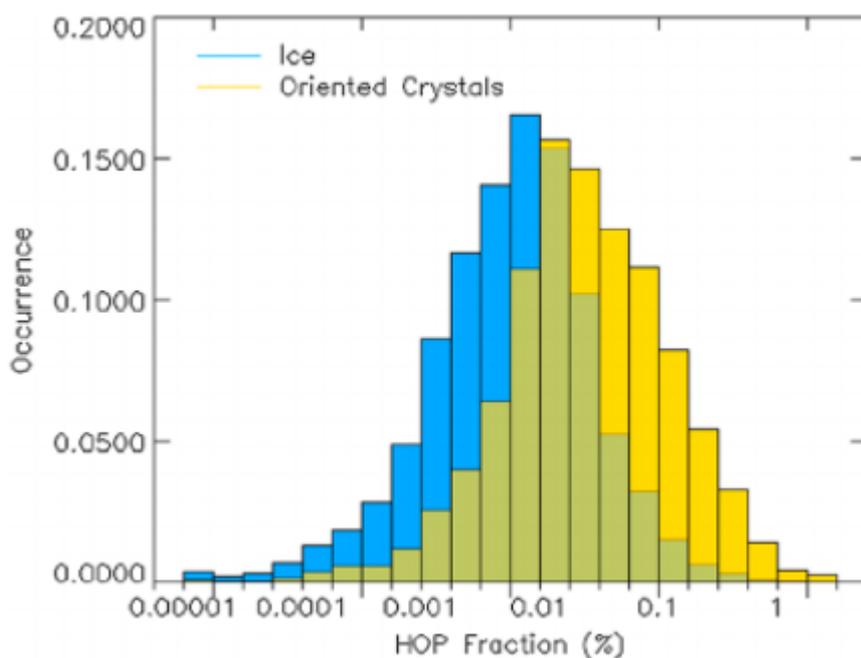


Рисунок 1.8 – Гистограммы фракции горизонтально ориентированных частиц (НОР), полученные в результате исследования. Синий и желтый цвета взяты из соответствующих пикселей ко льду и ориентированным кристаллам льда, диагностированными CALIOP в течение недели с 1 по 7 апреля 2007 года.

Также применяются и другие распределения. Так, например, авторы [20, 21] пришли к выводу, что для описания распределения частиц по размерам в интервале  $d$ , (диаметр эквивалентной сферы) от 0,1 до 2,0 мм с удовлетворительной точностью можно применить распределение Маршалла-Пальмера (4)

$$f(d_3) = C \cdot \exp(-\mu \cdot d_3). \quad (4)$$

Диапазон размеров кристаллов льда в зависимости от глубины облаков выражается функцией распределения частиц по размерам (PSD). Форма PSD обычно бимодальна и универсально описывается экспоненциальными функциями [9].

#### 1.4 ОРИЕНТАЦИЯ ОБЛАЧНЫХ КРИСТАЛЛОВ

Поведение кристаллической частицы в свободной атмосфере обусловлено взаимодействием нескольких физических сил. В спокойной атмосфере в результате действия гравитационной силы и силы сопротивления воздуха каждая частица находится в свободном падении. Характер падения частицы определяется условиями ее обтекания воздухом. Оно может быть устойчивым с определенной, как говорят, преимущественной, ориентацией или неустойчивым. В последнем случае могут возникнуть колебания частицы, вращение и боковые перемещения. На характер движения кристаллов оказывают влияние как упорядоченное перемещение воздушных масс в атмосфере, так и турбулентность.

Характер оседания несферической частицы при свободном падении определяется ее формой и значением числа Рейнольдса

$$Re = hu/v, \quad (5)$$

где  $h$  – характерный размер частицы (для пластинки и столбика  $h=d$ ).

Многочисленные исследования свободного падения в вязкой жидкости частиц разной формы, а также падения кристаллов в атмосфере показали, что при  $Re \leq 0,1$  частица сохраняет то положение, при котором началось ее движение. При увеличении числа  $Re$  частицы начинают ориентироваться

таким образом, чтобы их сопротивление движению было максимальным: пластинчатые формы – главной осью по направлению движения, столбчатые – главной осью горизонтально. Причем движение частиц устойчиво в широком диапазоне изменения  $Re$ . Колебания (осцилляции) частиц начинают наблюдаться при  $Re > 50$ , а иногда и  $Re > 300$  в зависимости от их форм. При дальнейшем увеличении  $Re$  колебания усиливаются. На основании модельных исследований было высказано предположение, что для облачных кристаллов и снежинок (характерные размеры и скорость:  $h \approx 500$  мкм,  $u \approx 50$  см  $\cdot$  с $^{-1}$ , следовательно,  $Re \approx 10$ ) колебания несут существенны и при падении в спокойном воздухе частицы, как правило, должны сохранять преимущественную ориентацию.

Кристаллы ориентируются максимальной площадью по направлению движения так, чтобы сопротивление воздуха было наибольшим [22]. По данным исследований установлено, что для кристаллов пластинчатой и столбчатой форм наблюдается строго устойчивая ориентация при  $R < 100$ , а при  $R \approx 300$  возникают незначительные вибрации. Для больших частиц (с размерами более 1000 мкм) наблюдаются ощутимые колебания лишь при  $R \gg 100$ . Поведение частиц в ней зависит от характера движения воздушных масс. Вихри большого масштаба не влекут за собой хаотическую ориентацию. Наиболее устойчивой ориентацией в пространстве обладают крупные пластинки.

Некоторые необычные лидарные возвращения из высокослоистых облаков интерпретируются в терминах наведения от шестиугольных ледяных пластин, падающих с их длинными осями, выровненными по горизонтали. Такая планарность согласуется с наблюдаемыми высокими коэффициентами обратного рассеяния и низкими коэффициентами деполяризации, а также с диапазоном температур (от  $-12$  до  $-20^\circ\text{C}$ ) облачных слоев, а также с известными характеристиками падения естественных ледяных тромбоцитов. Эффективность обратного рассеяния рассчитывается для «идеальных» ледяных пластинок при освещении на оси или вблизи оси, ортогональной к

длинной оси кристалла. Показано, что очень высокие коэффициенты обратного рассеяния могут быть потенциально измерены по облаку ледяных пластин в зависимости от доли «идеальных» кристаллов, степени, в которой длинные оси пластин остаются горизонтальными, и угла лидача по вертикали.

Расчеты, приведенные статье [23], показали, что возможно большое обратное рассеяние от горизонтально ориентированных ледяных кристаллов с использованием вертикального лидача. Они также дают важный результат, что коэффициент деполяризации из ледяного облака может составлять всего несколько процентов.

Оптические свойства частиц зависят от природы вещества. При этом в качестве основной характеристики рассматривают комплексный показатель преломления

$$\eta = n + i \cdot \chi. \quad (6)$$

Вещественная часть  $n$ , называемая показателем преломления, определяет запаздывание (или опережение) фазы волны, прошедшей через вещество, мнимая часть  $\chi$ , именуемая показателем поглощения, определяет уменьшение интенсивности. Для воздуха значение  $n$  составляет примерно 1.0003 (зачастую в оптике атмосферных сред принимают  $n \approx 1$ ).

Известно, что значения  $\eta$  зависят от длины волны излучения  $\lambda$ , проходящего через вещество. По данным работы [23] для ледяных частиц в условиях чистой атмосферы зависимости  $n=n(\lambda)$  и  $\chi=\chi(\lambda)$  представлены на рисунках 1.9 и 1.10.

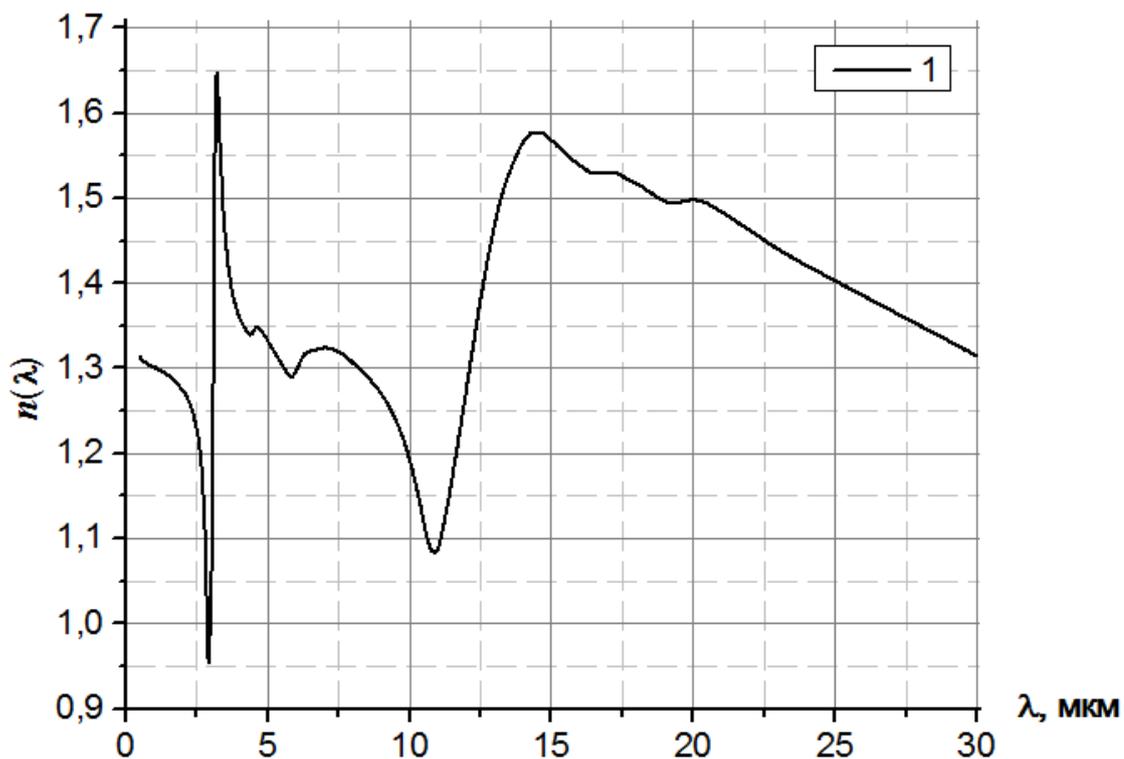


Рисунок 1.9 – Показатель преломления для чистого льда в диапазоне длин волн от 0,5 до 30 мкм.

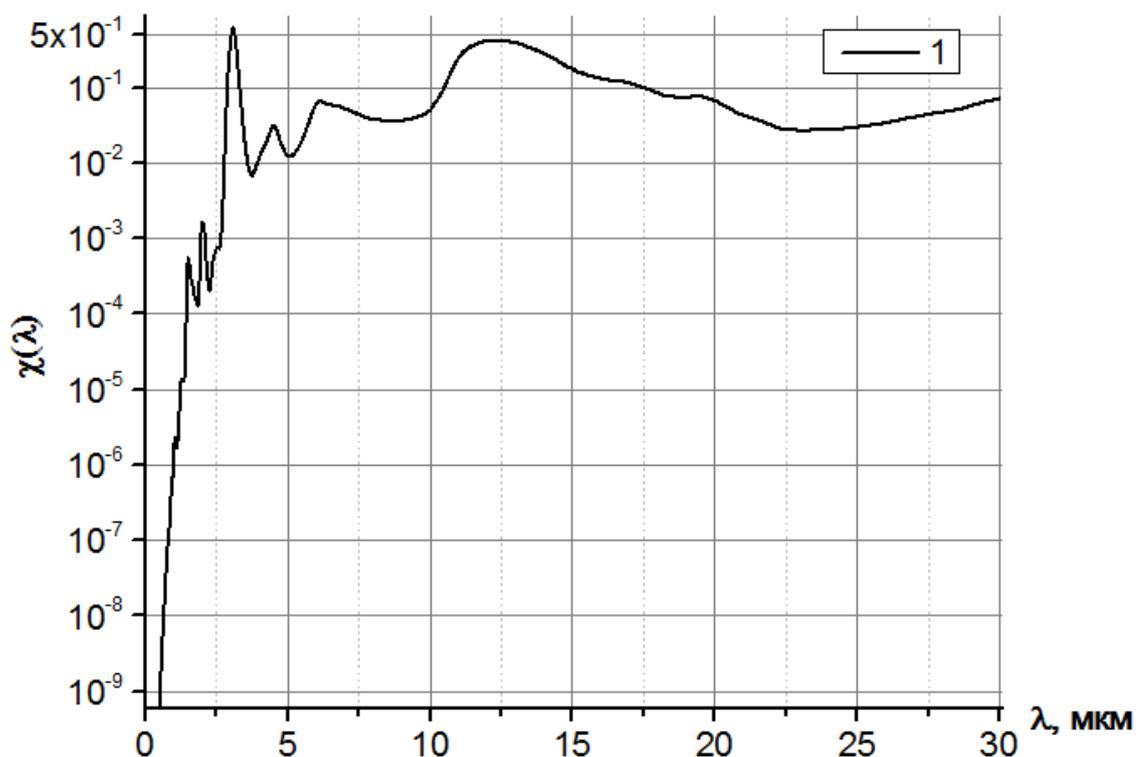


Рисунок 1.10 – Показатель поглощения для чистого льда в диапазоне длин волн от 0,5 до 30 мкм.

Также в области спектроскопии имеется такое понятие как частота излучения (волновое число) и отображают зависимости от него вместо длины волны излучения. Численно частота излучения выражается через длину волны следующим образом

$$\nu = 10000 \cdot 1/\lambda. \quad (7)$$

В связи с этим на рисунках 1.11-1.14 приведены зависимости  $n=n(\nu)$  и  $\chi=\chi(\nu)$ , где также приведена шкала длин волн для сопоставления значений разных величин.

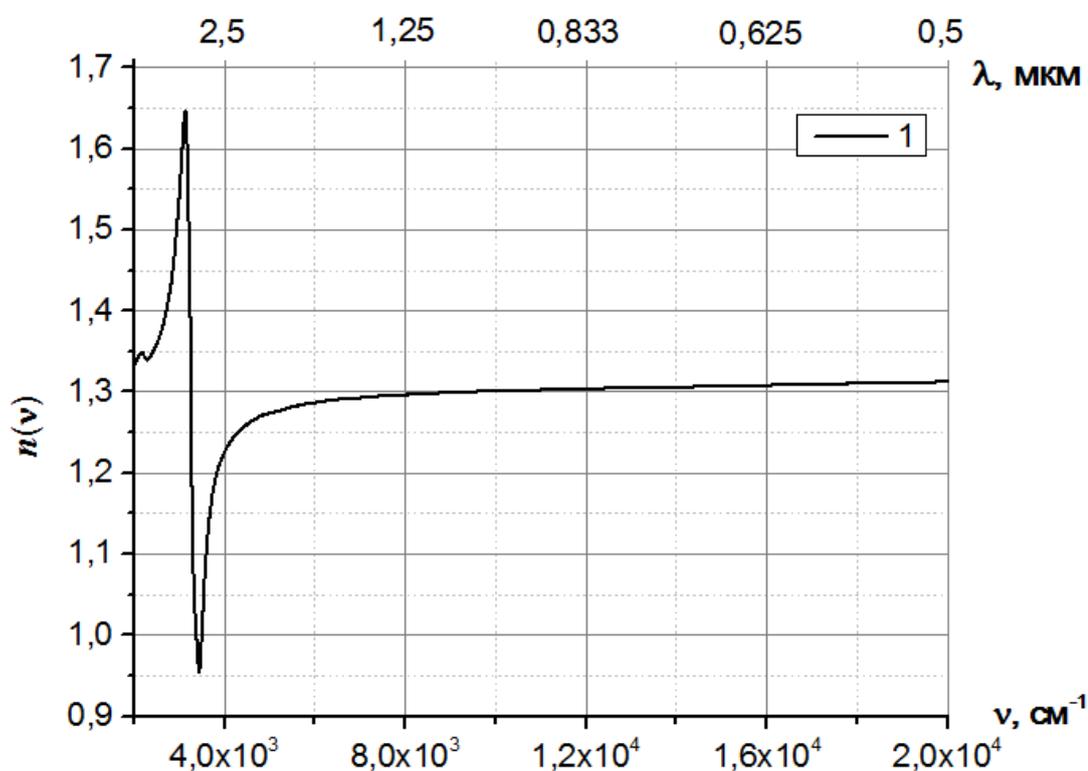


Рисунок 1.11 – Показатель преломления для чистого льда в диапазоне  $\nu$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$  (или  $\lambda$  от 5 до 0,5 мкм).

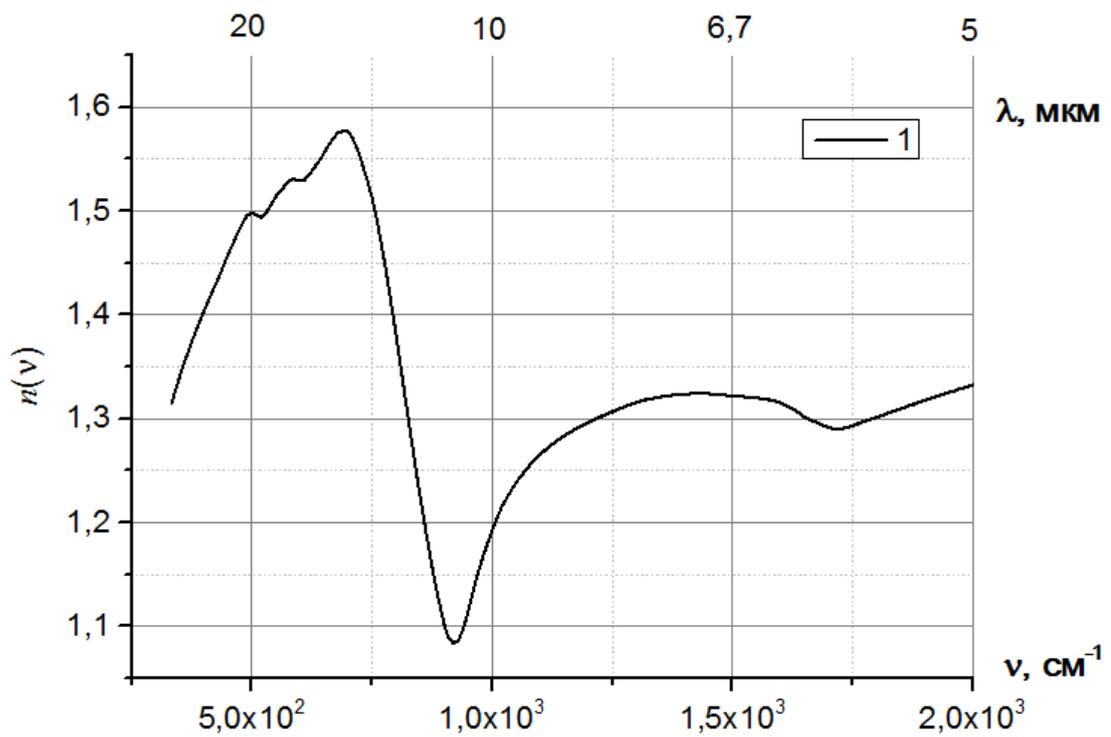


Рисунок 1.12 – Показатель преломления для чистого льда в диапазоне  $\nu$  от  $333$  до  $2 \cdot 10^3$   $\text{cm}^{-1}$  (для  $\lambda$  от  $30$  до  $5$   $\mu\text{m}$ ).

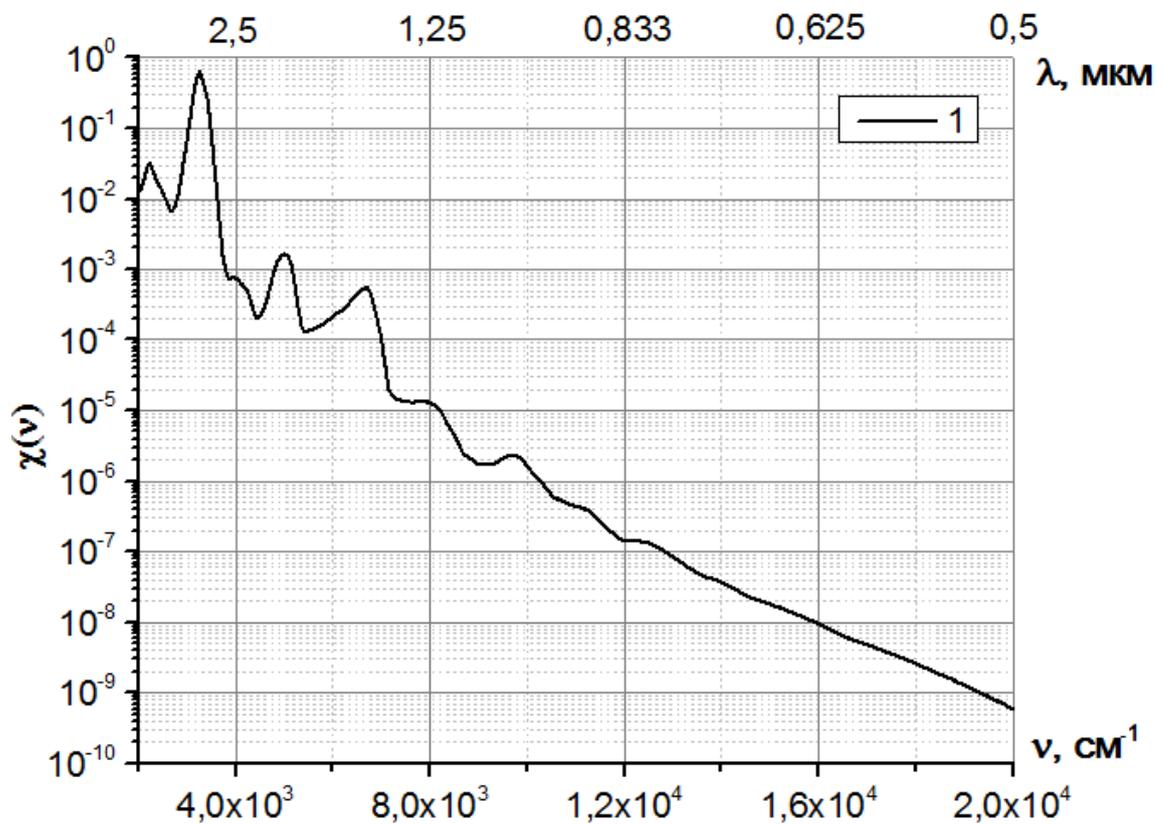


Рисунок 1.13 – Показатель поглощения для чистого льда в диапазоне  $\nu$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4$   $\text{cm}^{-1}$  (или  $\lambda$  от  $5$  до  $0,5$   $\mu\text{m}$ ).

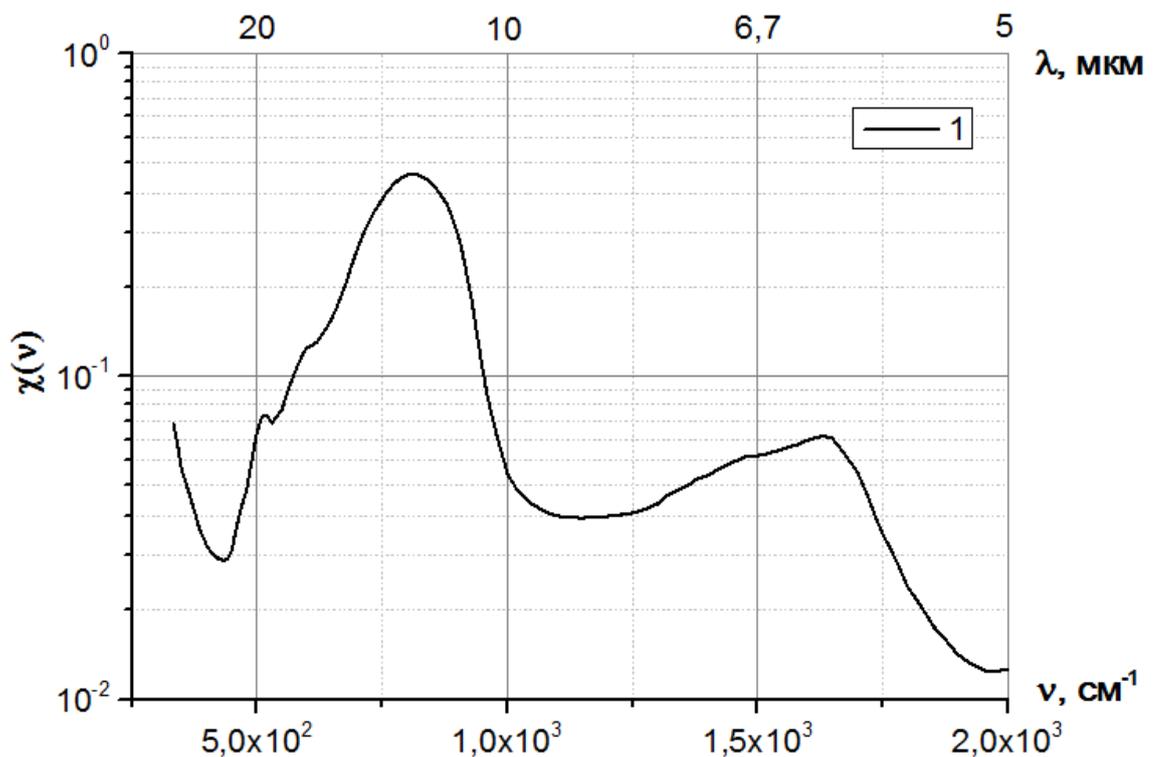


Рисунок 1.14 – Показатель поглощения для чистого льда в диапазоне  $\nu$  от  $333$  до  $2 \cdot 10^3 \text{ cm}^{-1}$  (для  $\lambda$  от  $30$  до  $5 \text{ мкм}$ ).

В зависимости от природы возникновения и условий роста частиц значения  $\eta$  могут существенно отличаться от величин, демонстрируемых на рисунках 1.9 и 1.10. Облачные кристаллы могут содержать различные микропримеси, которые обеспечиваются условиями (природными или антропогенными) их возникновения.

## 2 ОЦЕНКА ПАРАМЕТРОВ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ЧАСТИЦ ПО РАЗМЕРАМ

Для представления микрофизических свойств полидисперсной среды (системы частиц) как правило используется функция распределения частиц по размерам (3). Согласно экспериментально установленным данным модифицированное гамма-распределение частиц по размерам адекватно представляет распределение кристаллов в реальной среде (см. рисунок 1.7 Главы 1).

Средний размер частицы ( $\bar{a}$ ) и среднеквадратическое отклонение ( $\sigma$ ) вычислялись следующим образом:

$$\bar{a} = \int_0^{\infty} a \cdot N(a) da, \quad (8)$$

$$\sigma = \sqrt{\int_0^{\infty} (a - \bar{a})^2 \cdot N(a) da}. \quad (9)$$

На рисунках с 2.1 по 2.6 представлены  $N(a)$  зависимости плотности распределения модифицированного гамма-распределения от размеров кристаллов при различных  $a_m$  и  $\mu$ , определяющих размер кристалла, соответствующий максимуму функции  $N(a)$  и безразмерный параметр, характеризующий крутизну склонов данного максимума соответственно. Из рисунков видно, что с увеличением параметра  $\mu$  (характеристика дисперсии) уменьшается разброс частиц по размерам.

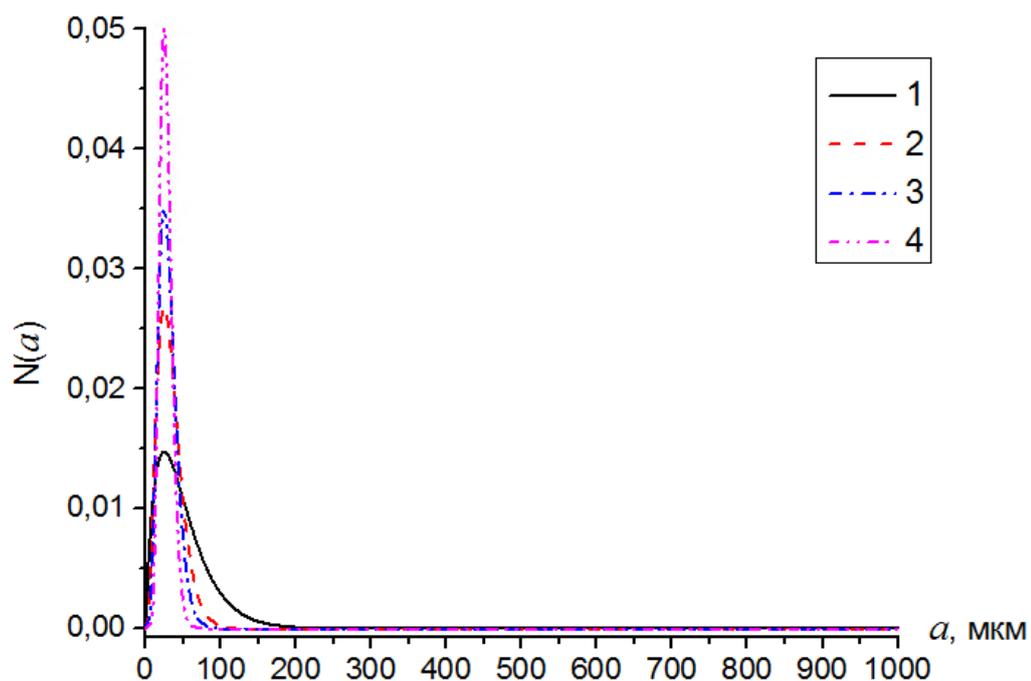


Рисунок 2.1 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=25$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

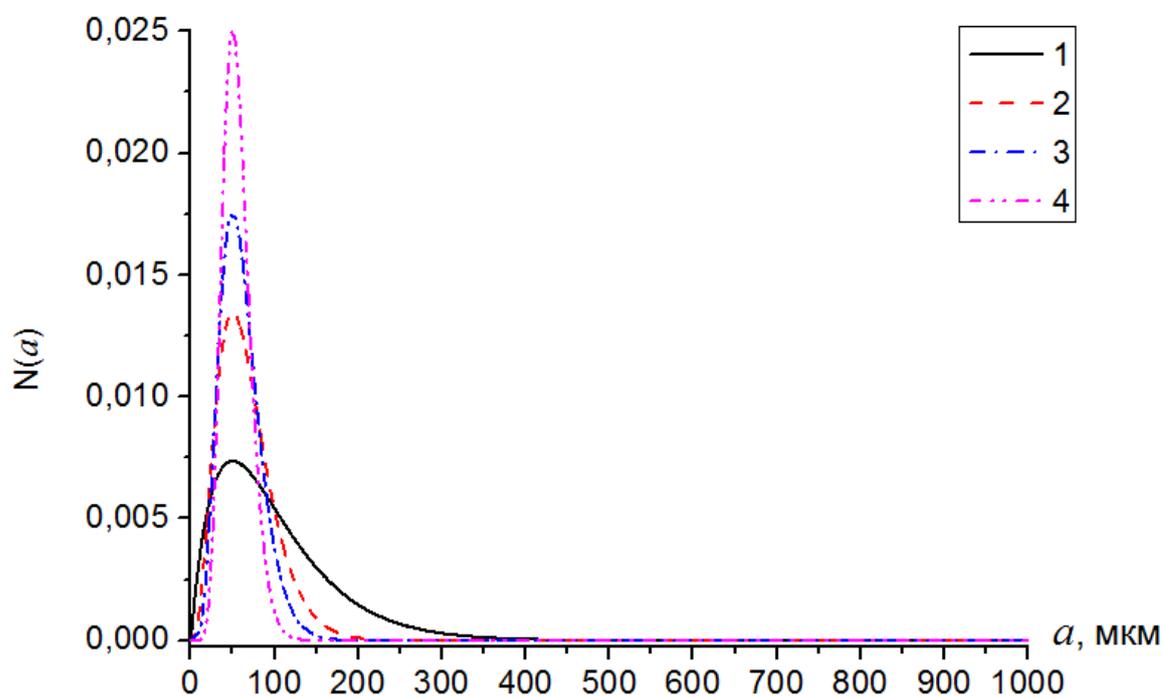


Рисунок 2.2 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=50$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

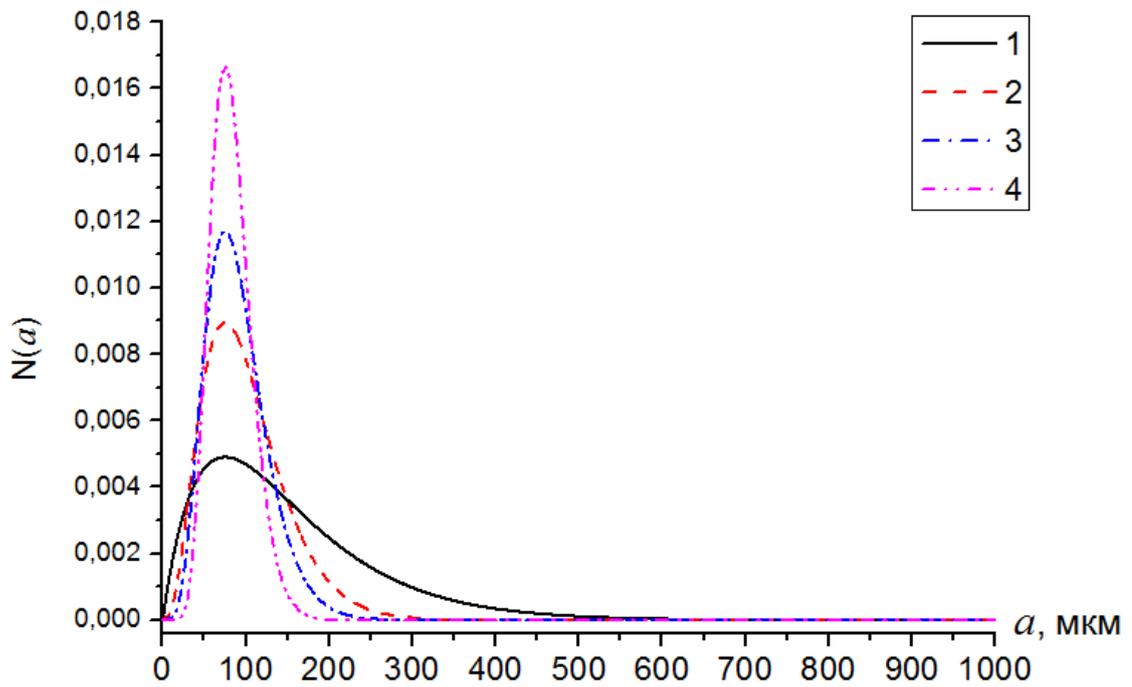


Рисунок 2.3 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=75$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

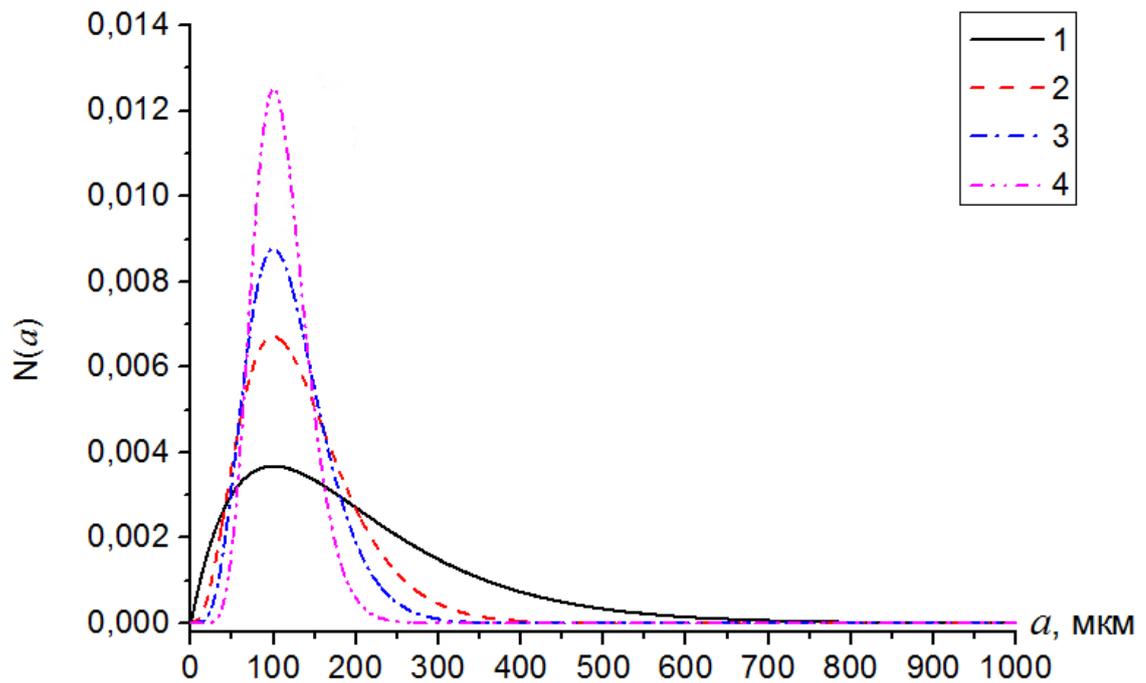


Рисунок 2.4 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=100$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

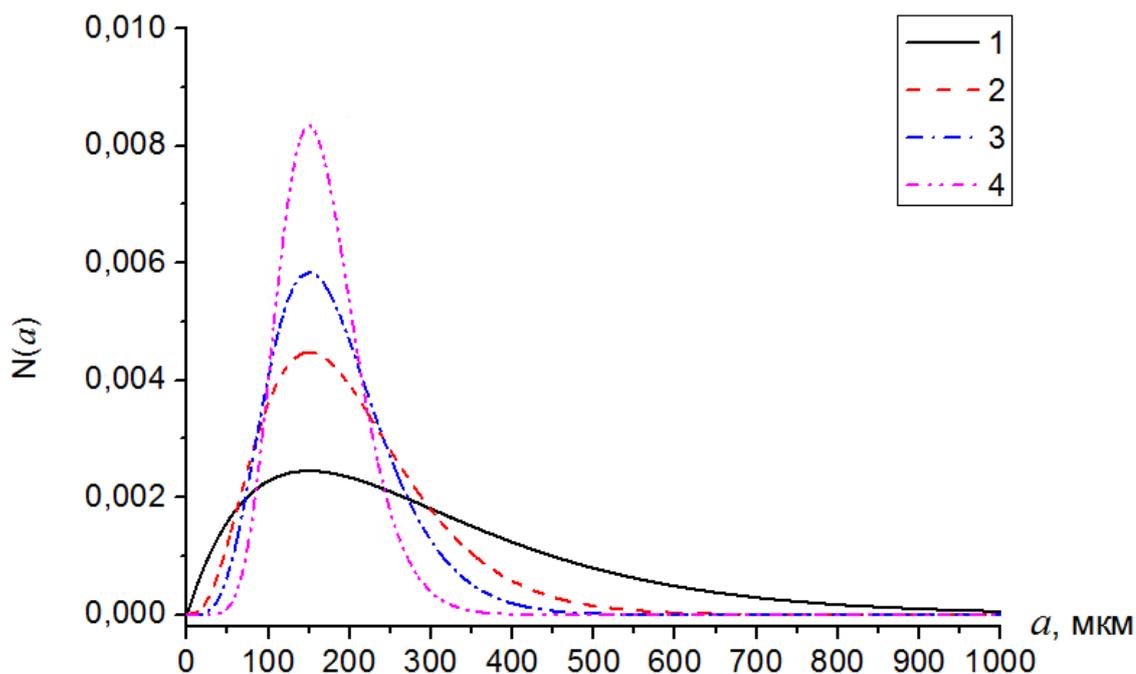


Рисунок 2.5 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=150$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

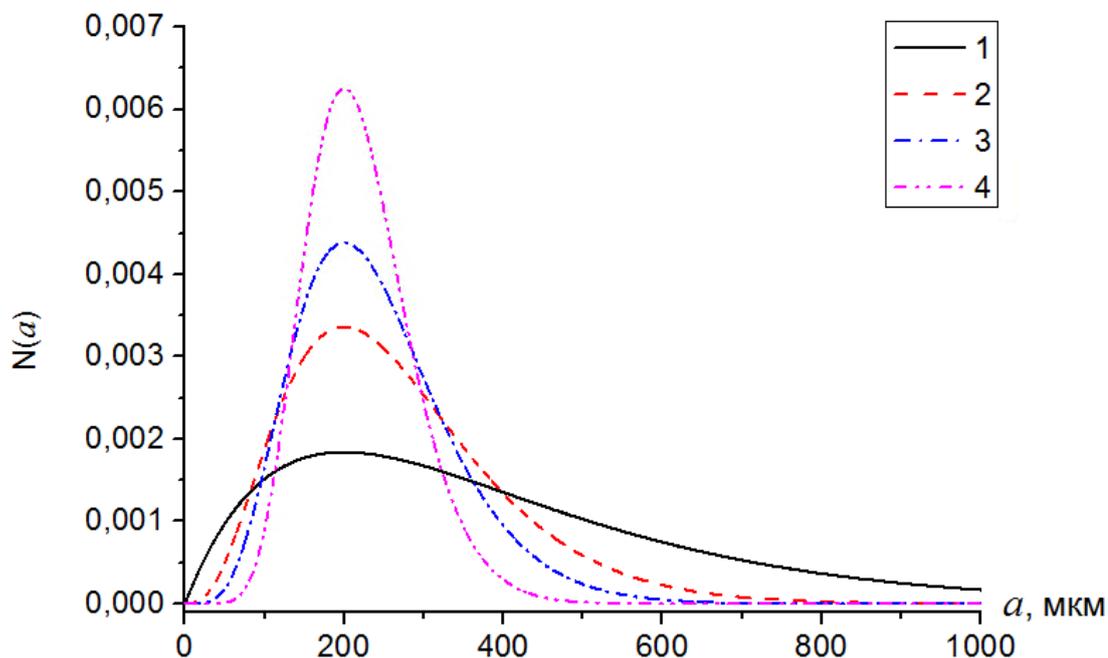


Рисунок 2.6 – Плотность распределения модифицированного гамма-распределения частиц по размерам при  $a_m=200$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

На рисунках с 2.1 по 2.6 иллюстрируется увеличение  $a_m$ . При визуальном сравнении графиков можно отметить, что чем меньше  $a_m$ , тем

больше график распределения частиц по размерам приближается к дельта-функции (Рисунок 2.1), а при больших значениях  $a_m$  распределение приближается к равномерному (Рисунок 2.6).

На рисунках 2.7 и 2.8 приведены графики интегральной функции распределения частиц по размерам  $F(a)$  при различных значениях  $\mu$ . Из первого рисунка видно, что чем больше  $\mu$ , тем быстрее функция стремится к единице после достижения определяющего размера кристалла и тем большую крутизну будет иметь функция. Из этого можно сделать вывод, что при расчете характеристик при малых значениях  $\mu$  необходимо значительно увеличивать правую границу интегрирования. На втором рисунке видно, что при малых значениях  $\mu$  и малых значениях размеров частиц функция начинает возрастать быстрее, чем при больших значениях  $\mu$ . Поэтому при вычислениях с малыми значениями  $\mu$  для более точных вычислений следует брать малые значения для левой границы интегрирования.

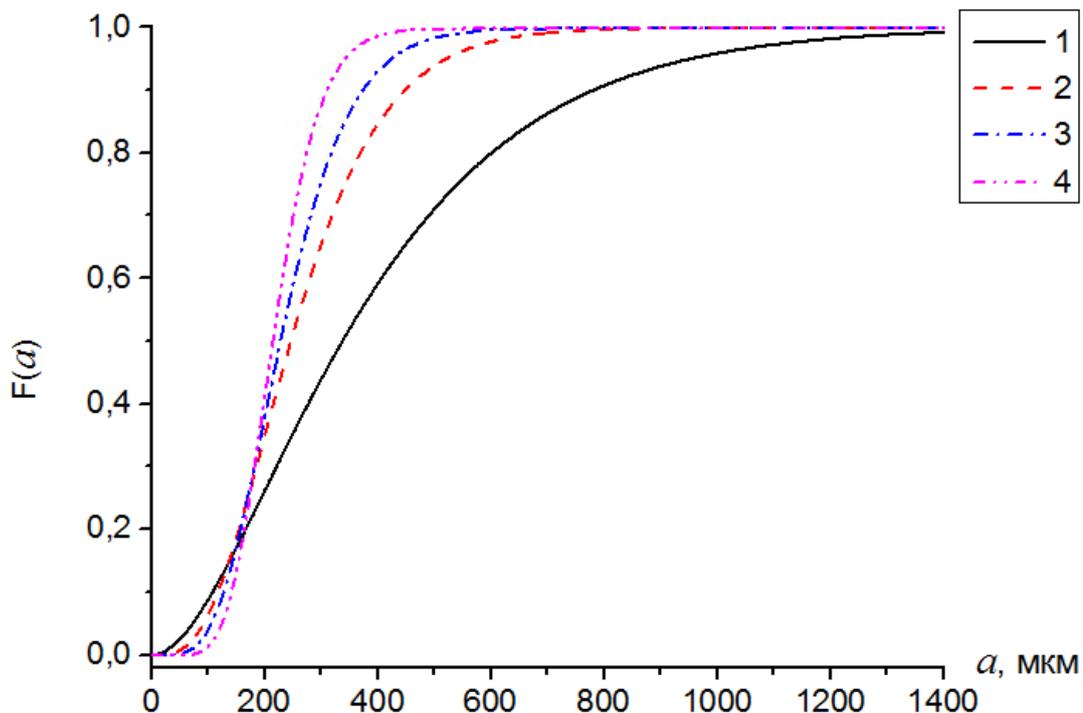


Рисунок 2.7 – Графики интегральной функции при  $a_m=200$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

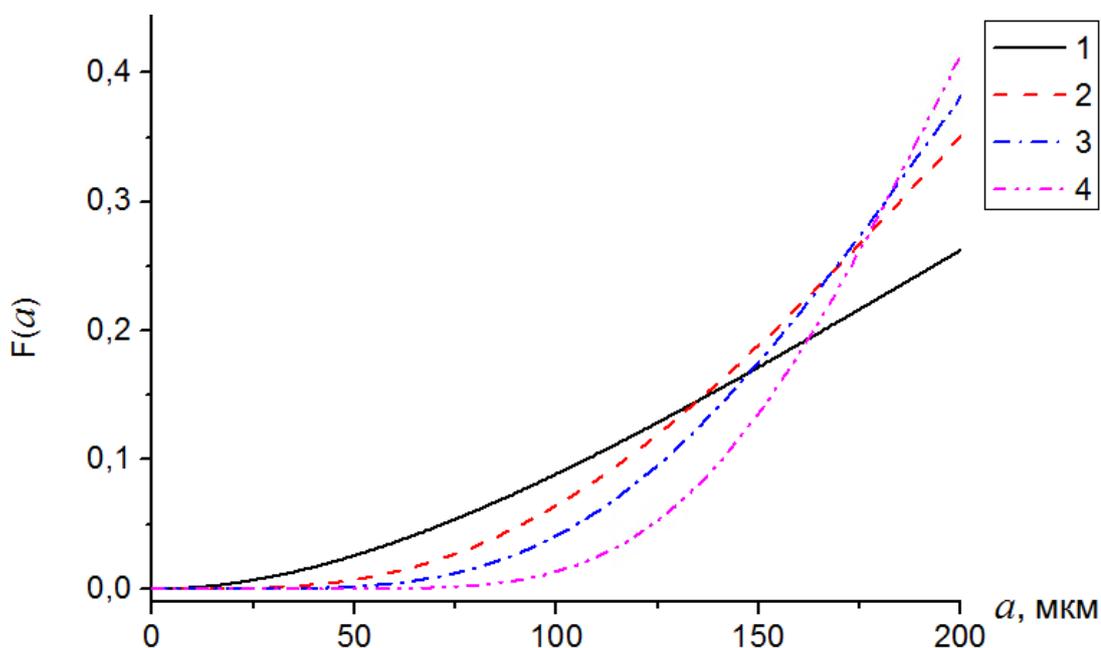


Рисунок 2.8 – Графики интегральной функции при  $a_m=200$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

Для оценки характеристик распределения был произведен подсчет средних размеров частиц ( $\bar{a}$ ) и среднеквадратического отклонения ( $\sigma$ ) при различных  $a_m$  и  $\mu$  и были сведены в таблицу 2.1.

Таблица 2.1 –  $\bar{a}$  и  $\sigma$  при различных  $a_m$  и  $\mu$

$a_m$ , мкм	$\mu$	$\bar{a}$ , мкм	$\sigma$	$a_m$ , мкм	$\mu$	$\bar{a}$ , мкм	$\sigma$
25	1	50	35,35534	50	1	100	70,71068
	2	37,5	21,65064		2	75	43,30127
	3	33,33333	16,66667		3	66,66667	33,33333
	4	31,25	13,97542		4	62,5	27,95085
	5	30	12,24745		5	60	24,4949
	6	29,16667	11,02396		6	58,33333	22,04793
	7	28,57143	10,10153		7	57,14286	20,20305
	8	28,125	9,375		8	56,25	18,75
	9	27,77778	8,784105		9	55,55556	17,56821
	10	27,5	8,291562		10	55	16,58312
	15	26,66667	6,666667		15	53,33333	13,33333
	20	26,25	5,72822		20	52,5	11,45644
	30	25,83333	4,639804		30	51,66667	9,279607
75	1	150	106,066	100	1	200	141,4214
	2	112,5	64,95191		2	150	86,60254
	3	100	50		3	133,3333	66,66667
	4	93,75	41,92627		4	125	55,9017

	5	90	36,74235		5	120	48,98979
	6	87,5	33,07189		6	116,6667	44,09586
	7	85,71429	30,30458		7	114,2857	40,4061
	8	84,375	28,125		8	112,5	37,5
	9	83,33333	26,35231		9	111,1111	35,13642
	10	82,5	24,87469		10	110	33,16625
	15	80	20		15	106,6667	26,66667
	20	78,75	17,18466		20	105	22,91288
	30	77,5	13,91941		30	103,3333	18,55921
150	1	300	212,132	200	1	400	282,8427
	2	225	129,9038		2	300	173,2051
	3	200	100		3	266,6667	133,3333
	4	187,5	83,85255		4	250	111,8034
	5	180	73,48469		5	240	97,97959
	6	175	66,14378		6	233,3333	88,19171
	7	171,4286	60,60915		7	228,5714	80,8122
	8	168,75	56,25		8	225	75
	9	166,6667	52,70463		9	222,2222	70,27284
	10	165	49,74937		10	220	66,3325
	15	160	40		15	213,3333	53,33333
	20	157,5	34,36932		20	210	45,82576
	30	155	27,83882		30	206,6667	37,11843
300	1	600	424,2641	500	1	1000	707,1068
	2	450	259,8076		2	750	433,0127
	3	400	200		3	666,6667	333,3333
	4	375	167,7051		4	625	279,5085
	5	360	146,9694		5	600	244,949
	6	350	132,2876		6	583,3333	220,4793
	7	342,8571	121,2183		7	571,4286	202,0305
	8	337,5	112,5		8	562,5	187,5
	9	333,3333	105,4093		9	555,5556	175,6821
	10	330	99,49874		10	550	165,8312
	15	320	80		15	533,3333	133,3333
	20	315	68,73864		20	525	114,5644
	30	310	55,67764		30	516,6667	92,79607

При сравнении значений из таблицы 2.1 можно сделать следующие выводы: при  $\mu=1$  мат. ожидание равняется удвоенному определяющему размеру частицы; при увеличении  $\mu$  мат. ожидание стремится к значению определяющего размера частицы; мат. ожидание и среднеквадратическое

отклонение при одинаковых значениях  $\mu$  увеличиваются прямо пропорционально увеличению определяющего размера кристалла; с увеличением  $\mu$  значение среднеквадратического отклонения уменьшается.

На рисунках 2.9–2.13 приведены графики зависимости величины ошибки интегрирования при увеличении левой границы интегрирования при различных значениях  $a_m$  и  $\mu$ . По этим рисункам видно, что при увеличении  $a_m$  графики не меняют своего вида, а изменяются только значения координатной сетки для левой границы интегрирования. Также вновь демонстрируется, что при малых значениях  $\mu$  необходимо использовать малые значения для левой границы интегрирования для повышения точности вычислений.

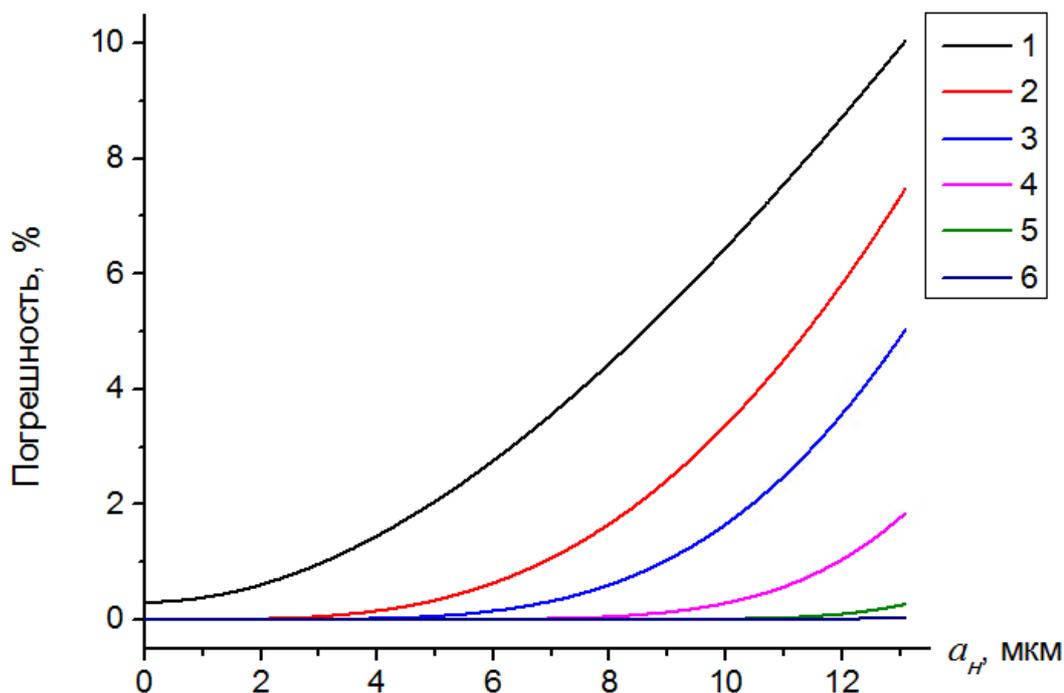


Рисунок 2.9 – Ошибка интегрирования при изменении нижней границы интегрирования при  $a_m=25$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ , 6 –  $\mu=30$ .

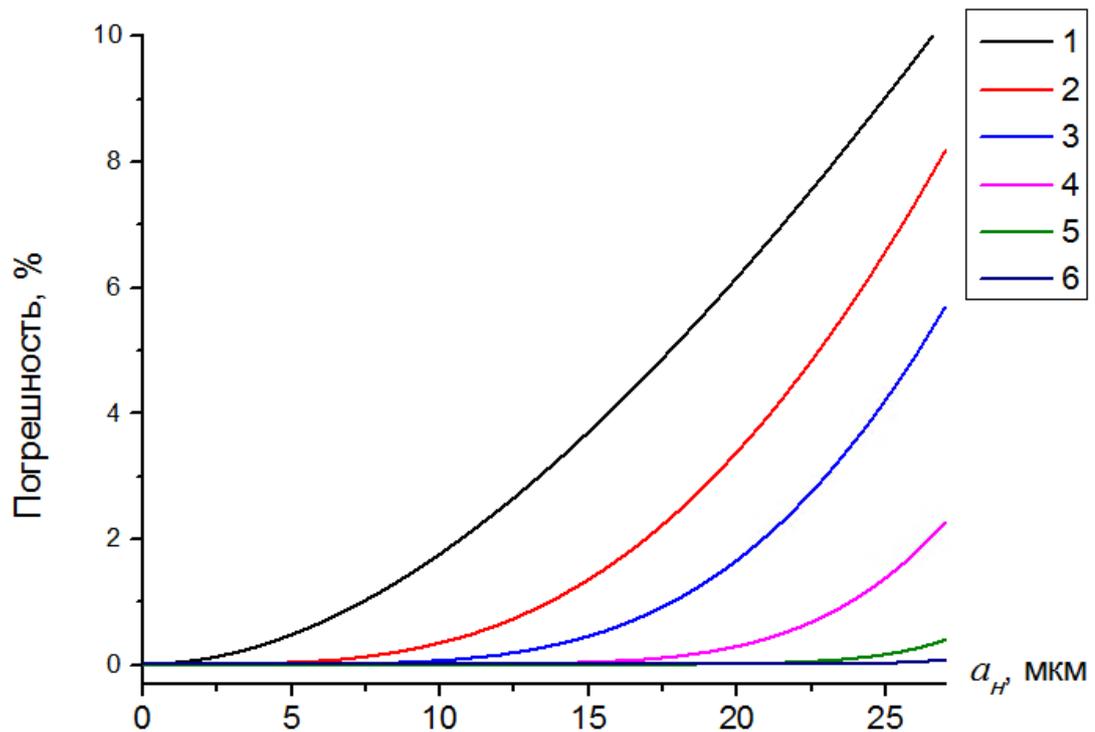


Рисунок 2.10 – Ошибка интегрирования при изменении нижней границы интегрирования при  $a_m=50$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ , 6 –  $\mu=30$ .

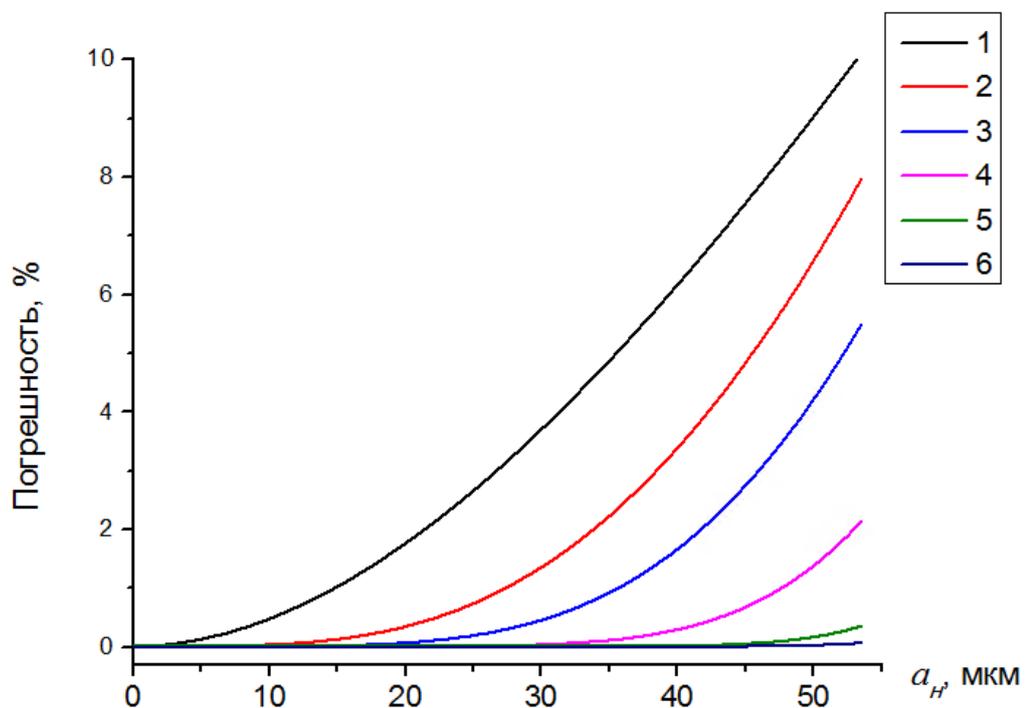


Рисунок 2.11 – Ошибка интегрирования при изменении нижней границы интегрирования при  $a_m=100$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ , 6 –  $\mu=30$ .

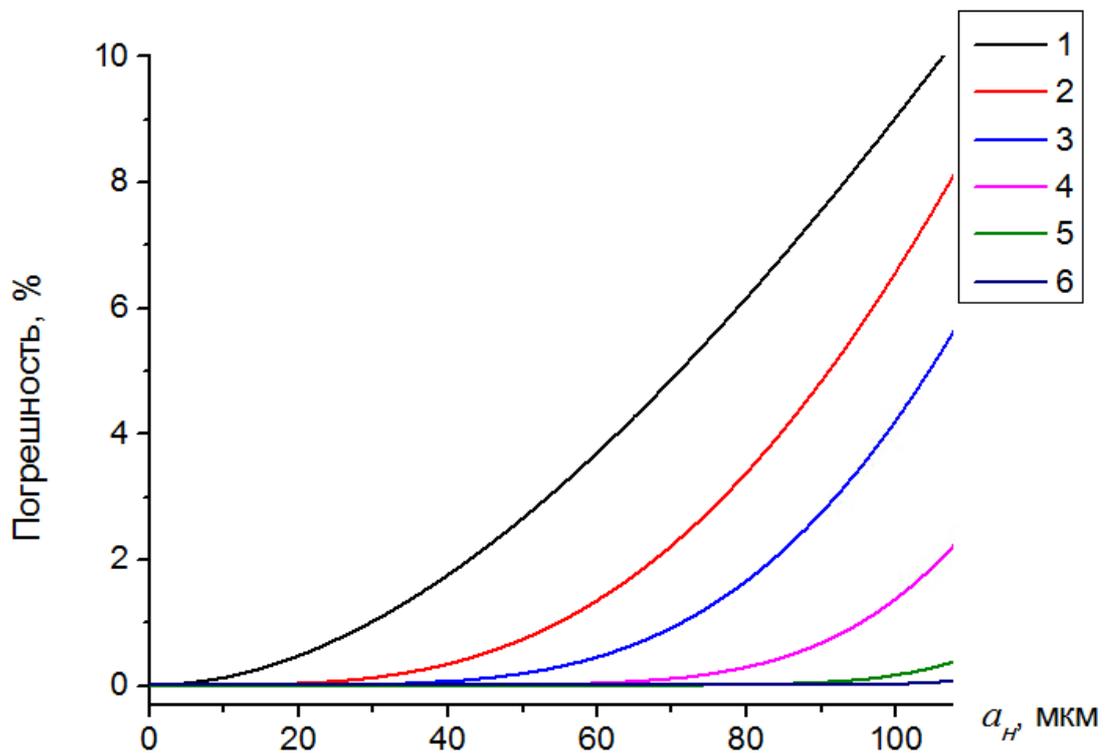


Рисунок 2.12 – Ошибка интегрирования при изменении нижней границы интегрирования при  $a_m=200$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ , 6 –  $\mu=30$ .

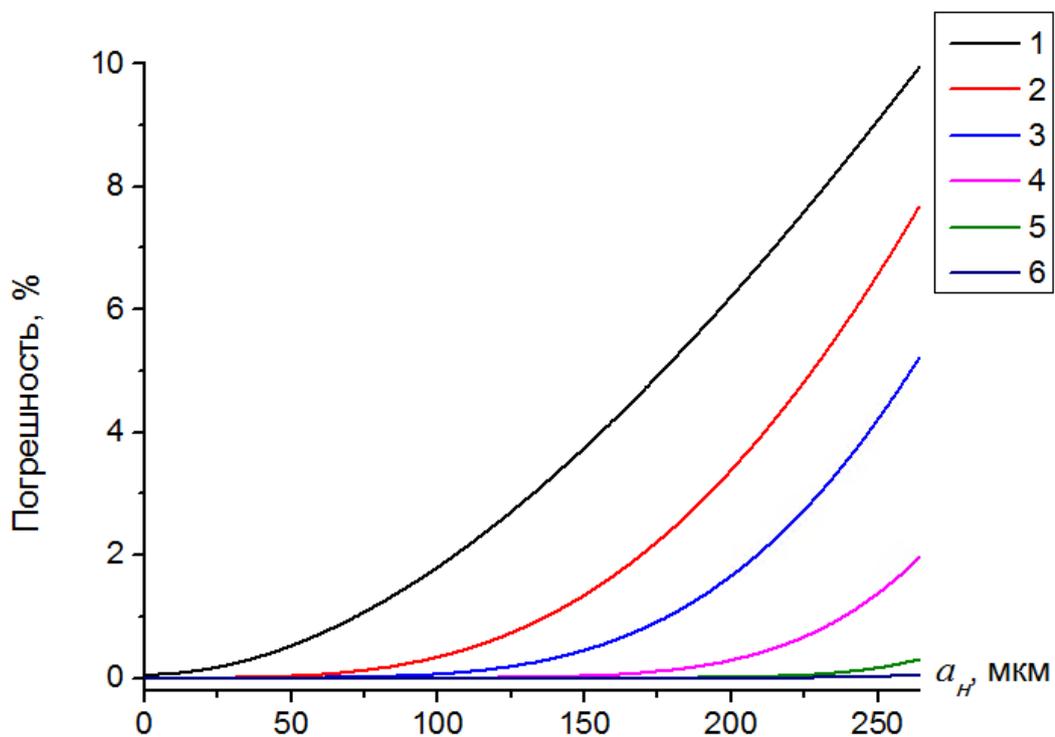


Рисунок 2.13 – Ошибка интегрирования при изменении нижней границы интегрирования при  $a_m=500$  мкм: 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ , 6 –  $\mu=30$ .

Таким образом рисунки 2.9 – 2.13 наглядно показывают допустимые пределы для левой границы интегрирования при расчетах характеристик.

Основные выводы:

1. Нужно знать ошибку, когда используешь определенные границы интегрирования;
2. Используется для оценки необходимости использования различных методов расчета оптических характеристик среды;
3. Корректно сформировать априорную информацию на основе соответствующих экспериментальных данных по микрофизическим свойствам. Эти данные необходимы для корректного сравнительного анализа соответствующих результатов численного и натурального эксперимента.

### 3 ОСНОВЫ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ

#### 3.1 ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

В состав кристаллических облаков в той или иной мере входят пластинчатые кристаллы [2]. Ряд оптических явлений (световые, лунные и солнечные столбы, аномальное рассеяние, ослепляющий световой поток солнечной энергии, в который погружаются летательные аппараты и др.), наблюдаемых в атмосфере, объясняются взаимодействием лучистой энергии с горизонтально ориентированными пластинками [10]. По характеру ослабления среди всех крупных кристаллов с устойчивой ориентацией в пространстве выделяются крупные пластинки. Для них фактор ослабления может меняться в наибольших пределах (от 0 до 4). Именно эти кристаллы вносят основной вклад в спектральную зависимость ослабления оптического излучения многокомпонентной полидисперсной средой, содержащей пластинки.

По этой причине численная модель облака в виде горизонтально ориентированных кристаллов является вполне приемлемой для исследования особенностей экстинкции ледяных облаков.

При рассмотрении системы пластинок необходимо провести усреднение характеристик светорассеяния частиц по совокупностям ориентации, определяемых вращением пластинок вокруг их осей (например, при усреднении по углу  $\gamma$ , см. рисунок 3.1). При усреднении существенно сглаживаются особенности в характеристиках, обусловленные их тонкой геометрической структурой. При расчете характеристик ослабления от отдельной частицы подразумевается последующий переход к интегральным характеристикам, применяемых для представления полидисперсной среды. Для существенного сокращения времени расчета характеристик ослабления следует упростить геометрию частицы. В этой связи круглая пластинка

является наилучшим геометрическим приближением модели отдельной частицы полидисперсной среды, состоящей из пластинчатых кристаллов.

В качестве отдельной частицы ледяного облака рассмотрим круглую пластинку радиусом  $a$  и толщиной  $d$  (см. Рисунок 3.1). Полупрозрачная пластинка

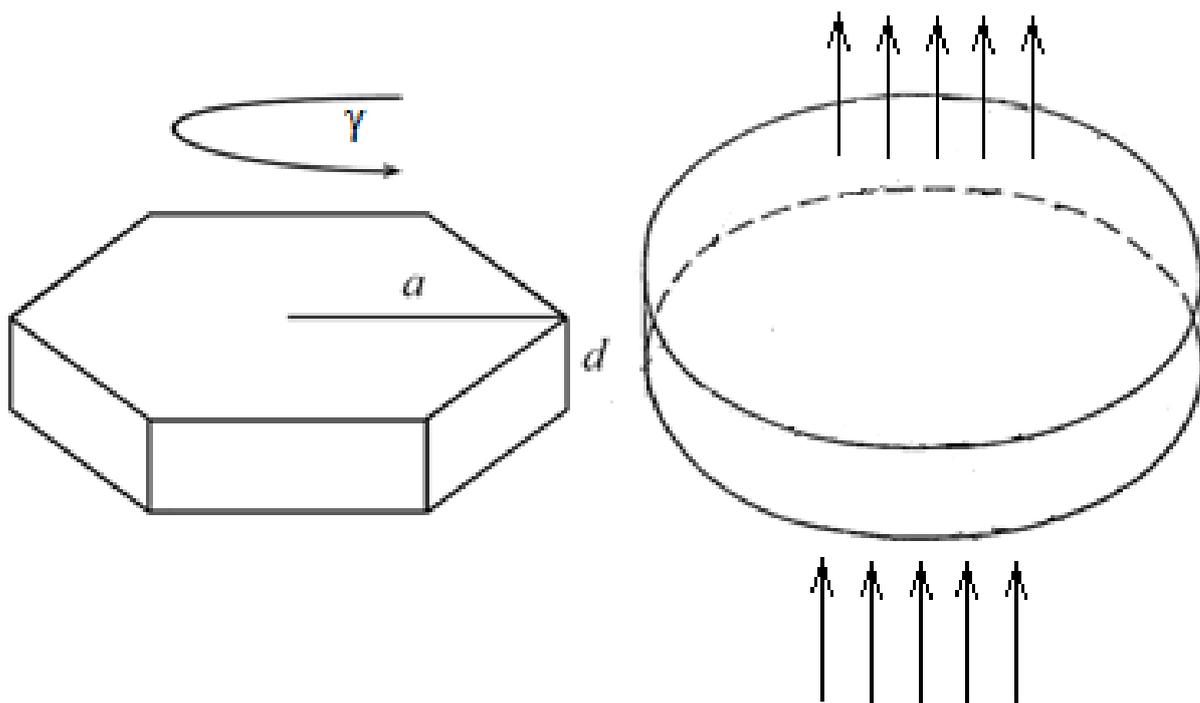


Рисунок 3.1 – Модель отдельного рассеивателя

имеет комплексный показатель преломления  $\eta = n + \chi \cdot i$ . По направлению нормали к основанию пластинчатого кристалла падает лучистая энергия, проходит через частицу и рассеивается в направлении распространения излучения. При этом рассматривается оптическое излучение, длина волны которого обозначена как  $\lambda$ . Рассеиватель является крупным по отношению к длине волны падающего излучения ( $a \gg \lambda$ ). Определить ослабление излучения, прошедшего через ансамбль горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. При этом следует учесть полидисперсных характер модельной среды (см. рисунок 3.2).

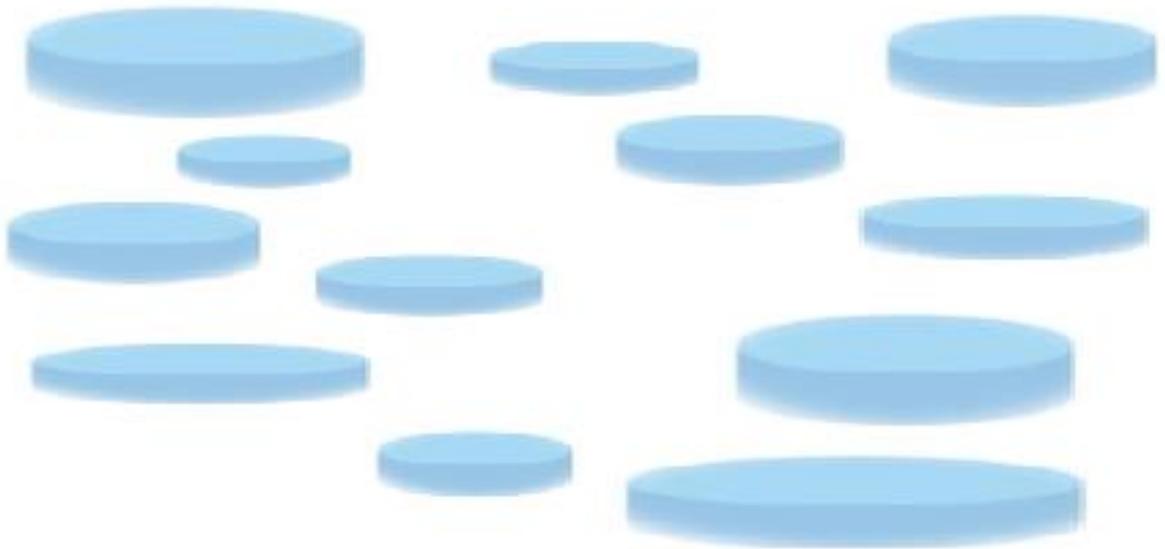


Рисунок 3.2 – Модель полидисперсной среды

### 3.2 ФОРМАЛИЗМ ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ

При расчете характеристик светорассеяния частицами применяются различные методы. Для частиц объемных форм, близких к сферической, используется решение Ми задачи рассеяния плоской волны на сфере. Для большинства форм крупных (по отношению к длине волны падающего излучения) частиц ослабление лучистой энергии определяется, главным образом, дифракционным полем (образующееся за счет тени частицы в направлении распространения потока вперед) и не зависит от внутренней структуры рассеивателя. Для таких частиц фактор ослабления принимает асимптотическое значение, равное 2. Для крупных преимущественно ориентированных кристаллов с плоскопараллельными гранями фактор ослабления может принимать значения отличные от 2. Для крупных пластинок интервал возможного изменения значений фактора ослабления имеет наибольшие пределы, от 0 до 4. Метод физической оптики, который успешно применяется для расчета характеристик рассеяния, позволяет корректно рассчитать ослабление лучистой энергии крупной пластинкой

учитывая дифракционного и рефракционное (поле, прошедшее через частицу) поля.

Рассмотрим характеристики ослабления для случая, когда направление распространения волны совпадает с нормалью к плоскости ориентации пластинок. При нормальном падении плоской волны на основание пластинки формула для сечения ослабления ( $S_{\text{ext}}$ ), полученная в рамках метода физической оптики [19, 24], имеет вид:

$$S_{\text{ext}}(a, d, \lambda) = 2\pi a^2 (1 - \text{Re}(S_e)), \quad (10)$$

где

$$S_e = t_e \sum_{j=1}^{\infty} \exp(i\delta_j) r_e^{j-1}, \quad (11)$$

$$t_e = 4\eta / (\eta + 1)^2, \quad r_e = (\eta - 1)^2 / (\eta + 1)^2, \quad \delta_j = k d [(2j - 1)\eta - 1],$$

здесь  $\delta_j$  – разность фазовых набегов лучей  $j$ -го рефракционного пучка и лучей невозмущенной части фронта падающей волны,  $k = 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  – длина волны,  $\tilde{\eta}$  – комплексный показатель преломления. Учитывая функциональную связь ( $d = d(a)$ ) между радиусом пластинки ( $a$ ) и ее толщиной ( $d$ ), выражение для сечения ослабления записывается в более компактной форме:

$$S_{\text{ext}} = 2\pi a^2 (1 - \text{Re}(T)), \quad (12)$$

где  $T$  – френелевский коэффициент передачи и отражения для плоской волны, нормально падающей на полупрозрачный слой.

Фактор ослабления ( $\Theta_{\text{ext}}$ ) определяется как:

$$\Theta_{\text{ext}} = S_{\text{ext}} / S_{\text{sq}}, \quad (13)$$

где  $S_{\text{sq}}$  – площадь тени частицы.

Для дисперсной среды рассматриваются интегральные характеристики, такие как коэффициенты ослабления ( $A_{\text{ext}}$ ) и фактор ослабления ( $Q_{\text{ext}}$ ). Коэффициент является интегралом, подынтегральная функция которого

содержит в качестве множителя сечение ослабления для отдельной частицы. При учете распределения частиц по размерам используются интегральные соотношения:

$$A_{\text{ext}} = \int S_{\text{ext}}(a) N(a) da, \quad (14)$$

$$Q_{\text{ext}} = A_{\text{ext}} / \zeta, \quad \zeta = \int S_{\text{sq}} N(a) da. \quad (15)$$

Здесь  $N(a)$  – функция распределения частиц по размерам. Для многих атмосферных сред, состоящих из кристаллов, функция распределения  $N(a)$  является одномодальной и удовлетворительно аппроксимируется модифицированным гамма-распределением [19]. В этой работе для представления  $N(a)$  используется выражение, приведенное в главе 1 (см. формула 3).

### 3.3 АНАЛИТИЧЕСКОЕ ВЫРАЖЕНИЕ ДЛЯ РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ

Для большинства облачных кристаллов коэффициент ослабления может быть определен только численно. Тем не менее, существует близкая к реальности модель полидисперсной среды в виде системы горизонтально ориентированных пластинок, для которой удалось провести необходимое интегрирование в аналитическом виде [19]. При этом использовалось модифицированное гамма- распределение частиц по размерам (3) с учетом  $d = 2.020(2a)^{0.449}$ .

$$\alpha_{\text{ext}} \approx 2\pi C \frac{\mu + 2}{\mu + 1} \bar{a}^2 \left\{ 1 - \text{Re} \left[ t_e / (1 + \chi \cdot k x_2 - i(n-1)k x_2)^{x_1+1} \right] \right\}, \quad (16)$$

$$t_e = 4\eta / (\eta + 1)^2, \quad r_e = (\eta - 1)^2 / (\eta + 1)^2.$$

Входящие в формулы (16) величины  $x_1$  и  $x_2$  зависят только от параметров модифицированного гамма-распределения частиц по размерам  $\bar{a}$  и  $\mu$ . Это позволяет для любых допустимых значений  $\bar{a}$  и  $\mu$  заранее вычислить  $x_1$  и  $x_2$ . В Таблице 2.1 приведены расчетные значения  $x_1$  и  $x_2$ , полученные при использовании метода конфигураций [15]. Представление значения  $x_1$  и  $x_2$  соответствуют некоторым реальным параметрам  $\bar{a}$  и  $\mu$  для ледяных пластинок при  $n=1.31$ ,  $\chi=10^{-4}$ . Заметим, что те промежуточные значения  $x_1$  и  $x_2$ , которые не вошли в таблицу, могут быть получены путем интерполяции.

Таблица 3.1 – Константы  $x_1$  (верхняя строка) и  $x_2$  (нижняя строка), входящие в аналитическое выражение для коэффициента ослабления.

$\bar{a}$ , мкм	$\mu$					
	1	2	3	4	5	6
100	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	2,20	1,41	1,05	0,84	0,70	0,60
200	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	3,01	1,92	1,43	1,15	0,96	0,82
300	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	3,61	2,30	1,72	1,38	1,15	0,99
400	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	4,10	2,62	1,95	1,57	1,31	1,13
500	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	4,54	2,89	2,16	1,73	1,45	1,25
600	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	4,92	3,14	2,35	1,88	1,57	1,35
700	17,17	22,12	27,08	32,04	37,02	41,98
	5,28	3,37	2,51	2,01	1,68	1,44

Алгебраическая формула (14) позволяют проводить вычисления значений коэффициента ослабления с погрешностью не более 2.5% (см. таблицу 3.2). Методика получения аналитического выражения для расчета коэффициента ослабления для крупных горизонтально ориентированных пластинок для случая  $d = 2.020(2a)^{0.449}$ , может быть использована для вывода соответствующей характеристики при других соотношений фактора формы.

Таблица 3.2 – Сопоставительный анализ величины коэффициента ослабления, получаемой в точных вычислениях и на основе предложенного аналитического приближения,  $\eta=n+i\chi$  [25].

C=1 л <sup>-1</sup> , $\mu=4$ , $a_m=400$ мкм			
$\lambda$	$\alpha_{\text{ext}}$	$\tilde{\alpha}$	$(\alpha_{\text{ext}} - \tilde{\alpha})/\alpha_{\text{ext}} \cdot 100\%$
9	$1.901 \cdot 10^6$	$1.944 \cdot 10^6$	-2.24
9.1	$1.937 \cdot 10^6$	$1.98 \cdot 10^6$	-2.2
9.2	$1.974 \cdot 10^6$	$2.017 \cdot 10^6$	-2.12
9.3	$2.013 \cdot 10^6$	$2.054 \cdot 10^6$	-2
9.4	$2.052 \cdot 10^6$	$2.09 \cdot 10^6$	-1.86
9.5	$2.091 \cdot 10^6$	$2.126 \cdot 10^6$	-1.7
9.6	$2.129 \cdot 10^6$	$2.161 \cdot 10^6$	-1.53
9.7	$2.165 \cdot 10^6$	$2.194 \cdot 10^6$	-1.35
9.8	$2.2 \cdot 10^6$	$2.226 \cdot 10^6$	-1.17
9.9	$2.233 \cdot 10^6$	$2.255 \cdot 10^6$	-0.99
10	$2.263 \cdot 10^6$	$2.281 \cdot 10^6$	-0.82
10.1	$2.29 \cdot 10^6$	$2.305 \cdot 10^6$	-0.64
10.2	$2.314 \cdot 10^6$	$2.325 \cdot 10^6$	-0.47
10.3	$2.335 \cdot 10^6$	$2.342 \cdot 10^6$	-0.31
10.4	$2.353 \cdot 10^6$	$2.356 \cdot 10^6$	-0.15
10.5	$2.367 \cdot 10^6$	$2.367 \cdot 10^6$	0
10.6	$2.377 \cdot 10^6$	$2.374 \cdot 10^6$	0.14
10.7	$2.383 \cdot 10^6$	$2.377 \cdot 10^6$	0.27
10.8	$2.386 \cdot 10^6$	$2.377 \cdot 10^6$	0.39
10.9	$2.385 \cdot 10^6$	$2.373 \cdot 10^6$	0.5
11	$2.38 \cdot 10^6$	$2.365 \cdot 10^6$	0.6
11.5	$2.3 \cdot 10^6$	$2.279 \cdot 10^6$	0.92

## **4 РАЗРАБОТКА ПРОГРАММНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОСЛАБЛЕНИЯ**

### **4.1 АЛГОРИТМ РАСЧЕТА ОСЛАБЛЕНИЯ**

Для реализации численными методами полидисперсной среды для расчета характеристик ослабления был разработан алгоритм. В качестве модели среды рассматривалась система горизонтально ориентированных пластинок.

Алгоритм, построенный по формулам из главы 3, состоит из следующих этапов:

- Выбор входных параметров
  - Ввод вручную
  - Использование баз данных
- Функция распределения частиц по размерам
  - Интегральный закон
  - Дифференциальный закон
- Расчеты характеристик
  - Среднее значение (мат. ожидание)
  - Дисперсия
  - Среднеквадратическое отклонение
  - Сечение и фактор ослабления для отдельной частицы
  - Коэффициент ослабления и фактор ослабления для системы частиц
  - Оценка возможных границ изменения размеров частиц

На рисунке 4.1 представлен обобщенный алгоритм расчета характеристик ослабления оптического излучения как для отдельной частицы, так и для системы горизонтально ориентированных пластинок.

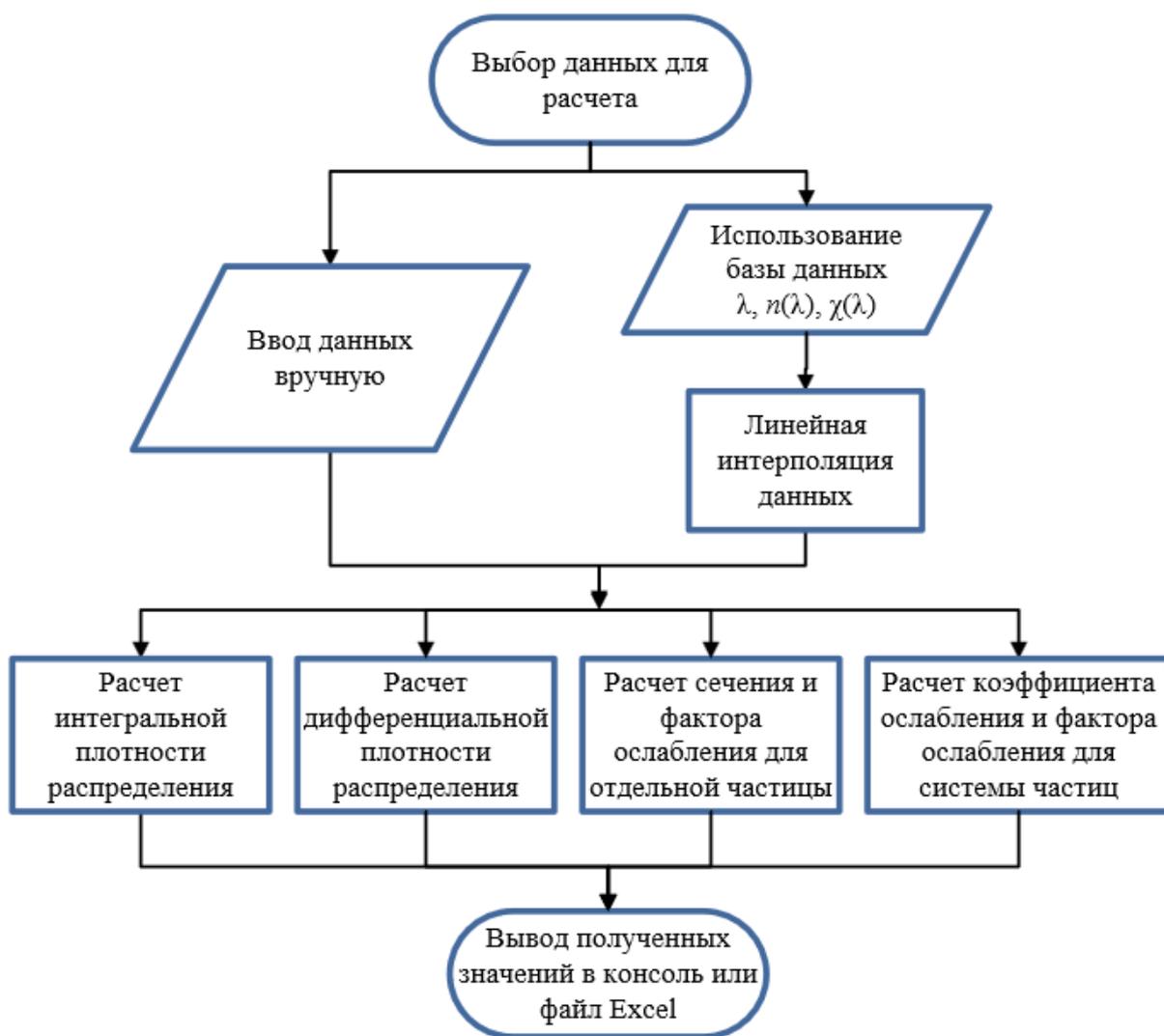


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма расчета характеристик ослабления оптического излучения.

На рисунке 4.2 продемонстрирована блок-схема для расчета коэффициента ослабления и фактора ослабления для системы частиц, где более подробно рассмотрен процесс вычисления необходимых значений при различных параметрах моделируемой полидисперсной среды.

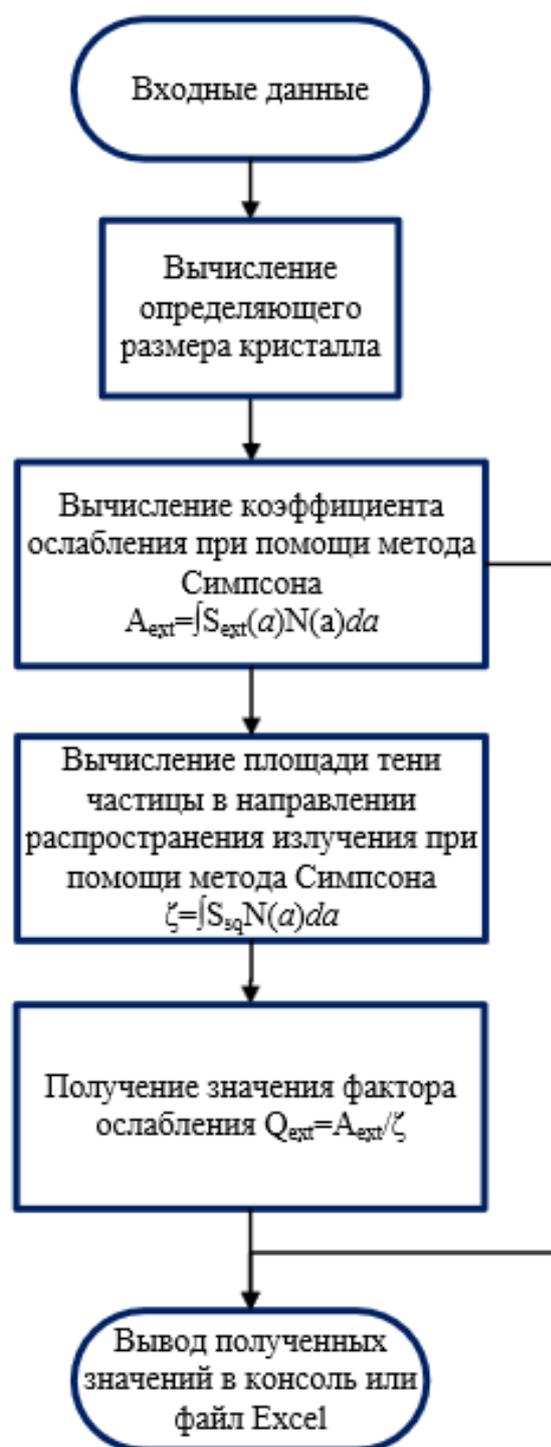


Рисунок 4.1 – Блок-схема алгоритма для расчета коэффициента ослабления и фактора ослабления для системы частиц

В алгоритме имеется возможность для выбора входных параметров, которые необходимы для расчета характеристик. При вводе данных вручную можно вычислять значения в частных случаях и проводить быстрые тестирования. В другом случае идет обращение к базе данных, где отражена

зависимость комплексного показателя преломления льда от длины волны излучения. Встроенная база данных имеет высокое разрешение, что особенно важно, когда необходимо учитывать газовые составляющие среды наряду с дисперсными составляющими. В перспективе можно было бы реализовать считывание данных и с других источников.

В данном алгоритме использовалось модифицированное гамма-распределение частиц по размерам, которое наиболее часто используется при моделировании полидисперсной среды. В дальнейшем так же можно рассмотреть и другие распределения, например, такие как двухмодальное, экспоненциальное и другие.

В качестве примера приведем необходимые входные параметры для расчета ослабления: длина волны ( $\lambda$ ), комплексный показатель преломления частицы ( $\eta = n + i\chi$ ), радиус частицы ( $a$ ), концентрация частиц ( $C$ ), коэффициент  $\mu$ , а также границы интегрирования, которые необходимы для метода Симпсона, который использовался при вычислениях.

## 4.2 ОСОБЕННОСТИ РАЗРАБОТАННОЙ ПРОГРАММЫ

Для реализации программного комплекса был выбран язык программирования C++. Он содержит в себе большое множество эффективных инструментов, подобных макросам препроцессора, шаблонам и перегрузкам операторов. Также он сочетает свойства как высокоуровневых, так и низкоуровневых языков. В нем наибольшее внимание уделено поддержке объектно-ориентированного и обобщённого программирования. При грамотном его использовании разработчики могут создавать очень ясные и простые в сопровождении программы. Так, область его применения включает создание операционных систем, разнообразных прикладных программ, драйверов устройств, приложений для встраиваемых систем, высокопроизводительных серверов и видеоигр.

В качестве среды разработки использовалась Visual Studio, которая предоставляет возможность разрабатывать приложения различного вида от

консольных до веб-сайтов и использовать широкий выбор инструментальных средств. При её использовании имеется возможность создания интерфейса, который может состоять из различных элементов для ввода и отображения необходимой информации. В данной работе был сделан акцент на разработке ядра программы, в виду этого интерфейс находится в процессе разработки.

В программе производится довольно много математических расчетов. Заголовочный файл `math.h` содержит прототипы библиотечных математических функций и позволяет вызывать их не требуя написания дополнительных функций.

```
#include <math.h>
```

Для действий с комплексными числами был подключен заголовочный файл `complex`.

```
#include <complex>
```

Был предусмотрен вывод результатов в консоль или в файл Excel. Вывод в консоль предусмотрен для расчета ослабления в одном определенном случае, что позволило проверять правильность получаемых значений в процессе разработки. Вывод значений в Excel дал возможность внести их в Origin для отображения зависимостей. Для этого был подключен заголовочный файл для чтения или записи данных в файл.

```
#include <fstream>
```

При помощи вызова метода Симпсона выполняется вычисление ослабления.

```
double Simpson(double a, double b, double n, double am, double nu, double dv, double pm1, double pm2)
```

Метод Симпсона в свою очередь вызывает функцию `NaSext`, которая вычисляет коэффициент ослабления в сечении отдельной частицы.

```
double NaSext(double x, double am, double nu, double dv, double pm1, double pm2)
```

Полный листинг программы представлен в ПРИЛОЖЕНИИ А.

## 5 РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННЫХ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

Рассмотрим результаты расчетов характеристик ослабления оптического излучения, прошедшего через систему горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов. При расчете входными параметрами являлись: геометрические размеры частиц ( $a$ ,  $d$ ), значения комплексного показателя преломления ( $n$ ,  $\chi$ ), параметры распределения частиц по размерам ( $C$ ,  $\mu$ ,  $\bar{a}$ ) и длина волны ( $\lambda$ ).

На рисунках 5.1–5.8 иллюстрируются результаты расчета коэффициента ослабления ( $A_{\text{ext}}$ ) в зависимости от длины волны видимого и ИК диапазонов в случае частиц из чистого льда с учетом показательной зависимости размеров частиц  $d=2.020(2a)^{0.449}$ , а также зависимости комплексного показателя преломления от длины волны. На нечетных рисунках представлены графики при различных средних значениях размеров частиц в диапазонах длин волн от 0,5 до 15 мкм, а на четных показаны участки от 2 до 3 мкм, где проявляется область эффекта Христиансена ( $\lambda=2.85$  мкм), где амплитуда оптических характеристик существенно меняется при изменении размеров частиц. При детальном рассмотрении графиков можно прийти к следующим выводам: быстро осциллирующий характер  $A_{\text{ext}}(\lambda)$  преимущественно наблюдается в видимом и ближнем ИК диапазоне; с увеличением  $\mu$  проявляется резонансный эффект, при котором увеличивается амплитуда колебаний значений показателя преломления и постепенно уменьшается период колебаний, однако при этом среднее значение коэффициента ослабления уменьшается; при увеличении среднего значения размеров частиц увеличивается среднее значение показателя преломления и уменьшается количество и амплитуда колебаний;

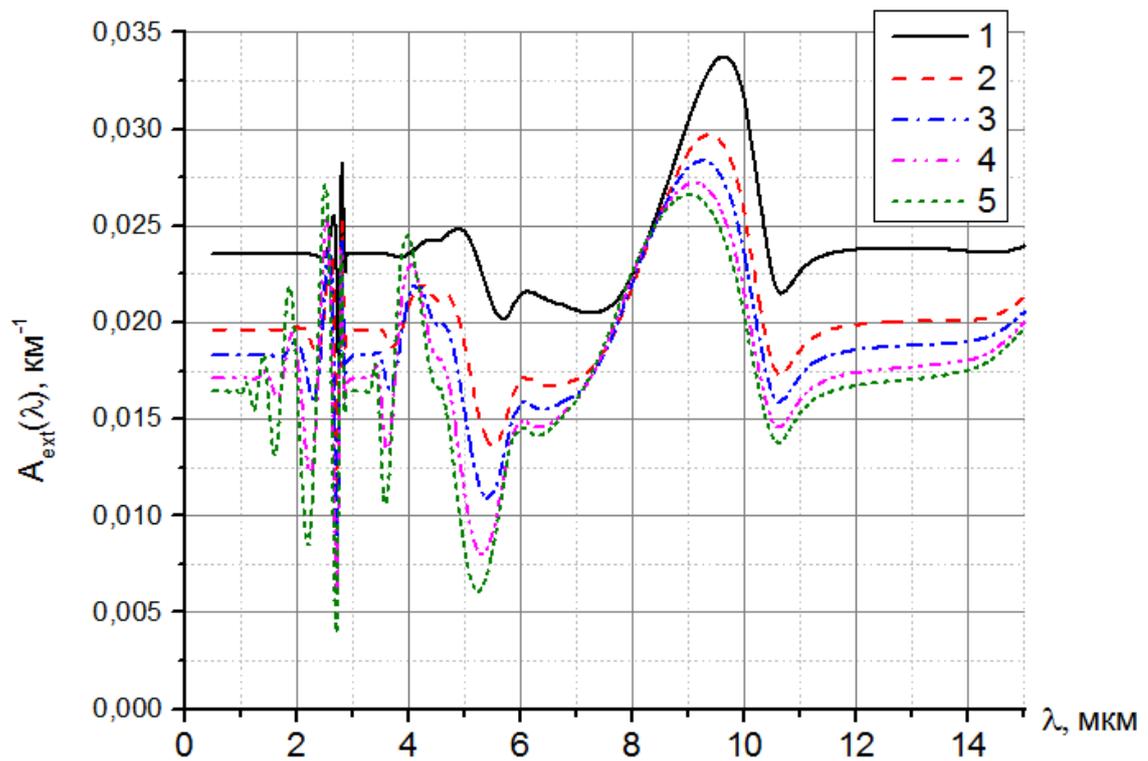


Рисунок 5.1 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1$  л $^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

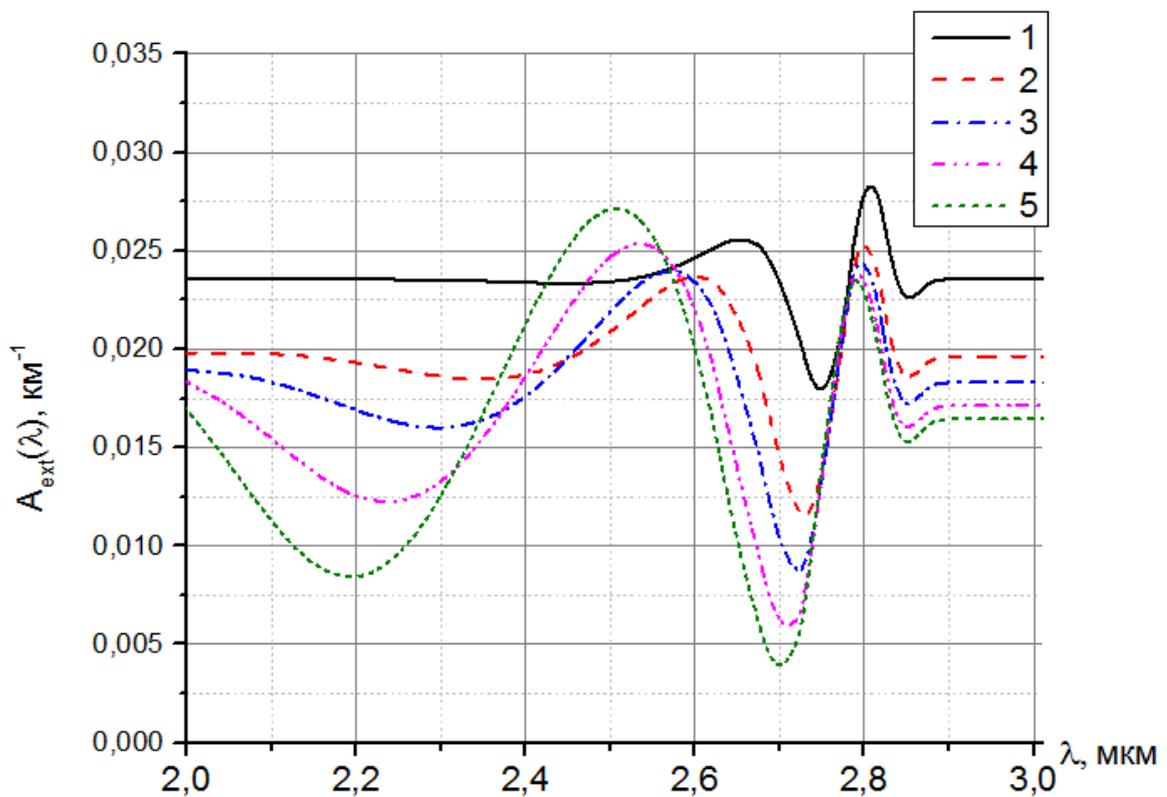


Рисунок 5.2 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1$  л $^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

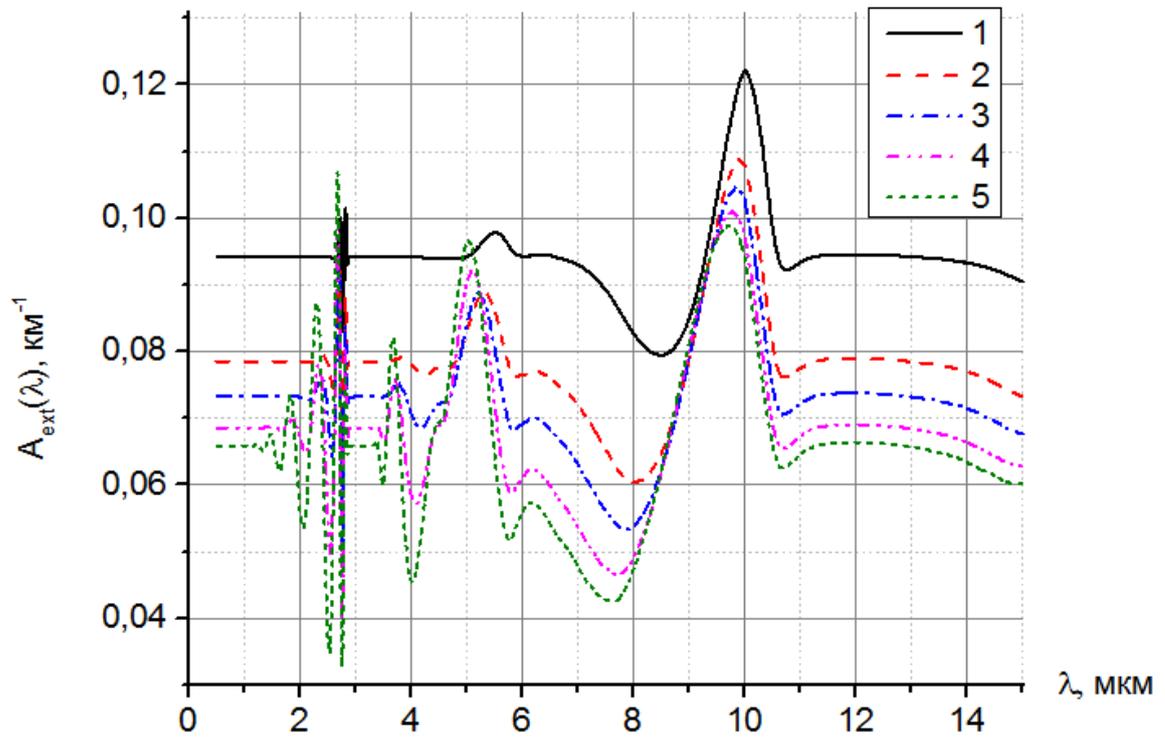


Рисунок 5.3 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

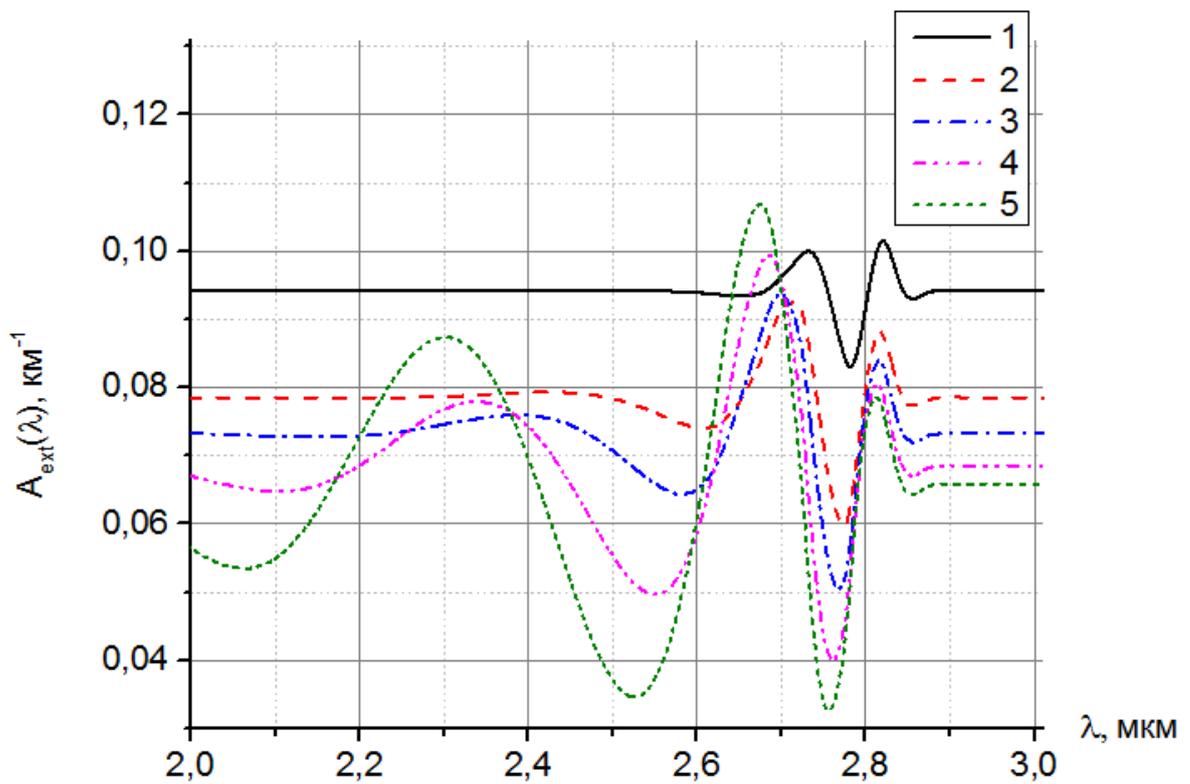


Рисунок 5.4 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

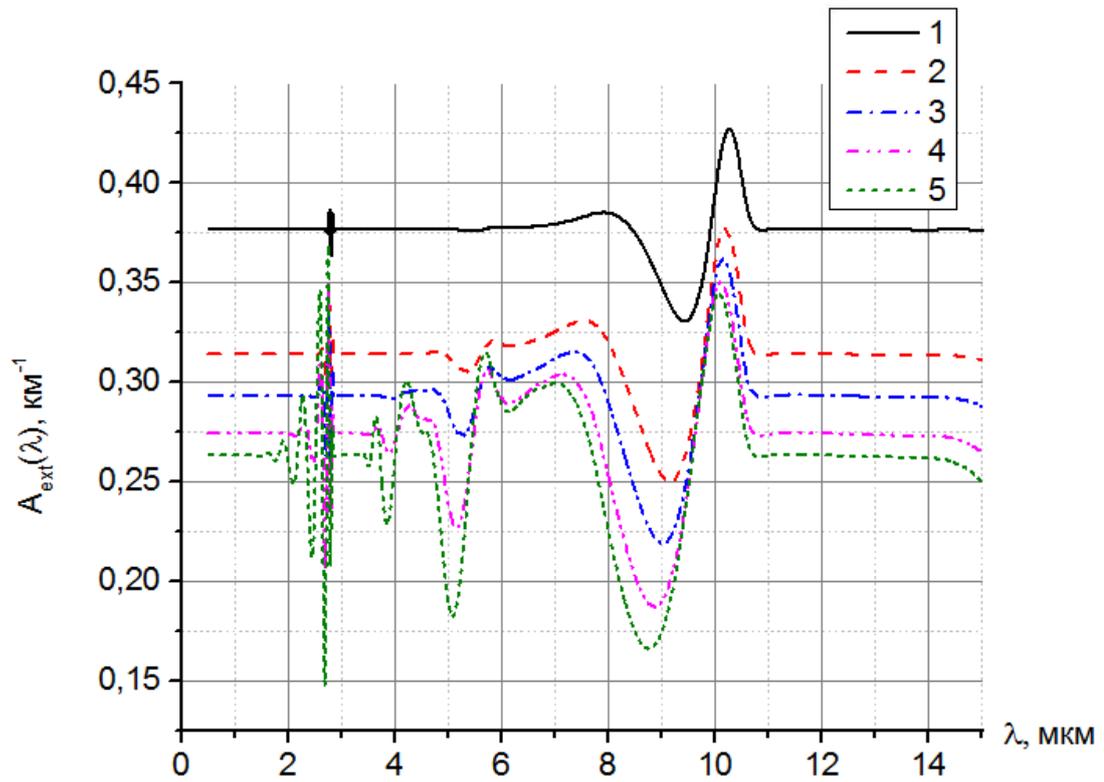


Рисунок 5.5 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

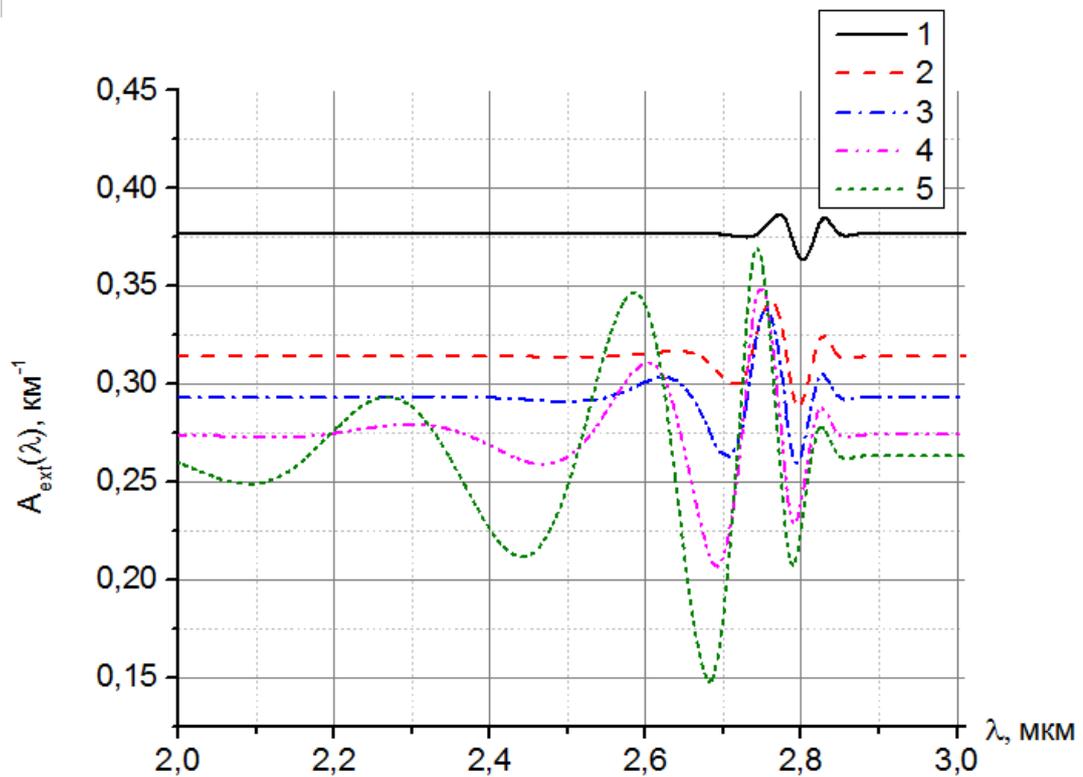


Рисунок 5.6 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

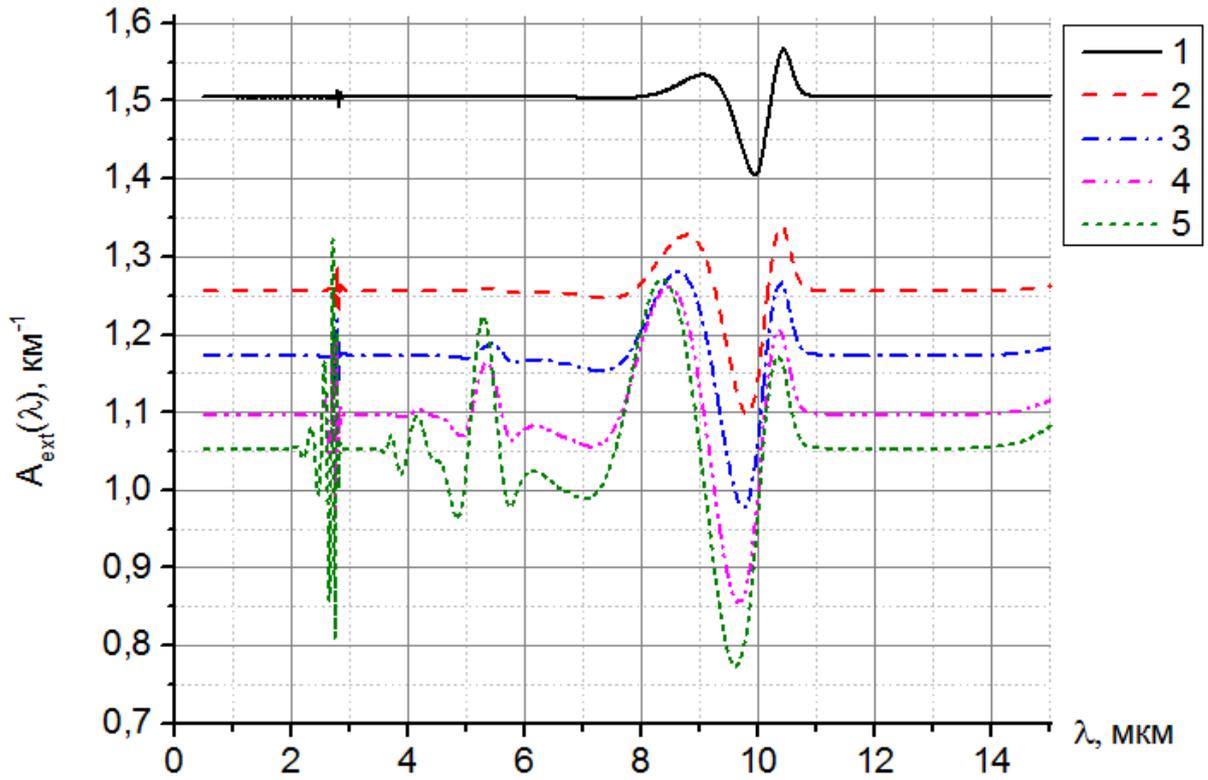


Рисунок 5.7 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

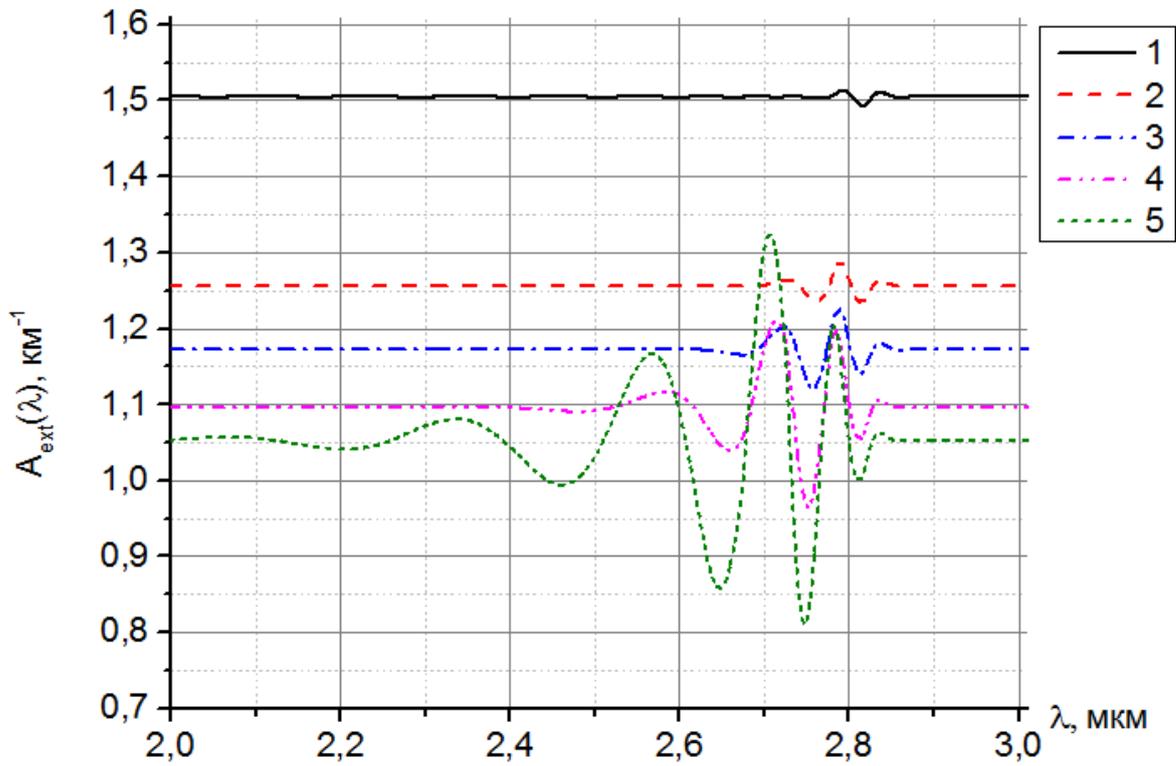


Рисунок 5.8 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ .

На рисунках 5.9–5.32 продемонстрированы результаты расчета коэффициента ослабления ( $A_{\text{ext}}$ ) в зависимости от длины волны видимого и ИК диапазонов в случае частиц из чистого льда при фиксированных размерах частиц  $d = a/10$ ,  $d = a/20$ ,  $d = a/50$ , а также при зависимости комплексного показателя преломления от длины волны. Приведённые графики также были продублированы, т.к. в диапазоне длин волн от 2 до 3 мкм, где проявляется эффект Христиансена, кривые сливаются друг с другом, поэтому этот диапазон рассматривается отдельно на четных рисунках. У всех приведенных рисунков можно отметить точку локального минимума в области 10.5 мкм. Как и в предыдущем случае можно отметить, что с увеличением среднего значения размеров частиц график будет стремиться к горизонтальной прямой, что наблюдается на рисунке 5.15 в сравнении с рисунками 5.9, 5.11 и 5.13. Также вновь при увеличении  $\mu$  увеличивается амплитуда колебаний значений показателя преломления и постепенно уменьшается период колебаний, однако при этом среднее значение коэффициента ослабления уменьшается. При сравнении рисунков, где отличие только в толщине пластинок, наблюдается увеличение амплитуд колебаний значений коэффициента ослабления при уменьшении толщины частиц, что наиболее просто заметить при больших значениях средних значений размеров частиц на рисунках 5.15, 5.23 и 5.31, а при рассмотрении графиков при малых значениях средних размеров пластинок уменьшается количество колебаний и максимально увеличивается амплитуда колебаний, что показано на рисунках 5.9, 5.17 и 5.25.

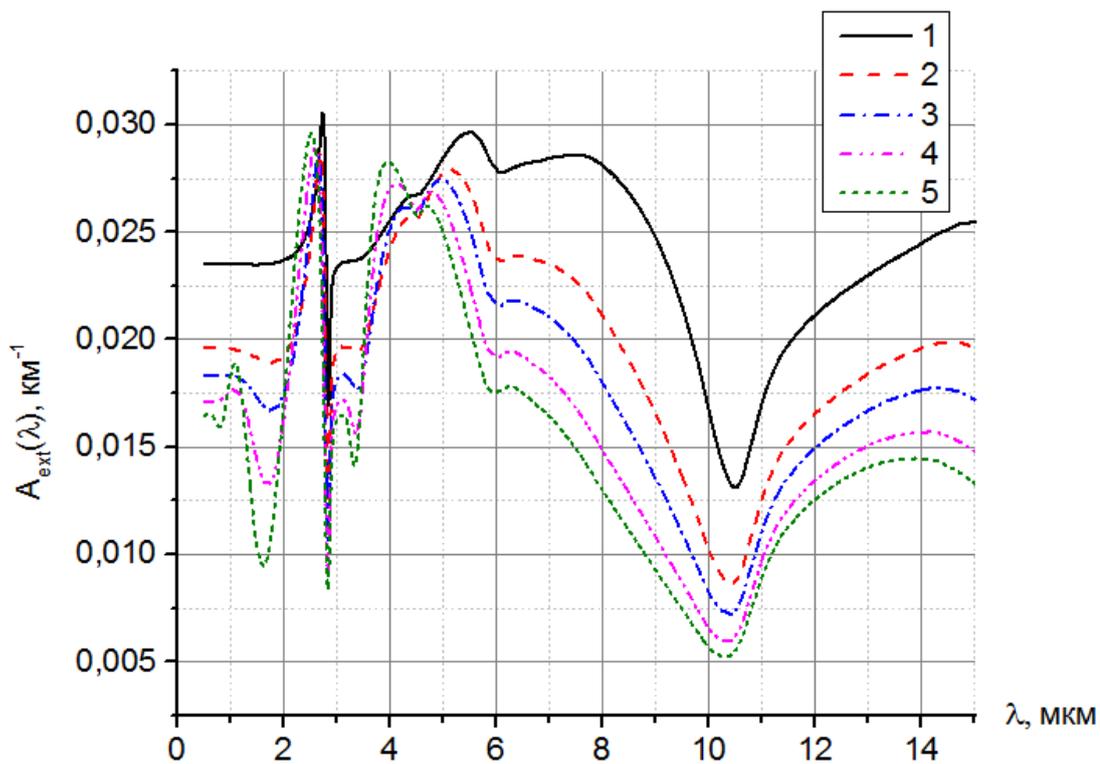


Рисунок 5.9 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лёд,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

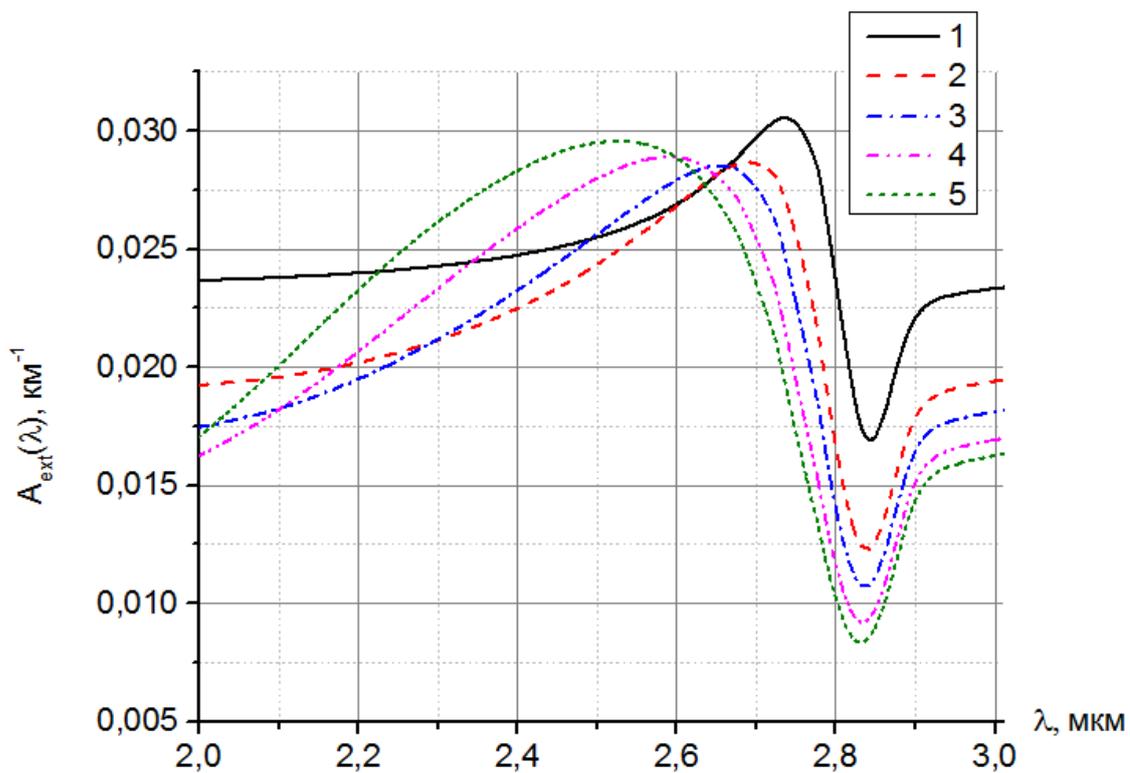


Рисунок 5.10 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лёд,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

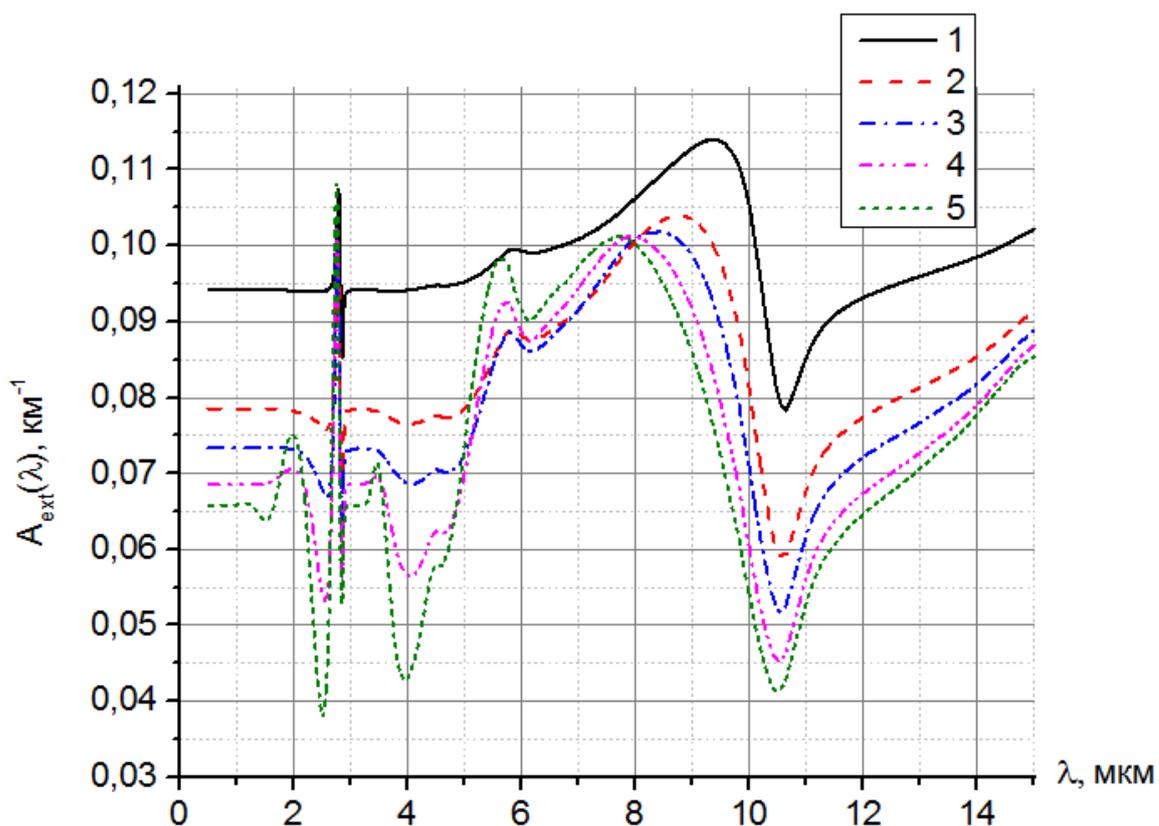


Рисунок 5.11 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

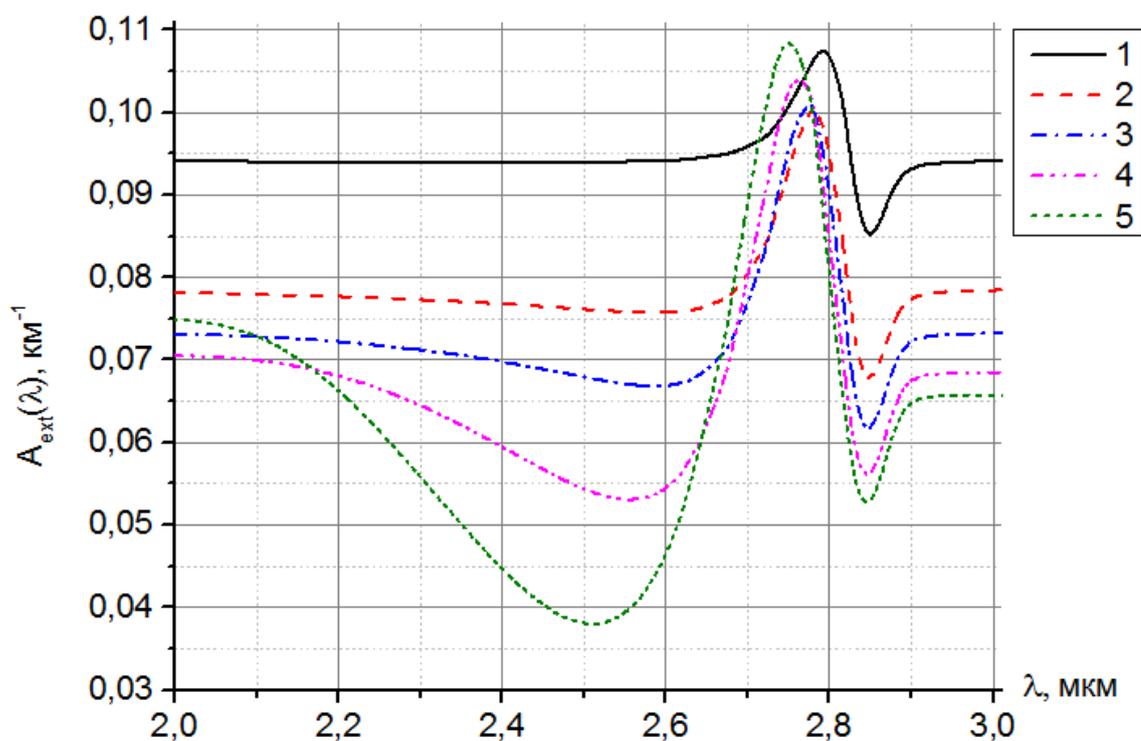


Рисунок 5.12 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

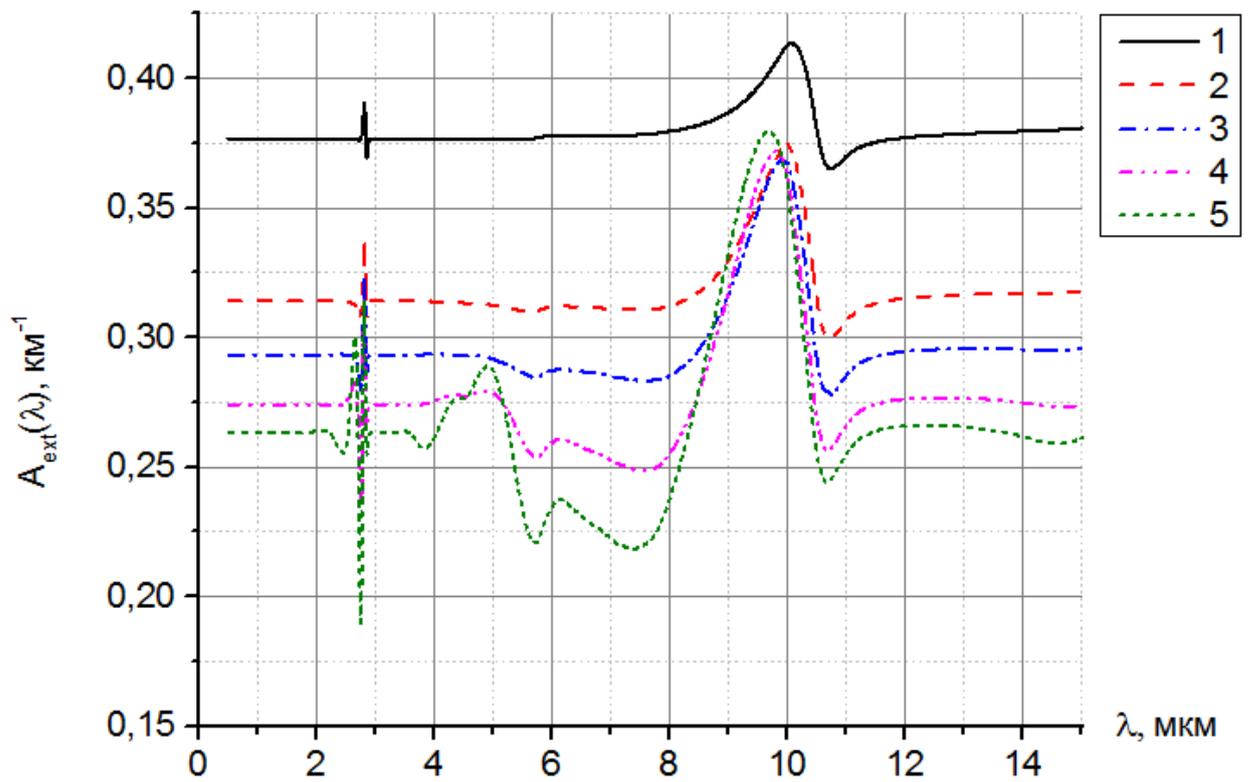


Рисунок 5.13 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

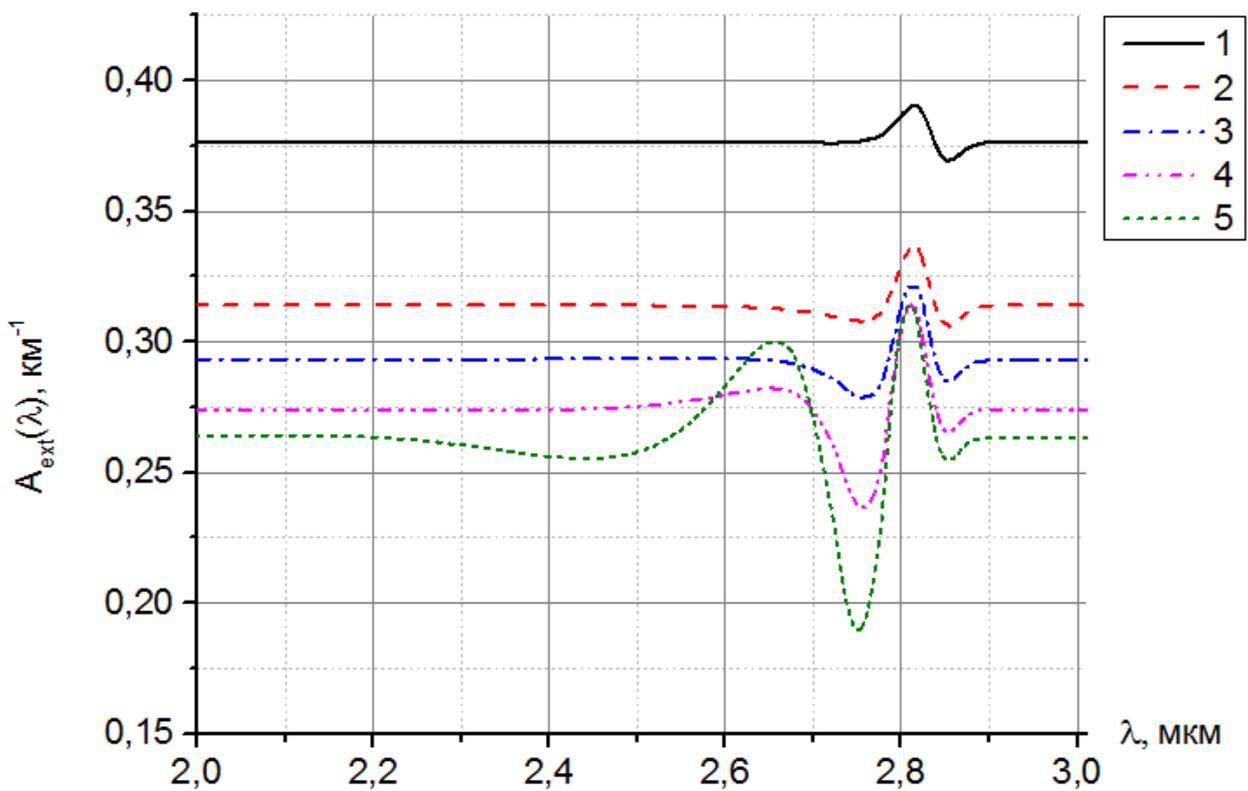


Рисунок 5.14 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

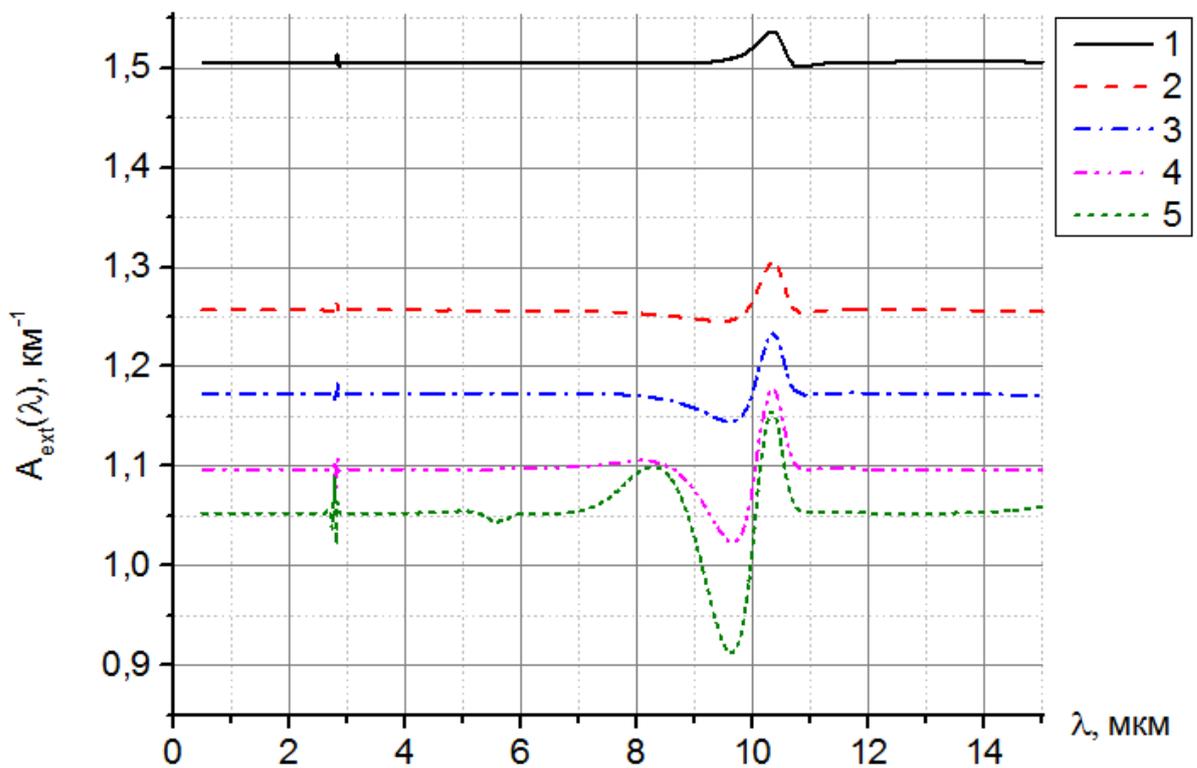


Рисунок 5.15 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

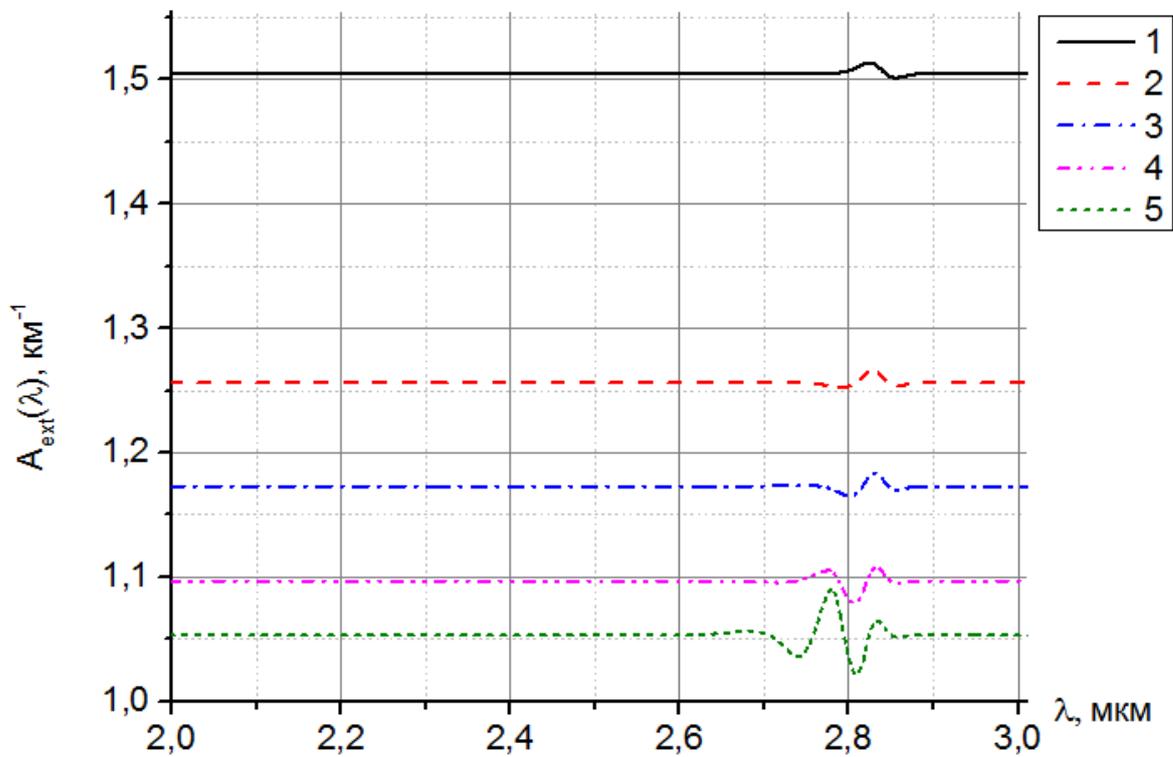


Рисунок 5.16 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/10$ .

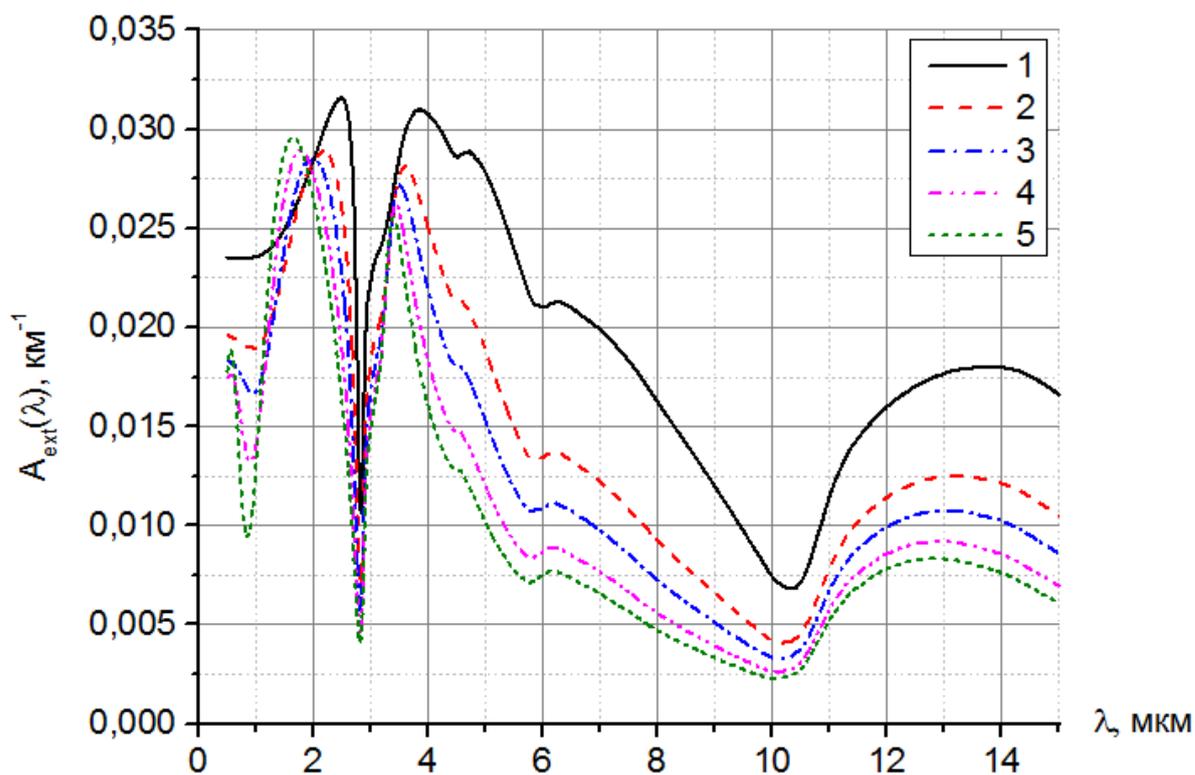


Рисунок 5.17 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

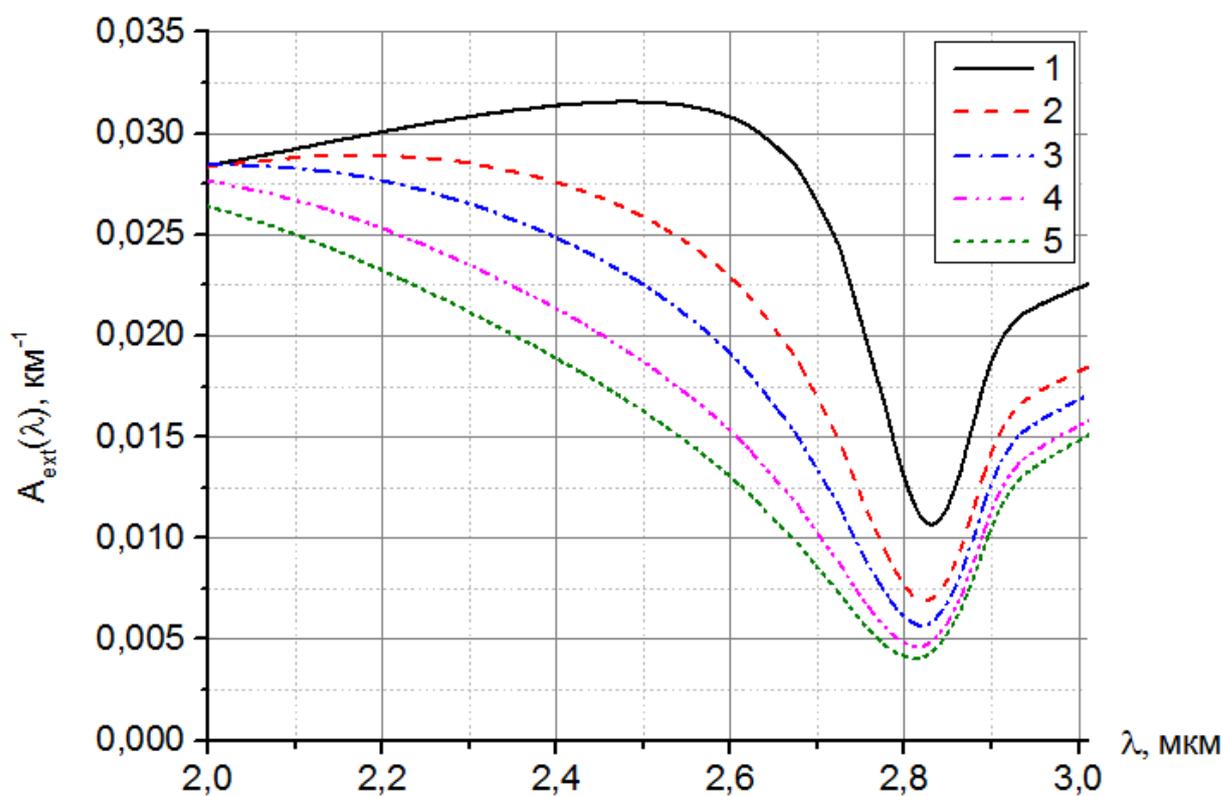


Рисунок 5.18 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

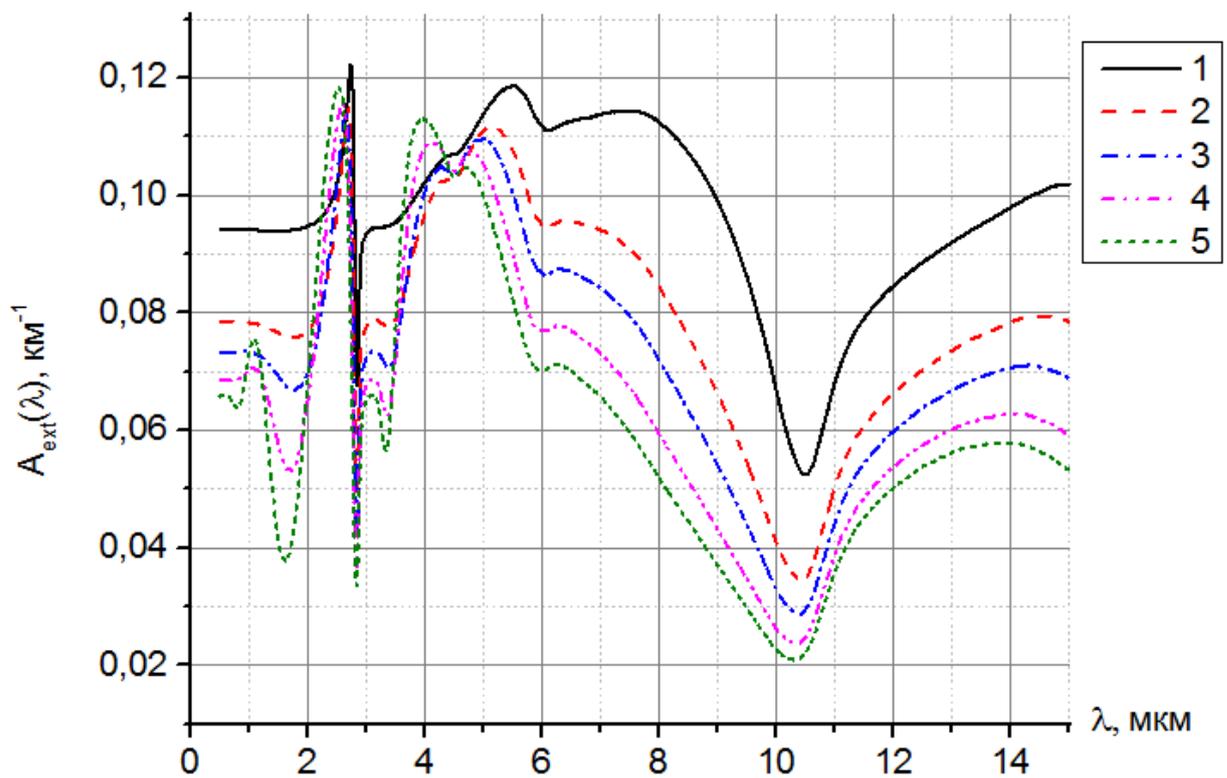


Рисунок 5.19 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

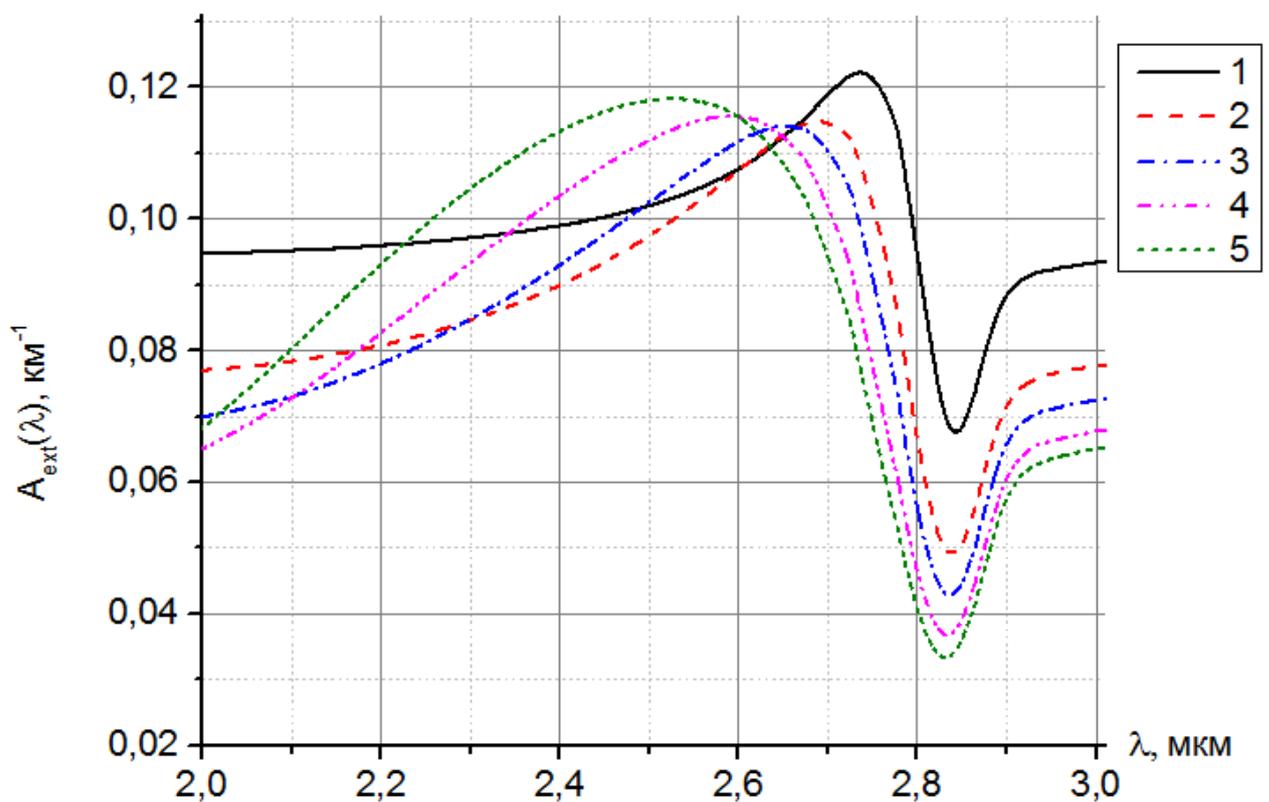


Рисунок 5.20 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

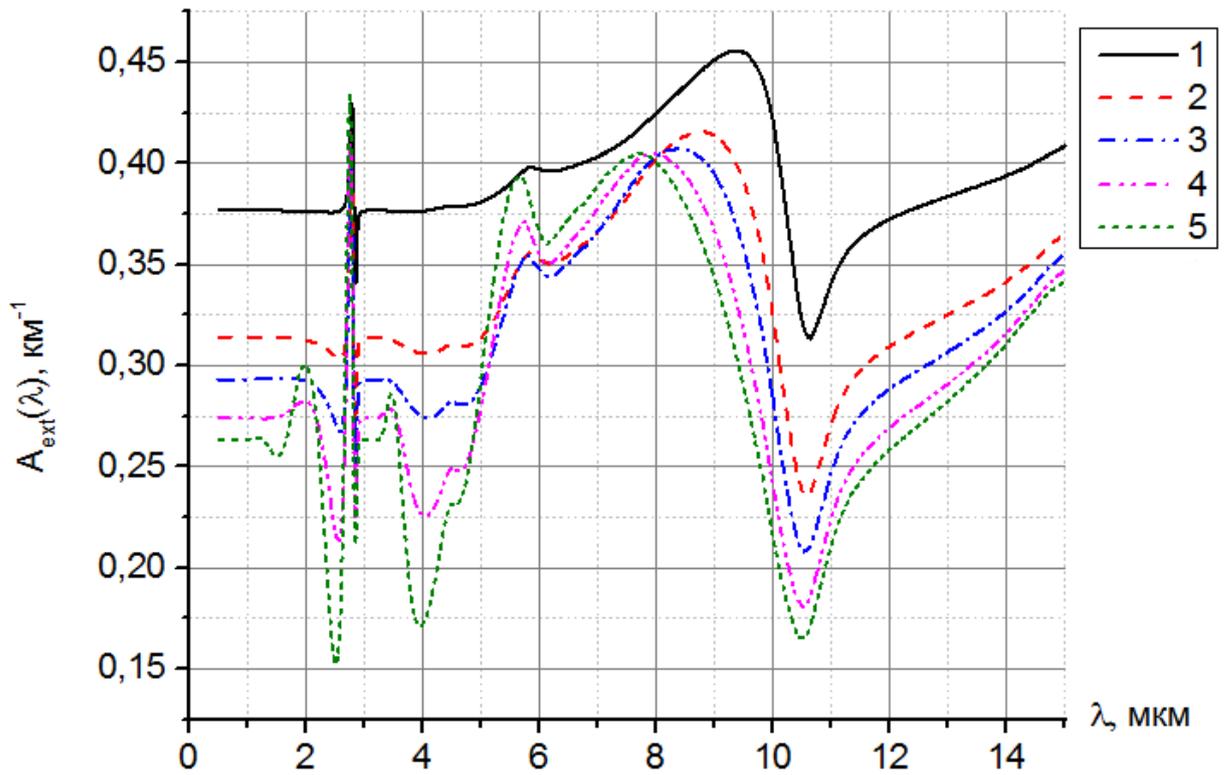


Рисунок 5.21 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

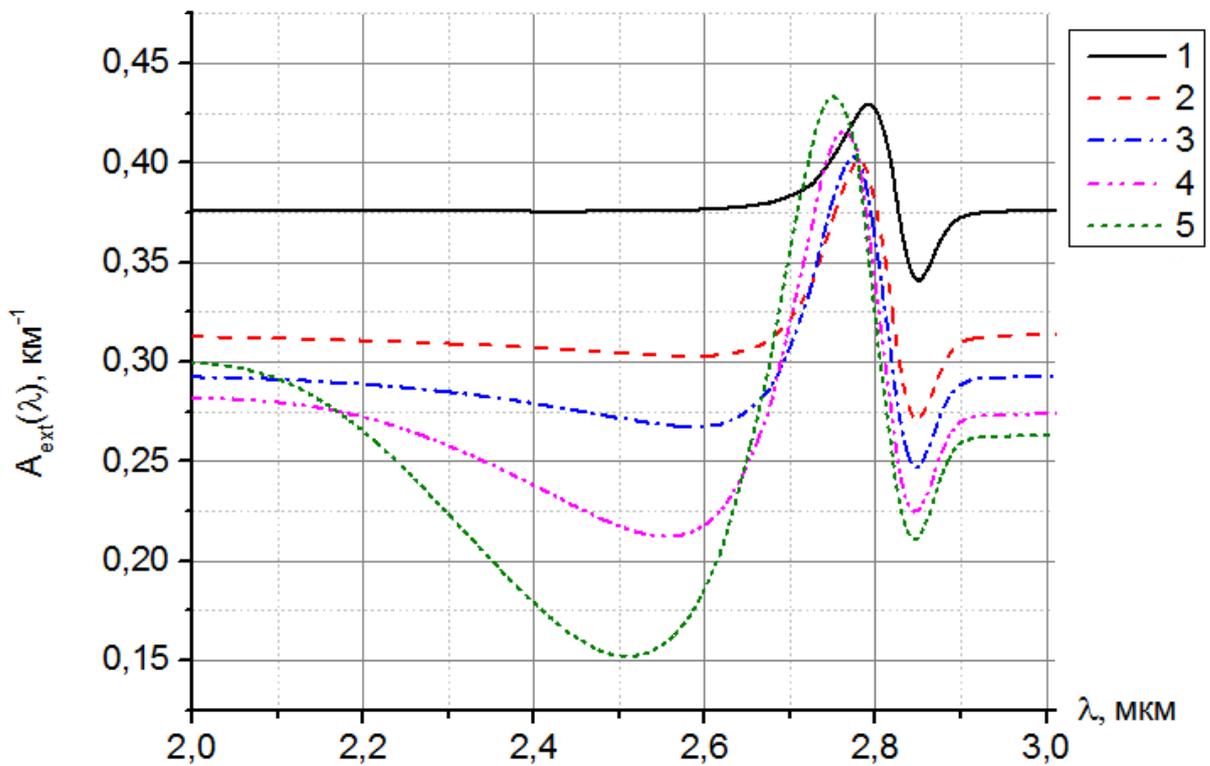


Рисунок 5.22 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1$  л<sup>-1</sup>, 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

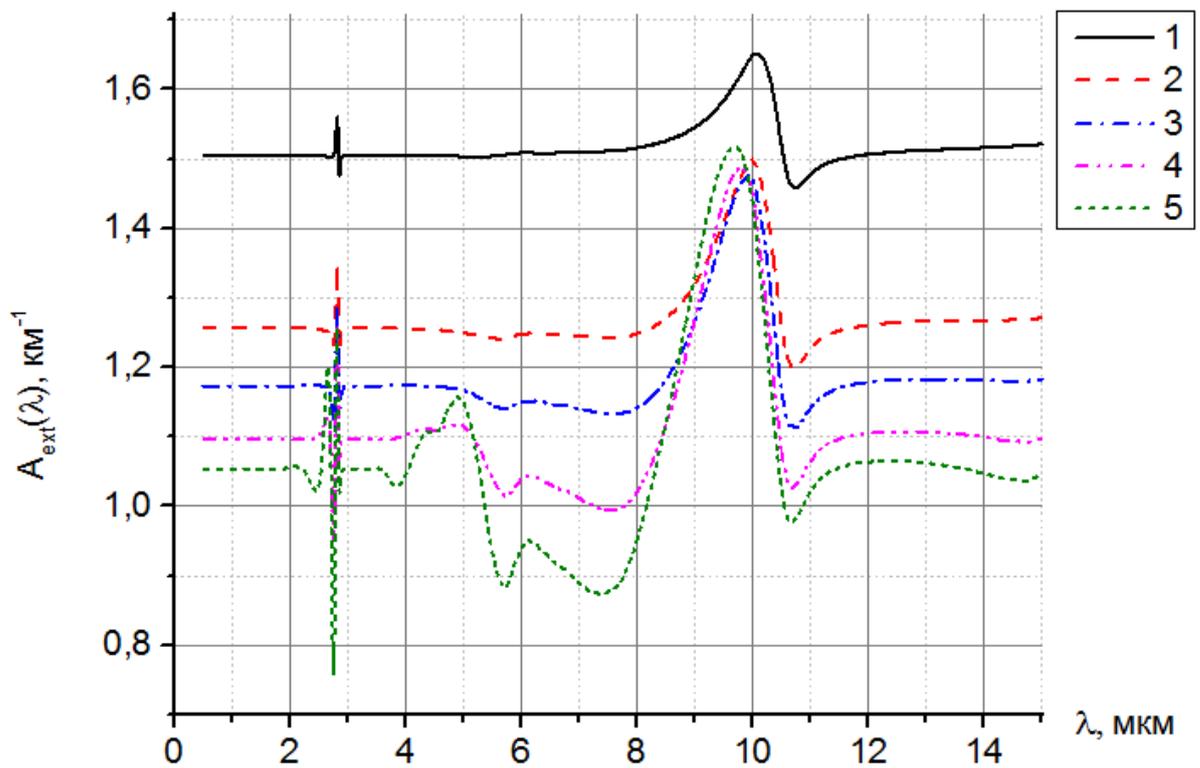


Рисунок 5.23 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

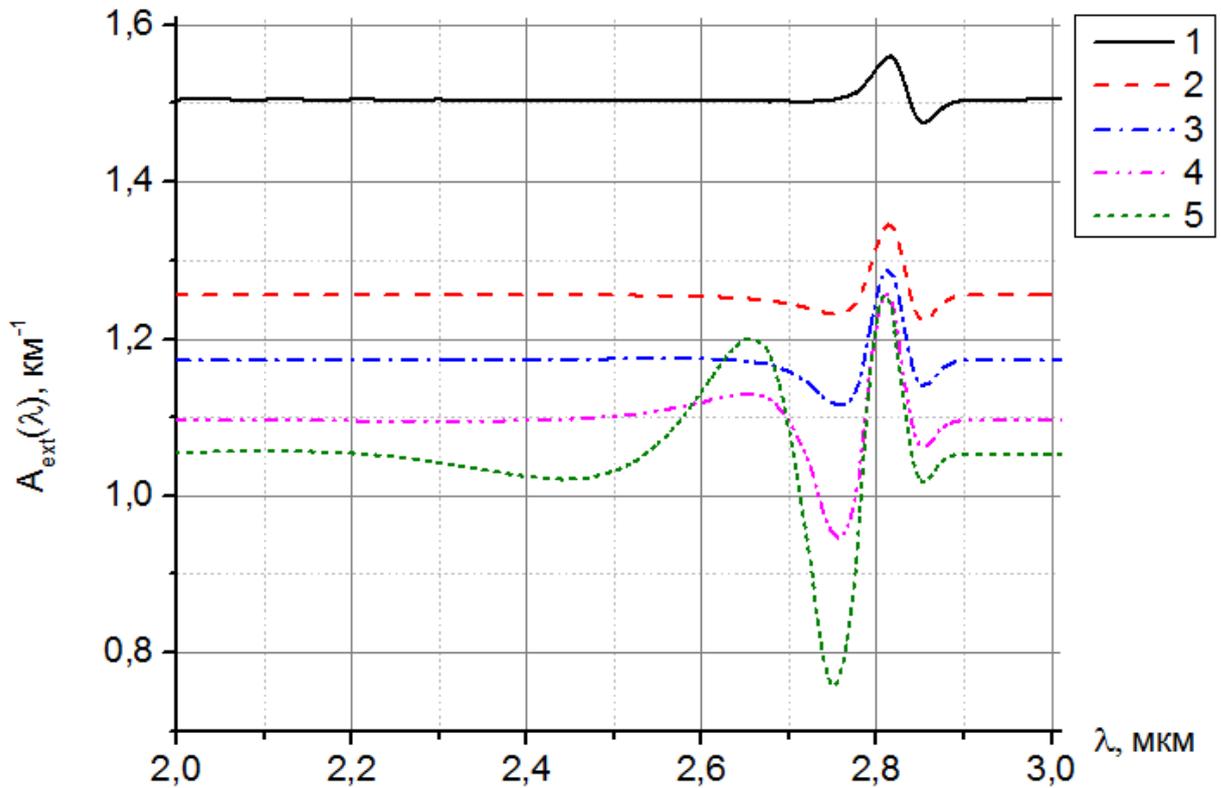


Рисунок 5.24 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/20$ .

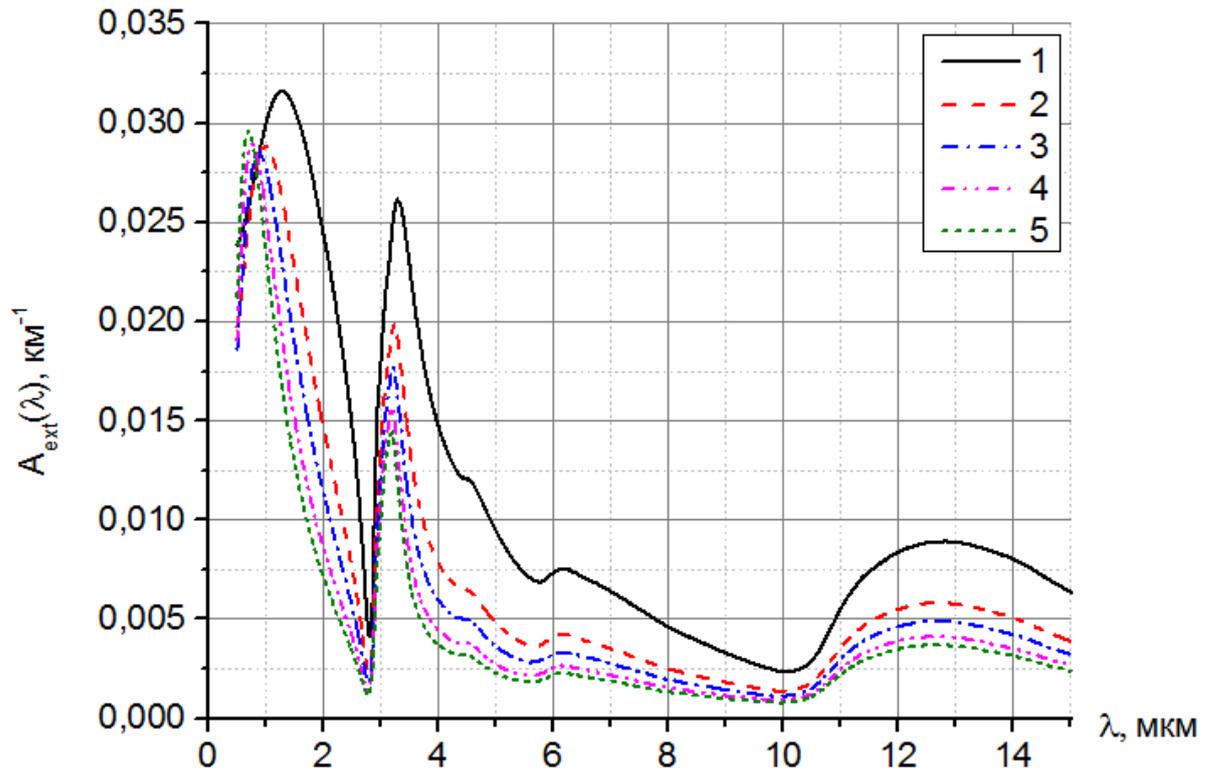


Рисунок 5.25 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

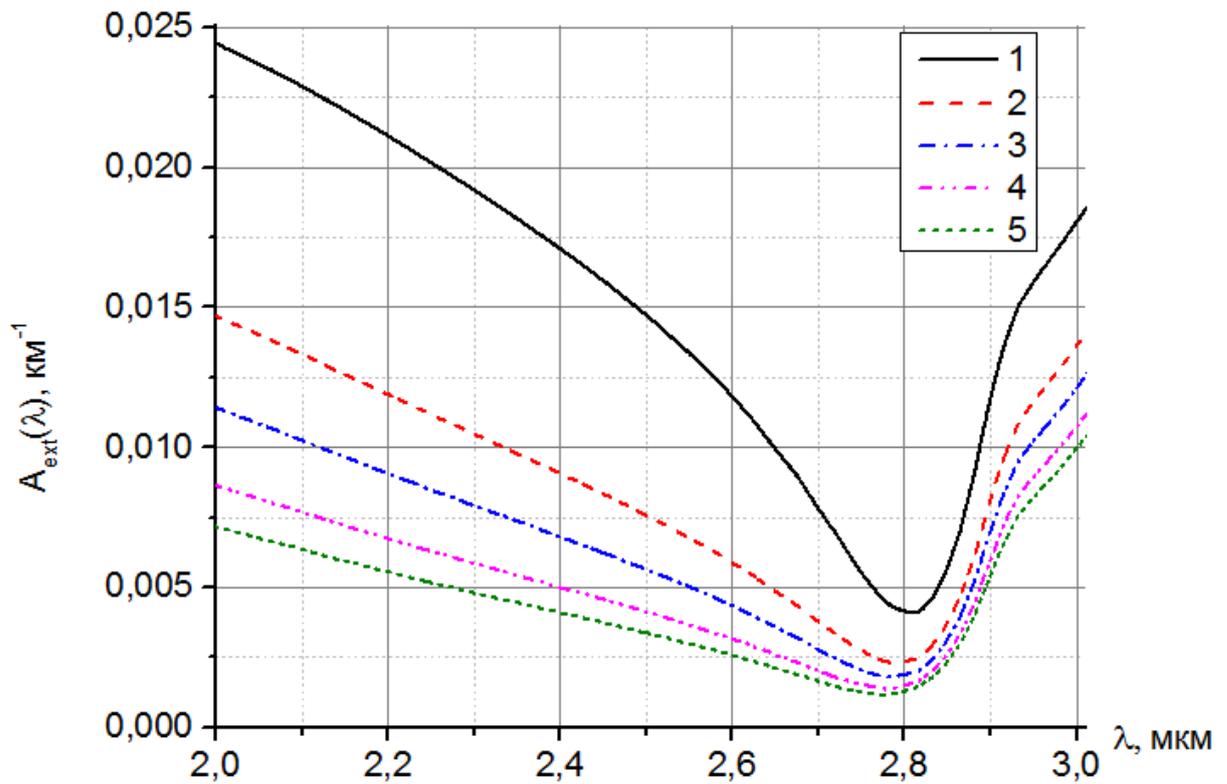


Рисунок 5.26 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=50$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

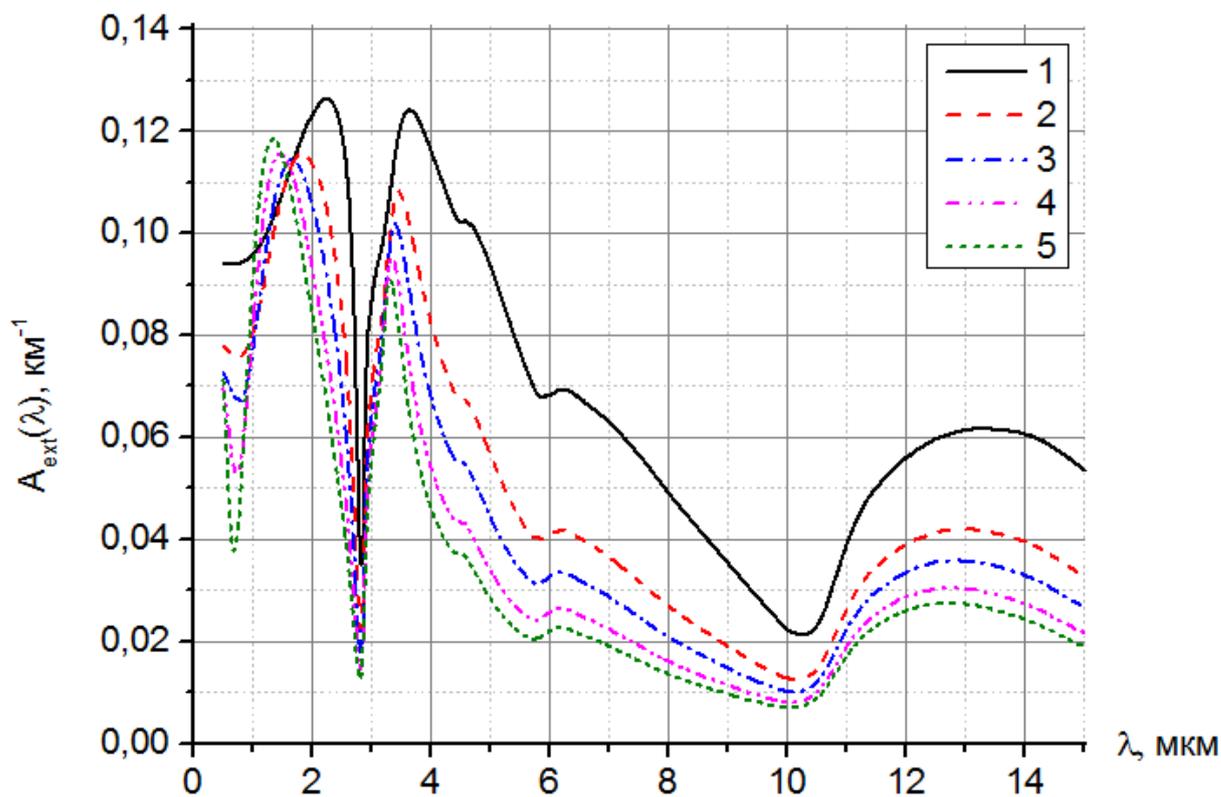


Рисунок 5.27 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

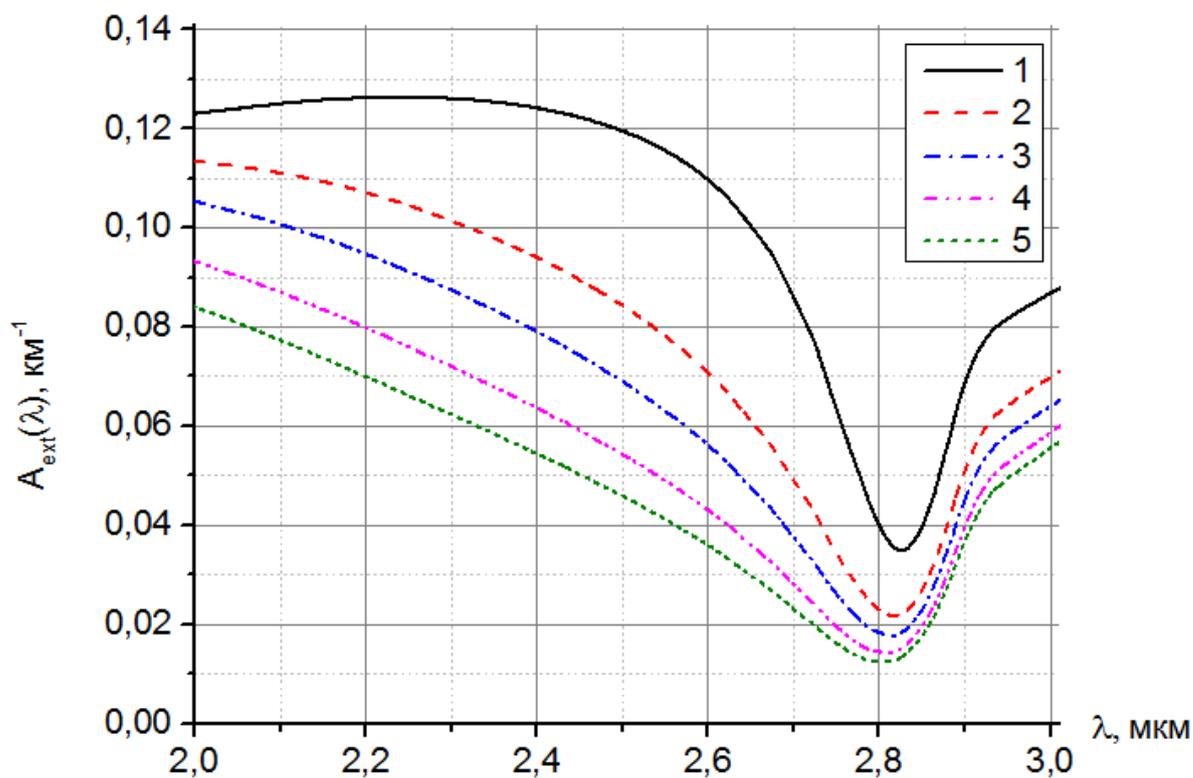


Рисунок 5.28 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=100$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

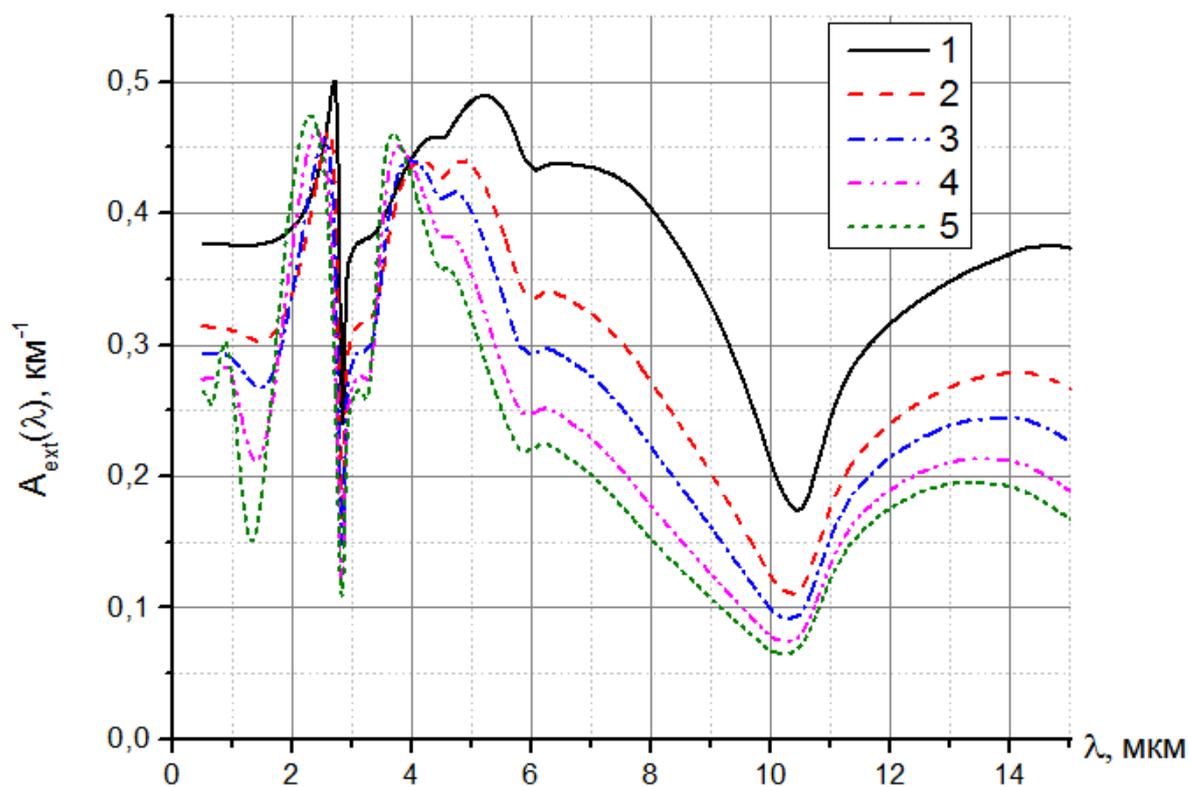


Рисунок 5.29 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

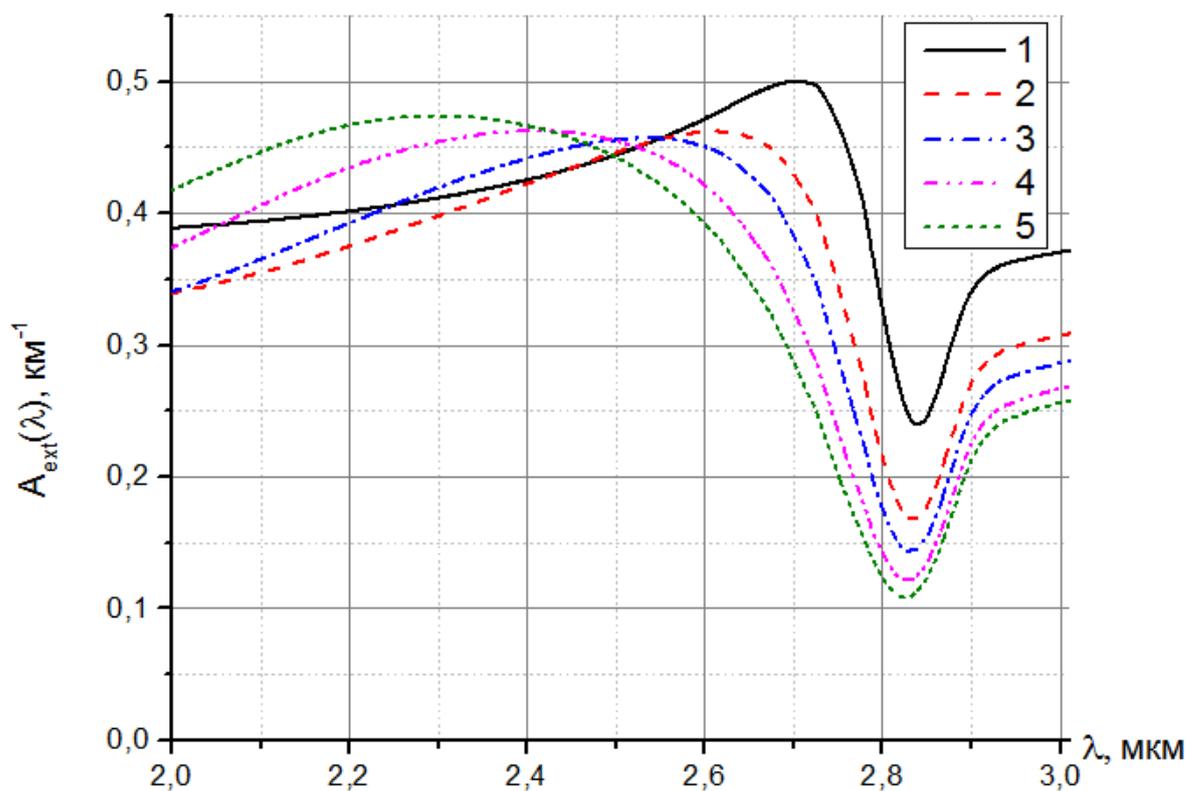


Рисунок 5.30 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=200$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

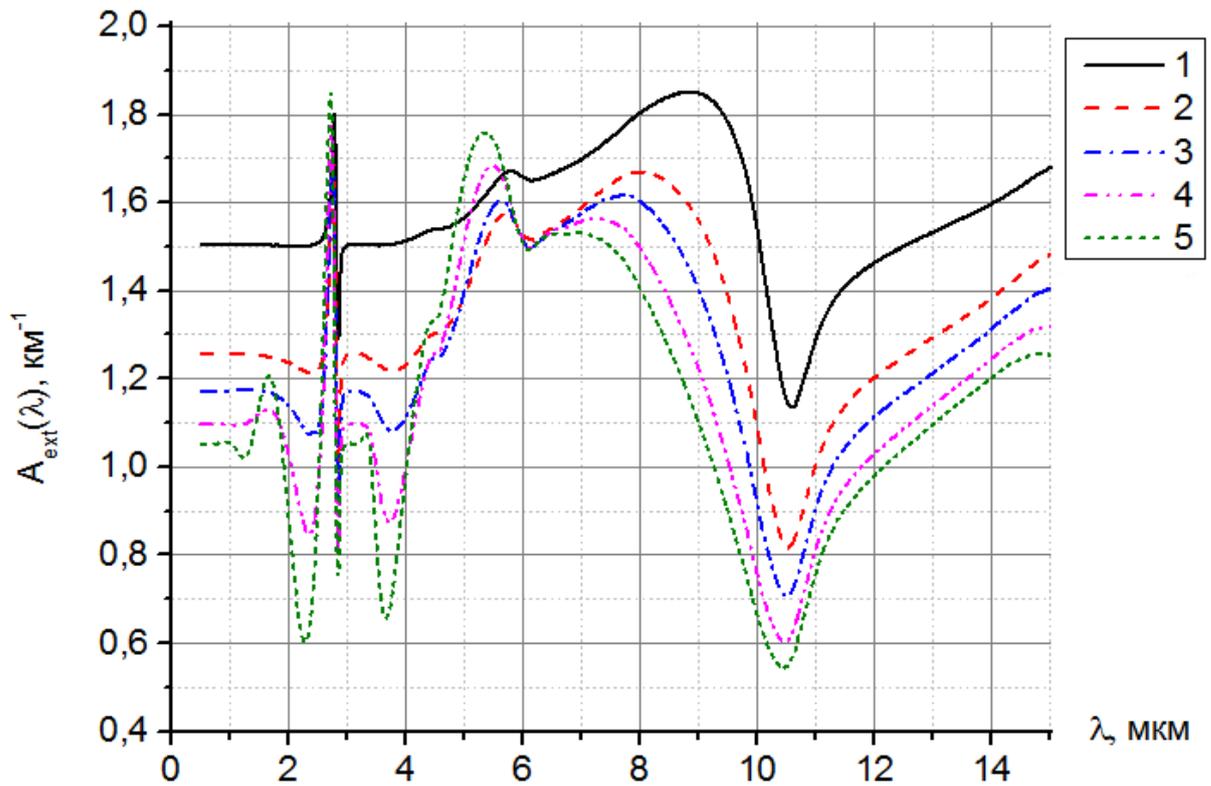


Рисунок 5.31 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 0.5 до 15 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

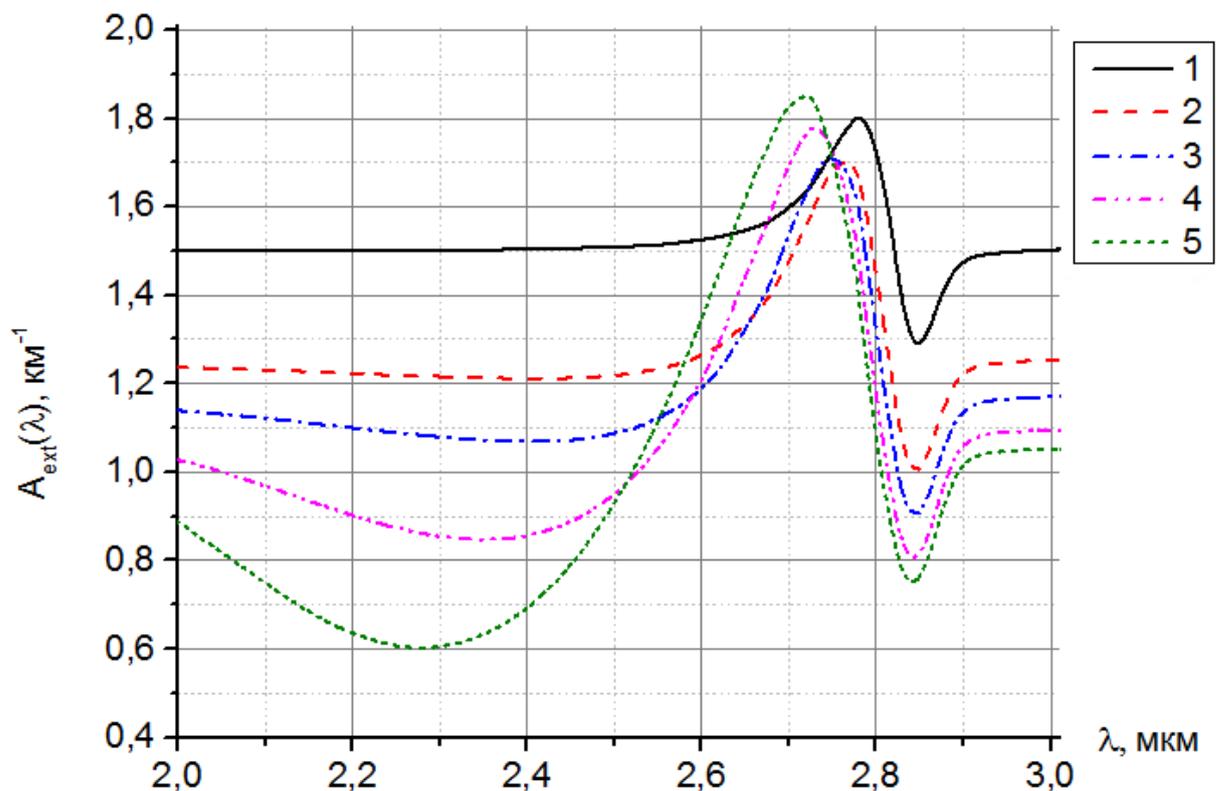


Рисунок 5.32 –  $A_{\text{ext}}$  при  $\lambda$  от 2 до 3 мкм, чистый лед,  $\bar{a}=400$  мкм,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ , 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ , 5 –  $\mu=20$ ,  $d = a/50$ .

На рисунках 5.33 и 5.34 приведены графики фактора ослабления ( $Q_{\text{ext}}(\nu)$ ) в зависимости от частоты видимого и ИК диапазонов излучения в случае частиц из чистого льда при различных значениях  $\mu$  при  $d=2.020(2a)^{0.449}$ . Для сопоставления частот с длинами волн была добавлена шкала длин волн на верхней горизонтальной оси. На них видно, что с увеличением  $\mu$  увеличивается амплитуда колебаний значений фактора ослабления и увеличивается период этих колебаний. При увеличении частоты излучения колебания значений фактора ослабления постепенно затухают (уменьшаются по амплитуде) и после  $5000 \text{ см}^{-1}$  колебания практически прекращаются и значение фактора ослабления можно считать равным 2.

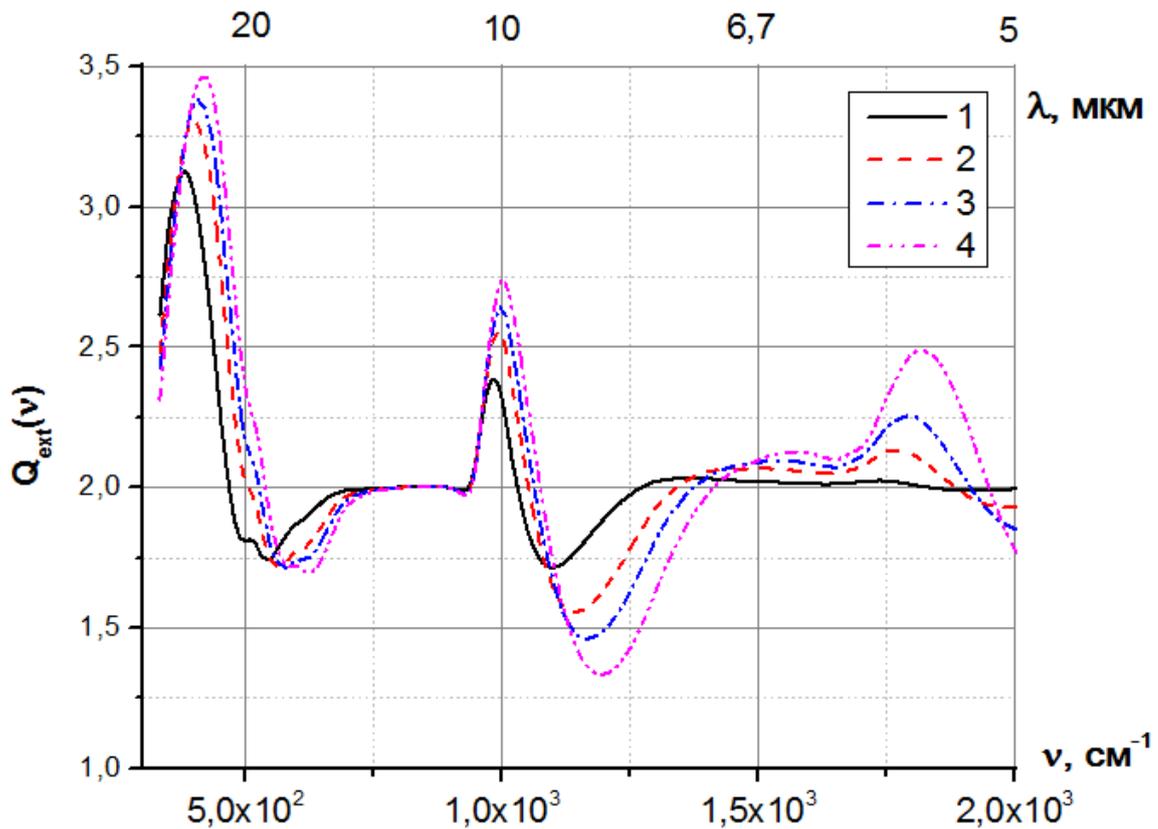


Рисунок 5.33 –  $Q_{\text{ext}}$  при  $\nu$  от  $333$  до  $2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$  ( $\lambda$  от  $30$  до  $5 \text{ мкм}$ ),  $\bar{a}=150 \text{ мкм}$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ , чистый лед,  $C=1 \text{ л}^{-1}$ : 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

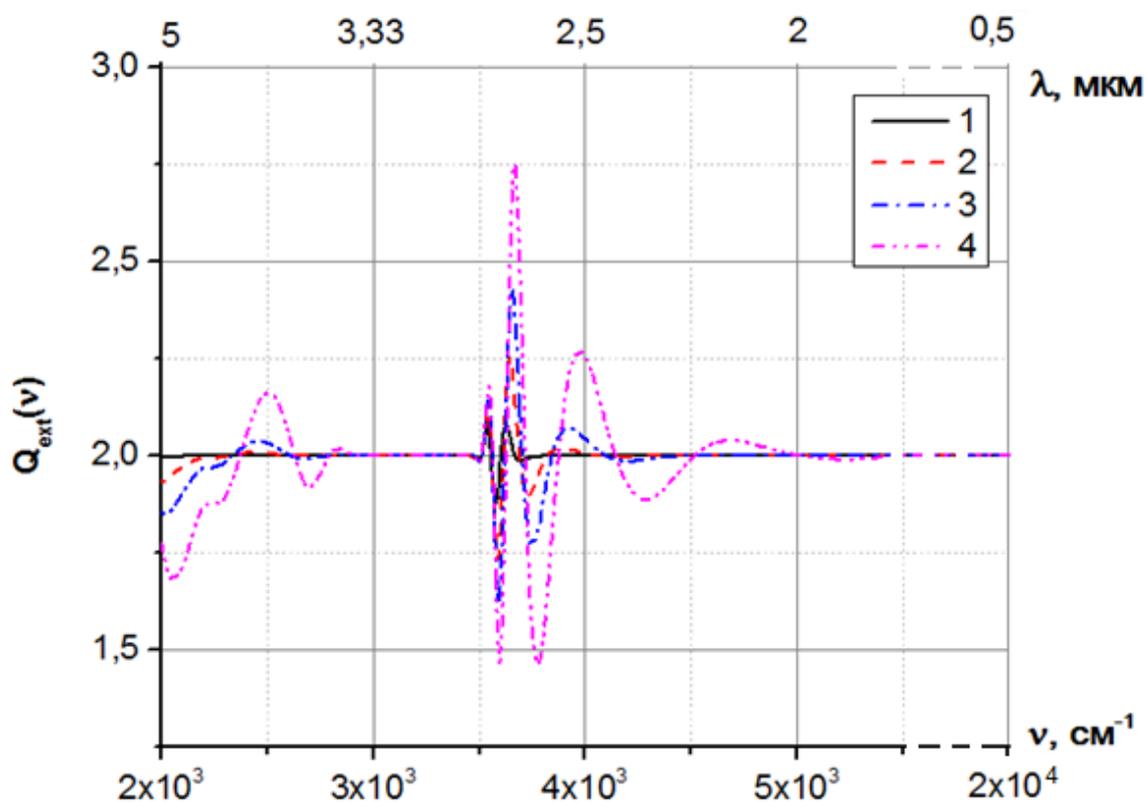


Рисунок 5.34 –  $Q_{\text{ext}}$  при  $\nu$  от  $2 \cdot 10^3$  до  $2 \cdot 10^4$   $\text{cm}^{-1}$  ( $\lambda$  от 5 до 0.5  $\mu\text{m}$ ),  $\bar{a}=150$   $\mu\text{m}$ ,  $d=2.020(2a)^{0.449}$ , чистый лед,  $C=1$   $\text{л}^{-1}$ : 1 –  $\mu=1$ , 2 –  $\mu=3$ , 3 –  $\mu=5$ , 4 –  $\mu=10$ .

Достоверность полученных в работе результатов обеспечивается:

- Количественным совпадением результатов расчета ослабления для отдельного кристалла с аналогичными расчетными данными, полученными другими исследователями [26].

- Количественным согласием расчетных характеристик ослабления для ансамбля кристаллов с аналогичными экспериментальными данными [27].

Полная корреляция данных проявляется в области эффекта Христиансена.

## **6 ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ**

Выполнение грамотной научно-исследовательской работы требует наличия экономической оценки всех её элементов: как объекта исследования, так и методов, которые для этого используются. Цель данного раздела ВКР заключается в оценке конкурентоспособности и ресурсоэффективности научной разработки прикладной программы для расчета характеристик оптического излучения прошедшего через моделируемую полидисперсную среду при различных параметрах. Для достижения поставленной цели необходимо выполнить следующие задачи:

- выявить потенциальных потребителей;
- произвести анализ конкурентных технических решений;
- произвести SWOT-анализ;
- выявить структуру работ и их исполнителей;
- определить трудоемкость проводимых работ;
- разработать график проведения исследования;
- рассчитать размер бюджета исследования;
- оценить экономическую эффективность проекта.

### **6.1 ПОТЕНЦИАЛЬНЫЕ ПОТРЕБИТЕЛИ РЕЗУЛЬТАТОВ ИССЛЕДОВАНИЯ**

Современные мировые тенденции определяют вектор развития любой технологической, научной и прочих отраслей. Особенно сильно поднимается вопрос о необходимости планирования и организации всех проводимых работ, а именно – с точки зрения ресурсоэффективности и ресурсосбережения. Таким образом, существует потребность в определении затрат на проведение научно-исследовательских работ и их продолжительности, что, в свою очередь, определяет экономическую

эффективность и конкурентоспособность рассматриваемой разработанной программы.

Получаемые результаты расчета характеристик излучения ориентированы на использование в численных и натуральных экспериментах, как лазерном и пассивном зондировании, а также при решении задач переноса лучистой энергии через аэродисперсные среды. Целевыми потребителями данного проекта потенциально могут быть научные центры, целью которых является изучение атмосферы.

Исследование атмосферы необходимо для изучения состава ее слоев, свойств и понимания процессов, происходящих в ней. На основе этого будет возможность создания новых технологий, которые могут быть применены в различных отраслях. Однако для этого необходимо изучать обширные территории, поэтому необходимо иметь большую площадь контролируемого пространства. Также для проведения зондирования уровень развития страны должен быть на довольно-таки высоком уровне.

## **6.2 АНАЛИЗ КОНКУРЕНТНЫХ ТЕХНИЧЕСКИХ РЕШЕНИЙ**

Выполнение представленной работы основывается на разработанной прикладной программе для моделирования полидисперсной среды для расчета параметров излучения, проходящего через неё. Такие программы в первую очередь предназначены для обработки вводимых данных. Расчет необходимых параметров вручную будет занимать довольно много времени, поскольку при расчетах необходимо учитывать много различных параметров и производить сложные математические операции. Прямым конкурентом могут быть такие интерактивные среды как MathLab, Mathematica, GNU Octave и иные подобные программы.

Анализ конкурентных технических решений определяется по формуле:

$$K = \sum B_i \cdot B_i, \quad (17)$$

где  $K$  – конкурентоспособность научной разработки или конкурента;

$V_i$  – вес показателя (в долях единицы);

$B_i$  – балл  $i$ -го показателя.

Веса показателей, определяемые экспертным путем, в сумме должны составлять 1. В таблице 3.1 представлена оценочная карта конкурентоспособности различных характеристик, упомянутых программ, где ML – MathLab, Mt – Mathematica, PM – полученная программа.

Таблица 3.1 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы			Конкурентоспособность		
		ML	Mt	PM	ML	Mt	PM
Технические критерии оценки ресурсоэффективности							
1 Вариативность входных данных для обработки	0,15	5	5	4	0,75	0,75	0,6
2 Возможность подключения дополнительных наборов инструментов	0,05	5	4	2	0,25	0,2	0,1
3 Возможность отображения полученных зависимостей в виде графиков	0,08	5	5	3	0,4	0,4	0,24
4 Удобство интерфейса	0,2	4	4	4	0,8	0,8	0,8
5 Возможность написания дополнительных алгоритмов	0,07	5	5	2	0,35	0,35	0,14
6 Поддержка других языков программирования	0,05	5	5	2	0,25	0,25	0,1
7 Кроссплатформенность	0,1	4	5	4	0,4	0,5	0,4
8 Надежность	0,1	5	4	4	0,5	0,4	0,4
Экономические критерии оценки эффективности							
1 Конкурентоспособность продукта	0,07	5	5	2	0,35	0,35	0,14
2 Уровень проникновения на рынок	0,07	5	4	1	0,35	0,28	0,07
3 Послепродажное обслуживание	0,06	4	4	5	0,24	0,24	0,3
Итого	1	46	54	59	4,64	4,52	3,29

Предоставленные выше данные позволяют провести анализ конкурентоспособности прикладных программ, представленной в данной работе. Видно, что совокупность преимуществ, которыми обладает MathLab, обеспечивает ему наиболее высокую конкурентоспособность, что и обуславливает её распространенность. Однако данная программа и была разработана для того, чтобы сразу начать ее использовать, т.к. в ней уже прописаны необходимые формулы для расчета тех или иных характеристик, а в иных средах их будет необходимо ввести.

### **6.3 SWOT-АНАЛИЗ**

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой комплексный анализ проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильными сторонами могут являться факторы, которые отражают наиболее конкурентоспособную сторону рассматриваемой программы.

Сильными сторонами данной прикладной программы можно назвать следующие особенности:

- использование заранее запрограммированных формул для расчета различных характеристик;
- простота в использовании;
- возможность ввода как конкретных значений для тестирования, так и набора данных;
- вывод результатов в консоль или отдельный файл (по выбору);

Слабыми сторонами считаются те особенности рассматриваемого объекта, которые могут препятствовать его наиболее выгодному и беспрепятственному использованию.

Слабыми сторонами рассматриваемой разработки можно назвать следующие свойства и особенности:

- при обработке большого объёма данных потребуется много времени, т.к. при расчете используется много различных операций;
- интерфейс пока что находится в разработке;
- при выявлении новых интересующих характеристик программу будет необходимо дополнить разработчикам;

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую при определенных условиях.

К возможностям можно отнести:

- политика государства направленная на повышение эффективности научно-исследовательских центров;
- тенденция к повышению количества исследований атмосферы;
- создание новых исследовательских центров с целью достижения новых научных открытий;
- необходимость поиска новых видов технологий в области физики атмосферы.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды, которые могут иметь разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем.

К угрозам по отношению к разработанной программе можно отнести:

- сбой работы ОС;
- снижение государственного финансирования научно-исследовательских центров;
- компьютерные вирусы.

В таблице 3.2 представлен SWOT-анализ виде таблицы.

Таблица 3.2 – SWOT-анализ

	<b>Сильные стороны:</b> С1 использование заранее	<b>Слабые стороны:</b> Сл1 при обработке
--	---	---

	<p>запрограммированных формул для расчета различных характеристик;</p> <p>С2 простота в использовании;</p> <p>С3 возможность ввода как конкретных значений для тестирования, так и набора данных;</p> <p>С4 вывод результатов в консоль или отдельный файл (по выбору);</p>	<p>большого объема данных потребуется много времени, т.к. при расчете используется много различных операций;</p> <p>Сл2 интерфейс пока что находится в разработке;</p> <p>Сл3 при выявлении новых интересных характеристик программу будет необходимо дополнить разработчикам;</p>
<p><b>Возможности:</b></p> <p>В1 политика государства направленная на повышение эффективности научно-исследовательских центров;</p> <p>В2 тенденция к повышению количества исследований атмосферы;</p> <p>В3 создание новых исследовательских центров с целью достижения новых научных открытий;</p> <p>В4 необходимость поиска новых видов технологий в области физики атмосферы.</p>	<p>1 Использование такой программы уменьшит затраты на разработку алгоритмов для вычисления, что в сумме с простотой в использовании позволяет максимально снизить время для адаптации к программе;</p> <p>2 Разнообразие для ввода и вывода данных повышает многофункциональность программы.</p>	<p>1 Разработка более универсальных и адаптивных программ;</p> <p>2 Нежелание исследователей использовать данную программу</p>
<p><b>Угрозы:</b></p> <p>У1 сбой работы ОС.</p> <p>У2 снижение государственного финансирования научно-исследовательских центров.</p> <p>У3 компьютерные вирусы.</p>	<p>1 При работе с данными всегда необходимо сохранять полученные результаты во избежание их утери при сбоях, чтобы минимизировать количество потерь при них. Для защиты от вирусов необходимо использовать антивирусы.</p>	<p>1 Необходимо повысить защищенность получаемых данных, для предотвращения их утечки – ввести алгоритмы шифрования данных;</p> <p>2 Снижение государственного финансирования может привести к замедлению или сворачиванию исследований в области физики атмосферы.</p>

Проведённый SWOT-анализ позволяет с достаточной для данной работы точностью определять дальнейшее положение разработанной программы на соответствующем рынке. Рассматриваемое прикладное приложение в связи с ее особенностями может иметь место для расчета характеристик при постановке экспериментов. Однако в текущих реалиях экономики в России, сейчас нет потребности в проведении большого объема научно-исследовательских работ по изучению атмосферы. Выходу разработанной программы в свет может поспособствовать крупный первоначальный заказ, после которого будет возможность учесть и исправить недостатки, выявленные в процессе эксплуатации, чтобы привлечь и других потенциальных заказчиков.

#### 6.4 ОРГАНИЗАЦИЯ И ПЛАНИРОВАНИЕ РАБОТ

При организации процесса реализации конкретного проекта необходимо рационально планировать занятость каждого из его участников и сроки проведения отдельных работ.

Данный пункт представляет собой полный перечень проводимых работ, где определяются их исполнители и рациональная продолжительность. Наглядным достаточно объективным результатом планирования работ является сетевой, либо линейный график реализации проекта. Так как число исполнителей не превышает двух, предпочтительным является линейный график. Сведения об этапах проводимой работы и их исполнителях представлены в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Этапы проведенной работы

Этап работы	Исполнители	Загрузка исполнителей
Постановка целей и задач	НР	НР – 100%
Составление и утверждение ТЗ	НР, И	НР – 100% И – 10%
Подбор и изучение материалов по	НР, И	НР – 30%

тематике		И – 100%
Разработка календарного плана	НР, И	НР – 100% И – 10%
Обсуждение литературы	НР, И	НР – 20% И – 100%
Выбор исходных параметров и необходимых выходных характеристик	НР, И	НР – 100% И – 40%
Подбор методов для расчета характеристик	НР, И	НР – 100% И – 70%
Реализация программы	И	И – 100%
Оформление полученных зависимостей в виде графиков и таблиц	И	И – 100%
Подведение итогов	НР, И	НР – 60% И – 100%

Как видно из представленной выше таблицы, роль НР в ходе выполнения всех видов работ сводится к направляющей и контролирующей функциям, в то время как И является исполнительным звеном – он выполняет все поставленные задачи для достижения установленной цели.

#### **6.4.1 ПРОДОЛЖИТЕЛЬНОСТЬ ЭТАПОВ РАБОТ**

Продолжительность этапов работ может быть рассчитана с использованием следующих методов:

- технико-экономического;
- опытно-статистического.

Первый метод подразумевает наличие и использование нормативной базы трудоёмкости всех применяемых в работе процессов, так как они по своей природе являются повторяющимися с достаточно высокой частотой при условии стандартной, устойчивой обстановки. В связи с тем, что подобными нормативами исполнитель не обладает в виду нестандартности и неравномерности распределения рабочих усилий применяется опытно-статистический метод, который реализуется двумя способами:

- аналоговый;

– экспертный.

Способ с применением достаточно актуальных, как с точки зрения времени, так и со стороны реальной применимости аналогов к разрабатываемой НИР имеет ряд преимуществ: он относительно прост в исполнении и не сопряжён с большим количеством затрат. Однако на практике он может быть слишком локальным и применяться только для отдельных элементов – невозможно найти абсолютно идентичных работ.

Второй способ – экспертный – применим в ситуации, когда аналоги выполняемой НИР отсутствуют. Он предполагает генерацию необходимых количественных оценок специалистами конкретной предметной области, опирающимися на их профессиональный опыт и эрудицию.

Для определения вероятных значений продолжительности работ  $t_{ож}$  могут применяться следующие формулы:

$$t_{ож} = \frac{3 \cdot t_{\min} + 2 \cdot t_{\max}}{5}, \quad (18)$$

$$t_{ож} = \frac{t_{\min} + 4 \cdot t_{\text{prob}} + t_{\max}}{6}, \quad (19)$$

где  $t_{\min}$  – минимальная продолжительность работы, сут.;

$t_{\max}$  – максимальная продолжительность работы, сут.;

$t_{\text{prob}}$  – наиболее вероятная продолжительность работы, сут.

Как видно из самой конструкции формул, вторая требует большего анализа каждого из элементов работы и вероятностной оценки их продолжительности, что, очевидно, усложняет расчеты.

Для выполнения перечисленных в таблице 3.3 работ требуются специалисты:

– инженер (исполнитель ВКР);

– научный руководитель.

Для построения линейного графика необходимо рассчитать длительность этапов в рабочих днях, а затем перевести ее в календарные дни.

Расчёт продолжительности выполнения каждого этапа в рабочих днях:

$$T_{\text{РД}} = \frac{t_{\text{ОЖ}}}{K_{\text{ВН}}} \cdot K_{\text{Д}}, \quad (20)$$

где  $K_{\text{ВН}}$  – коэффициент выполнения работ, учитывающий влияние внешних факторов на соблюдение предварительно определенных длительностей;

$K_{\text{Д}}$  – коэффициент, учитывающий дополнительное время на компенсацию непредвиденных задержек и согласование работ.

Расчёт продолжительности этапа в календарных днях ведется по формуле:

$$T_{\text{К}} = \frac{T_{\text{КАЛ}}}{T_{\text{КАЛ}} - T_{\text{ВД}} - T_{\text{ПД}}}, \quad (21)$$

где  $T_{\text{КАЛ}}$  – календарные дни;

$T_{\text{ВД}}$  – выходные дни;

$T_{\text{ПД}}$  – праздничные дни.

При учёте, что  $T_{\text{КАЛ}} = 365$  сут.,  $T_{\text{ВД}} = 52$  сут.,  $T_{\text{ПД}} = 10$  сут.

В приложении Б приведен пример определения продолжительности этапов работ и их трудоёмкости по исполнителям, занятым на каждом этапе. В столбцах 3 – 5 реализован экспертный способ по формуле (18). Столбцы 6 и 7 содержат величины трудоёмкости этапа для каждого из двух участников проекта, научного руководителя и инженера, с учетом коэффициента  $K_{\text{Д}} = 1,15$ . Каждое из них в отдельности не может превышать соответствующее значение  $t_{\text{ож}} \cdot K_{\text{Д}}$ . Столбцы 8 и 9 – трудоёмкости, выраженные в календарных днях путем дополнительного умножения на  $T_{\text{К}} = 1,212$ . Итог по столбцу 5 даёт общую ожидаемую продолжительность работы над проектом в рабочих днях, итоги по столбцам 8 и 9 – общие трудоёмкости для каждого из участников проекта. Величины трудоёмкости этапов по исполнителям ТКД, данные столбцов 8 и 9 кроме итогов, позволяют построить линейный график осуществления проекта, представленный в приложении В.

## 6.5 РАСЧЁТ НАКОПЛЕНИЯ ГОТОВНОСТИ ПРОЕКТА

Текущее состояние работы над проектом нуждается в оценке для точного понимания всех затраченных усилий. Получаемые по итогу подобной оценки величины (величины накопления готовности работы) отображают количество процентов, на которое выполнен весь объём работ по проекту в целом по окончании текущего ( $i$ -го) этапа.

Вводятся следующие обозначения:

- $TP_{\text{общ}}$  – общая трудоёмкость проекта;
- $TP_i$  ( $TP_k$ ) – трудоёмкость  $i$ -го ( $k$ -го) этапа проекта,  $i = \overline{1, I}$ ;
- $TP_i^H$  – накопленная трудоёмкость  $i$ -го этапа проекта по его завершении;
- $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) – трудоёмкость работ, выполняемых  $j$ -м участником на  $i$ -м этапе, здесь  $j = \overline{1, 2}$  – индекс исполнителя.

Степень готовности определяется формулой (3.5):

$$CG_i = \frac{TP_i^H}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i TP_k}{TP_{\text{общ}}} = \frac{\sum_{k=1}^i \sum_{j=1}^m TP_{km}}{\sum_{k=1}^I \sum_{j=1}^m TP_{km}}. \quad (22)$$

Применительно к таблице, представленной в приложении Б, величины  $TP_{ij}$  ( $TP_{kj}$ ) находятся в столбцах (6,  $j = 1$ ) и (7,  $j = 2$ ). Величина  $TP_{\text{общ}}$  равна сумме чисел из итоговых клеток этих столбцов. Результаты расчета  $TP_i$  (%) и  $CG_i$  (%) на основе этих данных содержится в таблице 3.4.

Таблица 3.4 – Нарастание технической готовности работы и удельный вес каждого этапа

Этап	$TP_i$ , %	$CG_i$ , %
Постановка целей и задач	3,63	3,63
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	6,86	10,49
Подбор и изучение материалов по тематике	14,18	24,67
Разработка календарного плана	4,00	28,67

Этап	TR <sub>i</sub> , %	CG <sub>i</sub> , %
Обсуждение литературы	8,72	37,33
Выбор исходных параметров и необходимых выходных характеристик	10,18	47,57
Подбор методов для расчета характеристик	19,62	67,19
Реализация программы	19,73	88,92
Оформление полученных зависимостей в виде графиков и таблиц	7,26	94,18
Подведение итогов	5,82	100,00

Очевидно, что наибольшее количество трудозатрат приложено на этапах проработки методов расчёта и при его непосредственном осуществлении (порядка половины всей работы), когда как этапы, включающие подбор и оформление различного рода документов, подготовку необходимой базы для проведения практических изысканий по отдельности потребовали меньше времени и сил.

## 6.6 РАСЧЁТ СМЕТЫ НА ВЫПОЛНЕНИЕ ПРОЕКТА

Смета на выполнение данного исследования содержит все расходы, необходимые для осуществления комплекса работ, необходимых для реализации всего спектра поставленных перед проектом задач. Расчёт полной (сметной) стоимости выполнения исследования производится по следующим статьям затрат:

- материалы и покупные изделия;
- заработная плата;
- социальный налог;
- расходы на электроэнергию (без освещения);
- амортизационные отчисления;

- командировочные расходы;
- оплата услуг связи;
- арендная плата за пользование имуществом;
- прочие услуги (сторонних организаций);
- прочие (накладные расходы) расходы.

Полная стоимость выполняемых работ равняется сумме затрат по всем представленным выше статьям.

### 6.6.1 РАСЧЁТ ЗАТРАТ НА МАТЕРИАЛЫ

К данной статье расходов относится стоимость материалов, покупных изделий, полуфабрикатов и других материальных ценностей, расходуемых непосредственно в процессе выполнения работ над объектом проектирования. Сюда же относятся специально приобретенное оборудование, инструменты и прочие объекты, относимые к основным средствам, стоимостью до 40 000 руб. включительно. Цена материальных ресурсов определяется по соответствующим ценникам или договорам поставки. Кроме того, статья включает, так называемые, транспортно-заготовительные расходы, связанные с транспортировкой от поставщика к потребителю, хранением и прочими процессами, обеспечивающими движение (доставку) материальных ресурсов от поставщиков к потребителю. Сюда же включаются расходы на совершение сделки купли-продажи (транзакции) [28]. Приблизительно они оцениваются в процентах к отпускной цене закупаемых материалов, как правило, это 5 – 20 %.

Результаты расчета затрат на материалы без учета транзакций, представлены в таблице 3.5.

Таблица 3.5 – Расчет затрат на материалы

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во	Сумма, руб.
-------------------------	-------------------	--------	-------------

Бумага для принтера формата А4	260	1 уп.	260
Картридж для принтера	1040	1 шт.	1040
Итого:			1300

В данной работе принимается, что транзакционные расходы составляют 5 % от отпускной цены материалов, тогда расходы на материалы с учетом ТЗР равны:

$$C_{\text{МАТ}} = 1300 \cdot 1,05 = 1365 \text{ руб.}$$

### 6.6.2 РАСЧЁТ ЗАРАБОТНОЙ ПЛАТЫ

Данная статья расходов включает в себя суммарную заработную плату научного руководителя и инженера (исполнителя), с учётом входящих в фонд заработной платы различных премий. Основная заработная плата рассчитывается, опираясь на трудоёмкость выполнения каждого этапа и на величину месячного оклада исполнителя. Среднедневная тарифная заработная плата ( $ЗП_{\text{дн-т}}$ ) рассчитывается по формуле:

$$ЗП_{\text{дн-т}} = \frac{МО}{25,083}, \quad (23)$$

где 25,083 сут. – среднее количество рабочих дней в месяце при шестидневной рабочей неделе.

Результаты расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.6. Затраты времени каждым исполнителем в рабочих днях с округлением до целого взяты из приложения Б. Учёт всевозможных премий и районной надбавки осуществляется путём использования ряда коэффициентов:  $K_{\text{ПР}} = 1,1$ ;  $K_{\text{ДОП.ЗП}} = 1,188$ ;  $K_{\text{Р}} = 1,3$ . Таким образом, для перехода от тарифной суммы заработка исполнителя, связанной с участием в проекте, к соответствующему полному заработку необходимо первую умножить на интегральный коэффициент:

$$K_{\text{И}} = K_{\text{ПР}} \cdot K_{\text{ДОП.ЗП}} \cdot K_{\text{Р}}; \quad (24)$$

$$K_{\text{И}} = 1,1 \cdot 1,188 \cdot 1,3 = 1,699.$$

Результаты расчёта затрат на полную заработную плату приведены в таблице 3.6.

Таблица 3.6 – Затраты на заработную плату

Исполнитель	Оклад руб./мес.	Среднедневная ставка руб./раб. день	Затраты времени, раб. дни	$K_{\text{И}}$	Фон з/п, руб.
НР	33664	1342,10	17	1,699	38763,87
И	9489	378,30	27	1,699	17353,76
Итого:					56117,63

Суммарные затраты на заработную плату участникам исследования составляют 56117,63 рублей.

### 6.6.3 РАСЧЁТ ЗАТРАТ НА СТРАХОВЫЕ ВЗНОСЫ

Затраты на страховые взносы, включающие в себя отчисления в пенсионный фонд, на социальное и медицинское страхование согласно ФЗ от 24.07.2009 №212-ФЗ установлен размер страховых взносов равный 30%. На основании пункта 1 ст. 58 закона №212-ФЗ для учреждений, осуществляющих образовательную и научную деятельность, водится пониженная ставка – 27,1%:

$$C_{\text{соц}} = C_{\text{зп}} \cdot 0,271; \quad (25)$$

$$C_{\text{соц}} = 56117,63 \cdot 0,271 = 15207,88 \text{руб.}$$

Данные взносы идут в Фонд государственного социального страхования (ФСС), Пенсионный фонд (ПФ) и Фонд медицинского страхования (ФФОМС).

#### 6.6.4 РАСЧЁТ ЗАТРАТ НА ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЮ

Данные расходы подразумевают затраты на то количество электроэнергии, которая потрачена для выполнения всего проекта, то есть на работу используемого оборудования. Они рассчитываются по формуле:

$$C_{\text{ЭЛ.ОБ}} = P_{\text{ОБ}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{Э}}, \quad (26)$$

где  $P_{\text{ОБ}}$  – мощность, потребляемая оборудованием, кВт;

$C_{\text{Э}}$  – тариф на 1 кВт·час;

$t_{\text{ОБ}}$  – время работы оборудования, час.

Для ТПУ  $C_{\text{Э}} = 6,59$  руб./кВт·час (с НДС).

Время работы оборудования рассчитывается на основе суммарной трудоёмкости работ из приложения А для исполнителя ( $T_{\text{РД}}$ ) при условии, что продолжительность рабочего дня равна 8 часов:

$$t_{\text{ОБ}} = T_{\text{РД}} \cdot K_t, \quad (27)$$

где  $K_t \leq 1$  – коэффициент использования оборудования по времени, равный отношению времени его работы в процессе выполнения проекта к  $T_{\text{РД}}$ .

В ряде случаев возможно определение  $t_{\text{ОБ}}$  путем прямого учета, особенно при ограниченном использовании соответствующего оборудования.

Мощность, потребляемая оборудованием, определяется по формуле:

$$P_{\text{ОБ}} = P_{\text{НОМ}} \cdot K_C, \quad (28)$$

где  $P_{\text{НОМ}}$  – номинальная мощность оборудования, кВт;

$K_C \leq 1$  – коэффициент загрузки, зависящий от средней степени использования номинальной мощности.

Для технологического оборудования малой мощности  $K_C = 1$ .

Результаты расчета затрат на электроэнергию для технологических целей приведены в таблице 3.7

Таблица 3.7 – Затраты на электроэнергию технологическую

Наименование оборудования	Время работы оборудования $t_{\text{ОБ}}$ , час	Потребляемая мощность $P_{\text{ОБ}}$ , кВт	Затраты $C_{\text{ЭЛ.ОБ}}$ , руб.
Персональный компьютер	200	0,3	395,40
Струйный принтер	2	0,1	1,32
Итого:			396,72

Затраты на оплату потребленного количества электроэнергии составляют 396,72 руб.

### 6.6.5 РАСЧЁТ АМОРТИЗАЦИОННЫХ РАСХОДОВ

Данная статья подразумевает расчёт амортизации используемого оборудования за время выполнения проекта по следующей формуле:

$$C_{\text{АМ}} = \frac{H_{\text{А}} \cdot t_{\text{ОБ}} \cdot C_{\text{ОБ}} \cdot n}{F_{\text{Д}}}, \quad (29)$$

где  $H_{\text{А}}$  – годовая норма амортизации единицы оборудования;

$C_{\text{ОБ}}$  – балансовая стоимость единицы оборудования с учетом ТЗР;

$F_{\text{Д}}$  – действительный годовой фонд времени работы соответствующего оборудования, берется из специальных справочников или фактического режима его использования в текущем календарном году;

$t_{\text{ОБ}}$  – фактическое время работы оборудования в ходе выполнения проекта, учитывается исполнителем проекта;

$n$  – число задействованных однотипных единиц оборудования.

Для персональной электронно-вычислительной машины в 2020 г., при 298 рабочих днях и 8-ми часовом рабочем дне,  $F_{\text{Д}}$  равен:

$$F_{\text{Д}} = 298 \cdot 8 = 2384 \text{ ч}$$

При использовании нескольких типов оборудования расчет по формуле делается соответствующее число раз, затем результаты суммируются.

$H_{\text{А}}$  равна:

$$H_A = \frac{1}{2,5} = 0,4.$$

С учетом значений всех коэффициентов амортизационные расходы равны:

$$C_{AM} = \frac{0,4 \cdot 202 \cdot 100000 \cdot 1}{2384} = 3389,26 \text{ руб.}$$

### 6.6.6 РАСЧЁТ ПРОЧИХ РАСХОДОВ

В статье «Прочие расходы» отражаются расходы на выполнение проекта, которые не могут быть учтены в предыдущих статьях или же которые не могут быть предвидены. Размер прочих расходов принимается равными 10% от суммы всех предыдущих расходов:

$$C_{ПРОЧ} = (C_{МАТ} + C_{ЗП} + C_{СОЦ} + C_{ЭЛ.ОБ} + C_{AM}) \cdot 0,1. \quad (30)$$

Прочие расходы при выполнении исследований равны:

$$C_{ПРОЧ} = (1365 + 56117,63 + 15207,88 + 396,72 + 3389,26) \cdot 0,1 = 7647,65 \text{ руб.}$$

### 6.6.7 РАСЧЁТ СУММАРНОЙ СЕБЕСТОИМОСТИ РАЗРАБОТКИ

Проведя расчет по всем статьям сметы затрат на разработку, можно определить общую себестоимость проекта (таблица 3.8).

Таблица 3.8 – Смета затрат на разработку проекта

Статья затрат	Условное обозначение	Сумма	
		, руб.	, %
Материалы и покупные изделия	$C_{МАТ}$	1365,00	1,62
Основная заработная плата	$C_{ЗП}$	56117,63	66,71
Страховые взносы	$C_{СОЦ}$	15207,88	18,08
Расходы на электроэнергию	$C_{ЭЛ.ОБ}$	396,72	0,47

Амортизационные отчисления	$C_{AM}$	3389,26	4,03
Прочие расходы	<i>СПРОЧ</i>	7647,65	9,09
Итого:		<u>84124,14</u>	100

Таким образом, затраты на разработку составили 84124,14 руб. Проведение анализа вклада каждой из статей в суммарные затраты на работу выявило, что основной вклад вносят отчисления на заработную плату участников проекта, когда как расходы на материалы и обеспечение электроэнергией практически не повлияли на финальную величину.

### 6.6.8 РАСЧЁТ ПРИБЫЛИ

Ввиду отсутствия данных, прибыль  $G$  рассчитана как 20 % от полной себестоимости проекта:

$$G = C \cdot 0,2; \quad (31)$$

$$G = 84124,14 \cdot 0,2 = 16824,83 \text{ руб.}$$

Размер прибыли составляет 16824,83 руб.

### 6.6.9 РАСЧЁТ НДС

НДС составляет 20% от суммы затрат на разработку и прибыли:

$$\text{НДС} = (C + G) \cdot 0,2; \quad (32)$$

$$\text{НДС} = (84124,14 + 16824,83) \cdot 0,2 = 20189,79 \text{ руб.}$$

### 6.6.10 ЦЕНА РАЗРАБОТКИ ПРОЕКТА

Цена равна сумме полной себестоимости, прибыли и НДС:

$$C_{\text{НИР}} = C + G + \text{НДС}; \quad (33)$$

$$C_{\text{НИР}} = 84124,14 + 16824,83 + 20189,79 = 121138,76 \text{руб.}$$

### **6.6.11 ОЦЕНКА ЭКОНОМИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРОЕКТА**

Ввиду закрытости или отсутствия данных по использованию различных программ в научно-исследовательских центрах оценка экономической эффективности и определение срока окупаемости данного проекта в рамках данной работы невозможны.

#### **ВЫВОД ПО РАЗДЕЛУ «ФИНАНСОВЫЙ МЕНЕДЖМЕНТ, РЕСУРСОЭФФЕКТИВНОСТЬ И РЕСУРСОСБЕРЕЖЕНИЕ»:**

1. Оценка конкурентоспособности разработанной программы и проведение SWOT-анализа показали, что по техническим характеристикам она уступает существующим аналогам, однако она уже включает в себя разработанный алгоритм для расчета различных характеристик, а при использовании других программ их будет необходимо сначала реализовать, поэтому теоритически данная разработка имеет место быть. Также если будет первый крупный заказ, то можно будет доработать недостатки и подстроить программу под нужды ученых.

2. Бюджет научно-технического исследования составил 84124,14 руб. Бюджет НИИ состоит из материальных затрат (1365,00 руб.), амортизационных отчислений (3389,26 руб.), затрат на оплаты труда (56117,63 руб.), оплату страховых взносов (15207,88 руб.) и прочих расходов (7647,65 руб.).

3. Оценка экономической эффективности не проведена по причине закрытости или отсутствия данных по использованию программ в научной среде.

## **7 СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ**

### **ВВЕДЕНИЕ**

В состав некоторых облаков входят разнообразные кристаллы. Такие облака постоянно простираются в атмосфере на 20%-30% покрывая поверхность нашей планеты. Данные облака сильно влияют на климат в глобальном и локальном масштабе. Свойства радиационного потока, трансформированного при взаимодействии света с облаками, зависят от микрофизических частиц, в состав которых они входят. В силу сложности численной реализации моделей ледяных облаков для исследования их оптических свойств, процесс взаимодействия оптического излучения с крупными облачными кристаллами слабо изучен.

В данной работе проведена параметризация микрофизических свойств кристаллического облака, которая ориентирована на применение в разработке численных моделей кристаллического облака для расчета оптических характеристик излучения.

Параметризация ориентирована на использование ее в численных и натуральных экспериментах, как лазерном и пассивном зондировании, а также при решении задач переноса лучистой энергии через аэродисперсные среды.

### **7.1 ПРАВОВЫЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ**

Эффективная и безопасная трудовая деятельность возможна только при условии соблюдения правильной организации рабочей зоны и трудового распорядка. Соблюдение этих мер контролируется и обеспечивается, в первую очередь, трудовым законодательством. Рассмотрение законодательства в области охраны труда позволяет выявить регламентирующие нормы, характерные для рассматриваемого вида труда и обеспечить их соблюдение.

## **7.1.1 СПЕЦИАЛЬНЫЕ ПРАВОВЫЕ НОРМЫ ТРУДОВОГО ЗАКОНОДАТЕЛЬСТВА**

Основным законом, регламентирующим трудовые отношения работника и работодателя, а также нормы труда является Трудовой Кодекс РФ [29]. Согласно статье 5 которого регулирование трудовых отношений осуществляется: трудовым законодательством и иными нормативными правовыми актами, содержащими нормы трудового права. Согласно статье 91 ТК РФ нормальная продолжительность рабочего времени не может превышать 40 часов в неделю.

Работы по расчету характеристик оптического излучения можно отнести к офисной работе с применением персональной электронно-вычислительной машины (ПЭВМ). Согласно статье 14 Федерального закона от 28.12.2013 N 426-ФЗ «О специальной оценке условий труда» данный вид работ можно отнести к допустимым условиям труда (класс 2), при которых на работника воздействуют вредные и опасные производственные факторы, уровни воздействия которых не превышают уровни, установленные нормативами условий труда [30].

Суммарное время регламентированных перерывов при работе с ПЭВМ определяется из СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 и составляет 90 минут для 8-часового рабочего дня [31].

## **7.1.2 ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ МЕРОПРИЯТИЯ ПРИ КОМПОНОВКЕ РАБОЧЕЙ ЗОНЫ**

Правильная компоновка рабочей зоны позволяет повысить эффективность труда, а также снизить нагрузку на человека, выполняющего трудовые операции.

Согласно СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 при размещении рабочих мест с ПЭВМ расстояние между рабочими столами с видеомониторами (в направлении тыла поверхности одного видеомонитора и экрана другого видеомонитора), должно быть не менее 2,0 м, а расстояние между боковыми поверхностями видеомониторов - не менее 1,2 м. Экран видеомонитора должен находиться от глаз пользователя на расстоянии 600-700 мм, но не ближе 500 мм с учетом размеров алфавитно-цифровых знаков и символов.

Высота рабочей поверхности стола для взрослых пользователей должна регулироваться в пределах 680-800 мм; при отсутствии такой возможности высота рабочей поверхности стола должна составлять 725 мм. Рабочий стол должен иметь пространство для ног высотой не менее 600 мм, шириной - не менее 500 мм, глубиной на уровне колен - не менее 450 мм и на уровне вытянутых ног - не менее 650 мм [31].

Конструкция рабочего стула (кресла) должна обеспечивать поддержание рациональной рабочей позы при работе на ПЭВМ, позволять изменять позу с целью снижения статического напряжения мышц шейно-плечевой области и спины для предупреждения развития утомления. Тип рабочего стула (кресла) следует выбирать с учетом роста пользователя, характера и продолжительности работы с ПЭВМ [31].

Конструкция рабочего стола должна обеспечивать оптимальное размещение на рабочей поверхности используемого оборудования с учетом его количества и конструктивных особенностей, характера выполняемой работы. Согласно ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ конструкцией рабочего места при выполнении работ сидя должно быть обеспечено выполнение трудовых операций в пределах зоны досягаемости моторного поля [32]. На рисунке 4.1 приведено расположение зон досягаемости моторного поля.

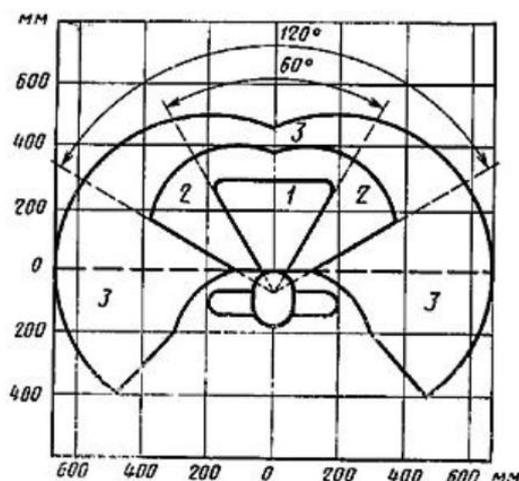


Рисунок 4.1 – Расположение зон досягаемости моторного поля:

1 – оптимальная зона; 2 – зона легкой досягаемости; 3 – зона досягаемости

Оптимальное размещение предметов труда и документации в зонах досягаемости следующее:

- дисплей размещается в зоне «3» (в центре);
- системный блок размещается в предусмотренной нише стола;
- клавиатура - в зоне «1»;
- «мышь» - в зоне «2» справа;
- МФУ находится в зоне «3» (справа);
- документация, необходимая при работе, расположена в зоне 2 (слева).

## 7.2 ПРОИЗВОДСТВЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

В процессе своей трудовой деятельности человек может подвергаться воздействию опасных и вредных факторов. При отсутствии мер защиты от этих факторов увеличивается риск возникновения травм или внезапного ухудшения самочувствия исследователей, а также риск развития хронических заболеваний. Поэтому, для обеспечения высокого уровня безопасности исследователей,

возникает необходимость рассмотрения факторов, характерных для конкретного производства и принятия мер по снижению их негативного воздействия.

## 7.2.1 АНАЛИЗ ОПАСНЫХ И ВРЕДНЫХ ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ФАКТОРОВ

Для идентификации потенциальных вредных и опасных факторов при разработке и эксплуатации рассматриваемого в ходе экспериментов использован ГОСТ 12.0.003-2015 «Опасные и вредные производственные факторы. Классификация» [33].

Перечень наиболее вероятных опасных и вредных факторов, характерных для рассматриваемой среды и нормативных документов, устанавливающих уровень их воздействия представлены в таблице 4.1.

Таблица 4.1 – Опасные и вредные факторы

Факторы	Этапы работ		Нормативные документы
	Разработка	Эксплуатация	
Отклонение показателей микроклимата	+	+	СанПиН 2.2.4.548–96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [34]
Механические колебания твердых тел и их поверхностей	+	+	СН 2.2.4/2.1.8.566–96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий [35]
Отсутствие или недостаток искусственного освещения	+	+	СП 52.13330.2016 Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [36]
Повышенный уровень электромагнитного излучения	+	+	ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности [37]
Акустические колебания	+	+	ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [38]
Ионизирующее излучение	-	+	СанПиН 2.6.1.2523-09 Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009 [39]

Психофизиологические нагрузки	+	+	ГОСТ 12.0.003-74 Опасные и вредные производственные факторы [33]
Поражение током	+	+	ГОСТ ИЕС 61140-2012 Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования [40]

Отклонения от оптимальных показателей микроклимата могут возникнуть как из-за изменения погодных условий, так и из-за работы различного оборудования. Одним из наиболее значимых показателей микроклимата являются температура и влажность воздуха, поскольку высокая температура и влажность оказывают существенное влияние на трудоспособность человека, снижается его восприимчивость и увеличивается число ошибок. При значительных отклонениях параметров внешней среды от нормы, у исследователей может наступить переохлаждение или перегрев. При переохлаждении понижается температура тела, сужаются кровеносные сосуды, нарушается работа сердечно-сосудистой системы, увеличивается вероятность простудных заболеваний. При перегреве у работника учащается пульс, дыхание, появляется слабость, головная боль, повышается температура тела.. Оптимальными микроклиматическими нормами для работы сидя, сопровождаемой незначительными физическими усилиями для холодного период года, являются температура от 22 до 24°C для холодного период года и от 23 до 25°C для теплого периода, относительная влажность от 40 до 60% и скорость движения воздуха, не превышающая 0,1 м/с . Достижение оптимальных параметров микроклимата на производстве достигаются такими мероприятиями, как отопление и вентилирование производственных участков, тепловая изоляция высоко нагретых поверхностей, для предотвращения выделения теплоты в помещении.

Также результаты работы в значительной степени зависят от освещенности рабочего места. Источником данного вредного фактора может служить недостаточная яркость источников света и их неправильное расположение. Недостаток освещения может развить у человека близорукость или астигматизм.

Освещенность на поверхности стола в зоне размещения рабочего документа должна быть 300-500 лк. Освещенность поверхности экрана не должна быть более 300 лк. Яркость светильников общего освещения в зоне углов излучения от 50 до 90° с вертикалью в продольной и поперечной плоскостях должна составлять не более 200 кд/м<sup>2</sup>. Коэффициент запаса для осветительных установок общего освещения должен приниматься равным 1,4. Коэффициент пульсации не должен превышать 5%. Для обеспечения нормируемых значений освещенности в помещениях для использования ПЭВМ следует проводить чистку стекол оконных рам и светильников не реже двух раз в год и проводить своевременную замену перегоревших ламп. При недостаточности естественного освещения, где ведется работа, необходимо предусматривать систему искусственного освещения из люминесцентных ламп или ламп накаливания.

Необходимо учитывать и такие факторы как акустические и механические колебания, которые могут возникнуть в процессе работы вентиляции, системы охлаждения ЭВМ и прочего оборудования, используемого в ходе работы. При превышении допустимого уровня вибрации часто поражается вестибулярный аппарат, что сопровождается головокружением, шаткой, неустойчивой походкой, также возникает тошнота, иногда двоится в глазах. Превышение допустимого уровня шума может также привести к хронической бессоннице, сердечным заболеваниям, нарушениям слуха, снижению иммунитета и многим другим заболеваниям. Уровень вибрации на рабочем месте не должен превышать допустимых значений вибрации для рабочих мест (категория 3, тип "в") в соответствии с действующими санитарно-эпидемиологическими нормативами. К техническим мероприятиям по защите от вибрации относятся устранение вибрации в источники и на пути их распространения. Устранения и уменьшения вибрации в источнике осуществляют на стадии проектирования и изготовления используемого в производстве оборудования. Для уменьшения вибраций на пути их распространения применяют вибродемпфирование, виброгашения и виброизоляцию.

Акустические колебания могут возникать из-за внезапных шумов высокой интенсивности. Даже кратковременные (взрывы, удары и т.п.), могут вызвать как острые нейросенсорные эффекты (головокружение, звон в ушах, снижение слуха), так и физические повреждения (разрыв барабанной перепонки с кровотечением, поражения среднего уха и улитки). Также шум на рабочем месте оказывает раздражающее влияние на работника, повышает его утомляемость, а при выполнении задач, требующих внимания и сосредоточенности, способен привести к росту ошибок и увеличению продолжительности выполнения задания. Длительное воздействие шума влечет тугоухость работника вплоть до его полной глухоты. Уровень шума при осуществлении офисных работ с использованием ПЭВМ не должен превышать 50 дБА на расстоянии 50 см от источника. К методам защиты от шума относятся снижение шума в источнике, звукоизоляция и звукопоглощение с помощью глушителей шума, звукоизолирующих перегородок, звукоизолирующих кожухов, а также применение индивидуальных средств защиты, таких как вкладыши и наушники.

Источниками электромагнитных полей (ЭМП) являются все электроприборы. Временные допустимые уровни ЭМП, создаваемых ПЭВМ на рабочих местах пользователей, в диапазоне частот 5 Гц – 2 кГц не должны превышать 25 В/м. При эксплуатации компьютеров ранних поколений в обязательном порядке надо применять защитный экран на мониторе. Наиболее эффективная система защиты от излучения реализуется созданием дополнительного металлического внутреннего корпуса.

Источника ионизирующего излучения бывают следующих видов: техногенные, природные, медицинские. Радиационное повреждение тканей и/или органов зависит от полученной дозы облучения или поглощенной дозы. Выше определенных пороговых значений облучение может нарушить функционирование тканей и/или органов и может вызвать острые реакции, такие как покраснение кожи, выпадение волос, радиационные ожоги или острый лучевой синдром. В условиях нормальной эксплуатации источников ионизирующего излучения пределы доз облучения в течение года

устанавливаются исходя из следующих значений индивидуального пожизненного риска для персонала –  $1,0 \times 10^{-3}$  Зв-1, для населения –  $5,0 \times 10^{-5}$  Зв-1. Для обеспечения радиационной безопасности при нормальной эксплуатации источников излучения руководствуются следующими основными принципами: не превышение допустимых пределов индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования); запрещение всех видов деятельности по использованию источников излучения, при которых полученная для человека и общества польза не превышает риск возможного вреда, причиненного дополнительным облучением (принцип обоснования); поддержание на возможно низком и достижимом уровне с учетом экономических и социальных факторов индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения (принцип оптимизации).

Поражение током может возникнуть при контакте с открытыми токопроводящими частями электроприборов, которые находятся под напряжением. Проходя через организм, электрический ток вызывает термическое, электролитическое и биологическое действие. Различают четыре степени электрических ударов: I степень – судорожное сокращение мышц без потери сознания; II степень – судорожное сокращение мышц с потерей сознания, но с сохранившимся дыханием и работой сердца; III степень – потеря сознания и нарушение сердечной деятельности или дыхания (либо того и другого вместе); IV степень – клиническая смерть, то есть отсутствие дыхания и кровообращения. В зависимости от величины тока, его напряжения, частоты, продолжительности воздействия, пути тока и общего состояния человека зависит исход действия электрического тока на организм человека. Установлено, что ток силой более 0,05 А может смертельно травмировать человека в течение 0,1 с. Самое большое число поражений от электрического тока (около 85%) приходится на установки напряжением до 1000 В. Для человеческого организма опасны переменный и постоянный ток. Наиболее опасен переменный ток, имеющий частоту 20-100 Гц; а частота 400 Гц не так опасна. Практически безопасным для человека в сырых

помещениях можно считать напряжение до 12 В, в сухих помещениях – до 36 В. Вероятность поражения человека электрическим током зависит от климатических условий в помещении (температуры, влажности), а также токопроводящей пыли, металлических конструкций, соединенных с землей, токопроводящего пола и т.д. Для предотвращения поражения током применяют следующие меры: защита с помощью автоматического отключения питания, защита с помощью двойной или усиленной изоляции, защита с помощью уравнивания потенциалов, защита с помощью электрического разделения, защита с помощью непроводящей окружающей среды и др.

Психофизиологические факторы подразделяются на физические перегрузки, связанные с тяжестью трудового процесса и нервно-психические перегрузки, связанные с напряженностью трудового процесса. При несоблюдении указанных гигиенических нормативов у работников развиваются профессиональные заболевания. Наиболее частыми из них являются заболевания суставо-связочного, мышечного и костного аппарата, а также периферической нервной системы. Для предотвращения таких перегрузок должны быть предусмотрены перерывы в течении рабочего дня. Первый перерыв на отдых продолжительностью 5-10 минут при работе с нормальными условиями труда устанавливаются в начальной фазе утомления, т. е. не ранее чем через 2-2,5 часа от начала смены, а второй – за 2-2,5 часа до окончания работы. Также к мероприятиям по снижению психофизиологических перегрузок относят ликвидацию ручных операций, уменьшение темпа работы, борьбу с другими производственными факторами, а также лечебно-профилактические мероприятия (предварительные перед поступлением на работу и периодические медицинские осмотры).

### **7.3 ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ**

Так или иначе в конечном счёте после проведения всех расчетов будут использоваться различные виды излучения, которые будут использоваться для изучения слоев атмосферы.

### **7.3.1 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Точный механизм воздействия того или иного излучения на живой организм неизвестен. В первую очередь его влиянию подвержена мембранная структура клеток. На клеточном уровне, самой чувствительной к различным физическим и химическим раздражителям и воздействиям является мембрана. Даже незначительное электромагнитное облучение влечет за собой морфологические и функциональные нарушения в ней. Энергия поля клетки в результате этого преобразуется в другие виды, а клетка может увеличиться в размерах.

Микроорганизмы очень чувствительны к даже слабым электромагнитным полям, которые возникают при использовании излучений. При воздействии на них полем, это проявляется в снижении двигательной активности, способности к выживанию и, соответственно, повышенной смертностью. Более того, облучение может вызывать мутации.

Растения реагируют на воздействие слабых и сильных полей. Как правило, эта реакция отражается на росте и функции размножения.

Характерно, что птицы предпочитают не гнездиться возле радиолокационных станций. Установлено, что под воздействием электромагнитного поля, страдает, прежде всего, центральная нервная система птиц и животных.

### **7.3.2 АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПРОЦЕССА ИССЛЕДОВАНИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ**

Электромагнитное загрязнение окружающей среды начинается с общего для всего живого компонента – воды. Воздействие на нее имеет определяющее значение. Под воздействием поля меняются свойства воды, что сказывается на скорости реакций, проходящих в организме.

Воздействие на разные виды животных не носит одинакового характера и может сказаться на соотношении видов в рамках одной экосистемы. А это обязательно приведет к дисбалансу и нарушению ее устойчивости, а затем, возможно, ее изменению или исчезновению.

### **7.3.3 ОБОСНОВАНИЕ МЕРОПРИЯТИЙ ПО ЗАЩИТЕ ОКРУЖАЮЩЕЙ СРЕДЫ**

Так, например, по мнению всемирной организации здравоохранения, масштабы электромагнитного загрязнения сейчас уже сопоставимы с загрязнением химическими веществами. Это связано с потребностью человечества в увеличении объемов энергии.

Для снижения уровня загрязнения применяются методы нормативного регулирования работы источников излучения. Запрещено использовать электроприборы с волнами вне разрешенных диапазонов. Применение такого оборудования отслеживают госинституты, ВОЗ, органы контроля и международные структуры.

## **7.4 БЕЗОПАСНОСТЬ В ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЯХ**

Возникающие чрезвычайные ситуации нарушают нормальные условия работы сотрудников предприятий и оказывают серьезное влияние на функционирование организаций, попадающих под воздействие ЧС, в целом. Поэтому во многих местах, где человека может настигнуть опасность, в частности и на предприятиях, разрабатывается комплекс мероприятий, способствующих предупреждению возникновения ЧС.

#### **7.4.1 АНАЛИЗ ВЕРОЯТНЫХ ЧС, КОТОРЫЕ МОГУТ ВОЗНИКНУТЬ ПРИ ПРОВЕДЕНИИ РАСЧЕТА ХАРАКТЕРИСТИК ОПТИЧЕСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

При проведении расчета характеристик оптического излучения, как и при проведении любого исследования, могут возникнуть непредвиденные чрезвычайные ситуации. По природе своего возникновения ЧС могут делиться на природные, техногенные, экологические, биологические, социальные и антропогенные. Наиболее существенное воздействие на работу исследователя могут оказать техногенные ЧС, но также свое влияние могут оказать природные, биологические и социальные ЧС.

Вероятными ЧС, которые могут возникнуть при проведении расчета характеристик оптического излучения, являются:

- пожары в здании;
- взрывы;
- обрушение здания;
- распространение инфекционных заболеваний;
- землетрясения;
- акт терроризма.

Пожар в здание, где проводится исследование, может возникнуть при нарушении правил эксплуатации того или иного оборудования, используемого при проведении исследования.

Взрывы могут быть инициированы неправильным использованием взрывных веществ, находящихся в здании, где проводилось исследование.

Обрушение здания может быть спровоцировано предшествующими взрывными волнами, воздействием на него природных явлений, таких как бури, ураганы и землетрясения, износом здания в процессе его эксплуатации, а также

внесением изменений в опорные элементы конструкции в процессе проведения ремонтных работ.

Распространение инфекционных заболеваний, представляющих опасность для человека, может быть вызвано наличием инфицированных сотрудников, работающих в здании, где проводится исследование, а также отсутствием санитарной обработки и уборки здания.

Причиной возникновения террористического акта может стать возможность противоправного воздействия на принятия каких-либо решений органами государственной власти, местного самоуправления и международными организациями.

Из всех вышеприведенных ЧС самым вероятным при проведении расчета характеристик оптического излучения является пожар.

#### **7.4.2 КОМПЛЕКС МЕРОПРИЯТИЙ ПО ПРЕДОТВРАЩЕНИЮ ПОЖАРА**

В зависимости от характеристик веществ и материалов, находящихся в помещении, здания подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Поскольку помещение, в котором проводятся теоретические исследования по степени пожаровзрывоопасности в основном относится к категории В, необходимо предусмотреть ряд профилактических мероприятий.

Мероприятия по пожарной профилактике подразделяются на организационные, технические, эксплуатационные и режимные.

Организационные мероприятия предусматривают правильную эксплуатацию оборудования, правильное содержание зданий и территорий, противопожарный инструктаж рабочих и служащих, обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности, издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации.

К техническим мероприятиям относятся: соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и

оборудования, отопления, вентиляции, освещения, правильное размещение оборудования.

Эксплуатационные мероприятия включают своевременные профилактические осмотры, ремонты и испытания.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер.

Для предупреждения возникновения пожара в организации необходимо прежде всего реализовать первичные меры пожарной безопасности, такие как:

- очистка всей территории от горючего мусора;
- применение при строительстве негорючих материалов;
- создание огнестойких преград, при помощи металлических дверей, капитальных стен;
- оборудование щитов с противопожарным инвентарем;
- установка автоматических средств извещения и тушения пожара;
- печи, плиты, электропроводку нужно содержать в полной исправности и периодически проверять;

При возникновении аварийной ситуации необходимо:

- прекратить работу;
- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в аварийную службу или МЧС – тел. 112;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **ВЫВОДЫ ПО РАЗДЕЛУ «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»**

В данном разделе рассмотрены правовые нормы и организационные мероприятия, обеспечивающие безопасную и эффективную трудовую деятельность, направленную на проведение расчета характеристик оптического излучения при зондировании. Выделены опасные и вредные факторы, характерные для деятельности, связанной с расчетом и эксплуатацией

исследуемого оптического излучения и определены меры по защите работника от воздействия этих факторов. Исследовано влияния эксплуатации рассматриваемого излучения на окружающую среду, определены нормы и мероприятия обеспечивающие снижения негативных воздействий на экологию. Также выделены наиболее вероятные чрезвычайные ситуации, возможные при проведении работ, и меры по минимизации риска их возникновения.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

– В рамках метода физической оптики численно реализована модель ансамбля горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов для расчета характеристик ослабления. Модель позволяет рассматривать частицы с различным спектром и разбросом размеров кристаллов, различными значениями фактор формы и размерным параметром. Модель может быть использована для исследования как полидисперсной среды, так и как компонент газовой-дисперсной среды, требующая рассмотрения оптических характеристик с высоким разрешением.

– Проведено исследование и установлены особенности модифицированного гамма-распределения частиц по размерам с различными параметрами, обеспечивающими согласование данных по микрофизическим свойствам кристаллического облака численного и натурального эксперимента.

– Получена численная оценка рассматриваемых границ изменения размеров частиц. Практическое значение этих данных состоит: (1) в рамках рассматриваемой модели обеспечивается учет границы использования метода физической оптики с заданной ошибкой; (2) позволяет ориентироваться в необходимости использования других методов расчета характеристик светорассеяния, где метод физической оптики не применим.

– Численно исследованы спектральные зависимости характеристик ослабления полидисперсной средой, основными компонентами которой являются крупные горизонтально ориентированные ледяные пластинки с различными параметрами распределения частиц по размерам. Данные соответствуют природным облакам, в состав которых входят соизмеримые по концентрации основные виды облачных кристаллов.

– Разработанный комплекс программ позволяет проводить расчеты характеристик ослабления для ансамбля крупных горизонтально ориентированных пластинок с минимальными затратами вычислительных ресурсов.

Сформированная в работе численная модель полидисперсной среды в виде ансамбля горизонтально ориентированных пластинчатых кристаллов, на основе которой разработан комплекс программ для расчета характеристик ослабления видимого и ИК излучения, **рекомендуется** для использования в исследовании аэродисперсной среды в состав которой входят такие кристаллы. Кроме того, полученный комплекс программ может быть использован как основа для реализации численных моделей, представленных другими формами рассеивателей и различной природой вещества частиц.

В качестве **перспективы дальнейшей** разработки темы предполагается разработать комплекс программ для расчета базовых характеристик однократного рассеяния, к которым относятся не только ослабление, но и поглощение, рассеяние и альбеда однократного рассеяния. Это позволит проводить численное исследование указанных характеристик, которые используются для решения широкого круга задач, связанных с лазерным зондированием, теорией переноса оптического излучения через кристаллические облака.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Nettesheim J., Wang P. A numerical study on the aerodynamics of freely falling planar ice crystals // *Atm. Sci.*, 2018. – Vol.75. – P. 2849–2865.
2. Волковицкий О.А., Павлова Л.Н., Петрушин А.Г. Оптические свойства кристаллических облаков. Л.: Гидрометеиздат, 1984. – 200 с.
3. Bi L, Yang P. Improved ice particle optical property simulations in the ultraviolet to far-infrared regime. *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2017. – Vol 189. – P. 228–237.
4. LaChapelle E. R., *Field Guide to Snow Crystals* (University of Washington Press, 1969).
5. Baran A. On the scattering and absorption properties of cirrus cloud // *J Quant Spectrosc Radiat Transf*, 2004. – Vol.89. – P. 17–36.
6. Vogelman A.M., Ackerman T.P., Relating cirrus cloud properties to observed fluxes: a critical assessment // *J. Atm. Sci*, 1995. – Vol.52. – P. 4285–4301.
7. Heymsfield A.J., Miloshevich L.M. Parameterizations for the cross-sectional area and extinction of cirrus and stratiform ice cloud particles // *J. Atm. Sci.*, 2003. – Vol.60. – P. 936–956.
8. Lawson R.P., Baker B.A., Zmarzly P., O'Connor D., Mo Q.X., Gayet J.F., et al. Microphysical and optical properties of atmospheric ice crystals at South Pole station // *J Appl Meteorol Clim*, 2006. – Vol.45. – P. 1505–1524.
9. Anthony J. Baran A review of the light scattering properties of cirrus // *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer* 110 (2009). – P. 1239–1260.
10. Platt C.M.R. Lidar backscatter from horizontal ice crystal plates // *J. Appl. Meteor.*, 1978. – Vol.17. – P. 482–488.
11. Weickmann H. K. Growth modes of atmospheric ice crystals // В кн.: *Вопросы физики облаков.* – Л.: Гидрометеиздат, 1978, с. 26–42.

12. Auer A. Influences about ice nucleation from ice crystal observations // *J. Atm. Sci.*, 1972. – Vol.29, N2. –P. 311–317.
13. Y. Hu, M. Vaughan, Z. Liu, B. Lin, P. Yang, D. Flittner, et al. The depolarization—attenuated backscatter relation: CALIPSO lidar measurements vs. theory // *Opt Express*, 2007. – P. 5327–5332.
14. Saito M, Iwabuchi H, Yang P, Tang G, King M, Sekiguchi M. Ice particle morphology and microphysical properties of cirrus clouds inferred from combined CALIOP-IIR measurements // *Geophys. Res.: Atm.*, 2017. – P. 4440–4462.
15. Auer A., Veal D. The dimensions of ice crystals in natural clouds // *J. Atm. Sci.*, 1970. –Vol.27, N6. – P. 919–926.
16. Ono A. The shape and riming properties of ice crystals in natural clouds // *J. Atm. Sci.*, 1969. –Vol.26, N1. – P. 138–147.
17. Ono A. Growth mode of ice crystals in natural clouds // *J. Atm. Sci.*, 1970. –Vol.27, N4. – P. 649–658.
18. Pruppacher H. R., Klett J. D. *Microphysics of clouds and precipitation* // D. Riedel publishing company, 1978. –P. 714.
19. Попов А.А., Шефер О.В. Аналитическое выражение коэффициента ослабления излучения кристаллами в виде пластинок // *Оптика атмосферы*, 1989. – Т.2. – №5. – с.532–536.
20. Harimaia T. Observation of size distribution of graupel and snow flake // *J. Fac. Sci., Hokkaido Univ.; ser. VII (Geophys)*, 1978. –Vol.5, N3. – P. 67–77.
21. Yagi T., Uyed a H. Different size distributions of snow based on meteorological situations // *Comm. VIII Conf. Intern. Phys. des nuages*, 1980. – Vol.1. – P. 231–234.
22. Шефер О. В. Параметризованная модель кристаллического облака для исследования характеристик однократного рассеяния лучистой энергии: дис. ... докт. физ.-мат. наук / Шефер Ольга Владимировна. — Томск, 2018. — 391 с.: ил. — Библиогр.: с. 353–373.

23. Warren S.G., Brandt R.E. Optical constants of ice from the ultraviolet to the microwave: a revised compilation // J. Geophys. Res., 2008. – Vol.113. – P.D14220.

24. Shefer O.V. Extinction of radiant energy by large atmospheric crystals with different shapes // J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 2016. – Vol.178. – P.350–360.

25. Сергиенко А.Р., Шефер О.В. Численная модель для расчета ослабления лучистой энергии горизонтально ориентированными пластинками // Молодежь и современные информационные технологии. – Томск, 2020. – С.123–124.

26. Gao M., Yang P., Kattawar G.W. Polarized extinction properties of plates with large aspect ratios // J. Quant. Spectr. Rad. Trans., 2013. – Vol.131. – P.72–81.

27. Yang P., Liou K.N. Extinction efficiency and single-scattering albedo for laboratory and nature cirrus clouds // J. Geophys. Res, 1997. – Vol.102, N.D18. – P.21825–21835

28. Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение: Учебно-методическое пособие/ И.Г. Видяев, Г.Н. Серикова, Н.А. Гаврикова, Н.В. Шаповалова, Л.Р. Тухватулина, З.В. Криницина. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2014. – 36 с.

29. Российская Федерация. Законы. Трудовой кодекс Российской Федерации [текст]: [федер. закон: принят Гос. Думой 21 дек. 2001 г.: по состоянию на 2 фев. 2020 г.]. – М.: Эксмо, 2020. – 224 с.

30. О специальной оценке условий труда: Федеральный Закон от 28 декабря 2013 N 426-ФЗ // Российская газета. – 2013. – 30.12. – 18 с.

31. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03. Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы [Текст]. – Введ. 2003.06.30. – М.: Российская газета, 2003. – 21.06. – 19 с.

32. ГОСТ 12.2.032-78 ССБТ. Рабочее место при выполнении работ сидя. Общие эргономические требования [Текст]. – Введ. 1979-01-01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2001. – 9 с.

33. ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ. Опасные и вредные производственные факторы. Классификация [Текст]. – Введ. 2017-03-01. – М.: Стандартиформ, 2016. – 12 с.

34. СанПиН 2.2.4.548-96. Гигиенические требования к микроклимату производственных помещений [Текст]. – Введ. 1996.10.01. – М.: Российская газета, 1996. – 01.10. – 14 с.

35. СН 2.2.4/2.1.8.566-96. Производственная вибрация, вибрация в помещениях жилых и общественных зданий. Санитарные нормы [Текст]. – Введ. 1996.10.31. – М.: Информационно-издательский центр Минздрава России, 1997. – 22 с.

36. СП 52.13330.2016. Естественное и искусственное освещение. Актуализированная редакция СНиП 23-05-95 [Текст]. – Введ. 2017.05.08. – М.: Минстрой России, 2016. – 102 с.

37. ГОСТ 12.1.006-84 ССБТ. Электромагнитные поля радиочастот. Общие требования безопасности. [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.006-76; введ. 1986.01.01. – М.: ИПК Издательство стандартов, 2002. – 5 с.

38. ГОСТ 12.1.003-2014 ССБТ. Шум. Общие требования безопасности [Текст]. – Взамен ГОСТ 12.1.003-83, ГОСТ 12.1.023-80; введ. 2015.11.01. – М.: Стандартиформ, 2019. – 24 с.

39. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности НРБ 99/2009 [Текст]. – Введ. 2007.09.01. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2009. – 100 с.

40. ГОСТ ИЕС 61140-2012. Защита от поражения электрическим током. Общие положения безопасности установок и оборудования [Текст]. – Введ. 2014.07.01. – М.: Стандартиформ, 2014. – 29 с.

## ПРИЛОЖЕНИЕ А

(Обязательное)

### Исходный код для расчета коэффициента ослабления

```
#include "stdafx.h"
#include <iostream>
#include <math.h>
#include <complex>
#include <fstream>
#include <iomanip>

using namespace std;

double Fact(double s)
{
    //факториал ( по свойству G(a+1)=a! )
    double si, fact = 1.0;
    if (s >= 1.0)
    {
        si = 1.0;
        while (si < s + 1.0)
        {
            fact = fact*si;
            si = si + 1.0;
        }
    }
    return fact;
}

double NaSext(double x, double am, double nu, double dv, double pm1, double pm2)
{
    double out;
    double PI = 3.14159265;
    double PM = nu; //степень локализации, ню
    double AC = am;
    double C = 1.0; //концентрация N

    double PP1 = pm1;//действительная часть от показателя преломления льда
    double PP2 = pm2;//мнимая часть от показателя преломления льда
    complex<double> I(0.0, 1.0);
    complex<double> PP(PP1, PP2);
    double DV = dv; //длина волны
    double VV = 2.0 * PI / DV;
    complex<double> T1 = PP - 1.0;
    complex<double> T2 = PP + 1.0;
    complex<double> TT = 4.0 * PP / T2 / T2;

    double D = 2.020 * pow(2.0*x, 0.4490);
    double fact = Fact(PM); //факториал
    double Na = C * pow(PM, PM + 1.0) / fact * 1.0 / AC * pow(x / AC, PM) * exp(-PM*x / AC);
    double Sext = 2.0 * PI*x*x*(1.0 - real(TT*exp(I*VV*D*T1)));

    out = Na*Sext*1.0e-6;

    return out;
}

double SNa(double x, double y, double z)
{
    double PI = 3.14159265;
    double PM = z; //степень локализации, ню
    double AC = y;
    double C = 1.0; //концентрация N

    double D = 2.020 * pow(2.0*x, 0.4490);
    double fact = Fact(PM); //факториал
    double Na = C * pow(PM, PM + 1.0) / fact * 1.0 / AC * pow(x / AC, PM) * exp(-PM*x / AC);
    double SNa = Na * PI*x*x;

    return SNa;
}

double Simpson(double a, double b, double n, double am, double nu, double dv, double pm1, double pm2)
{

```

```

double Sim = 0.0;
double S = 0.0;
double x;
double h = (b - a) / n; //шаг
x = a + h;

//Реализация метода Симпсона
for (int i = 1; i <= n; i++)
{
    if (i % 2 != 0) //нечетный
    {
        S += 4 * NaSext(x, am, nu, dv, pm1, pm2);
    }
    else //четный
    {
        S += 2 * NaSext(x, am, nu, dv, pm1, pm2);
    }
    x += h;
}

return Sim = h / 3.0 * (S + NaSext(a, am, nu, dv, pm1, pm2) - NaSext(b, am, nu, dv, pm1, pm2));
}

double Simpson2(double a, double b, double n, double y, double z)
{
    double Sim = 0.0;
    double S = 0.0;
    double x;
    double h = (b - a) / n; //шаг
    x = a + h;

    //Реализация метода Симпсона
    for (int i = 1; i <= n; i++)
    {
        if (i % 2 != 0) //нечетный
        {
            S += 4 * SNa(x, y, z);
        }
        else //четный
        {
            S += 2 * SNa(x, y, z);
        }
        x += h;
    }

    return Sim = h / 3.0 * (S + SNa(a, y, z) - SNa(b, y, z));
}

void main()
{
    setlocale(LC_ALL, "rus");
    double Sim = 0.0;
    cout << "Рассчитать значение коэффициента ослабления в конкретной точке (0) или использовать
встроенную базу данных для дины волны и коэффициента ослабления (1)? Затем нажмите Enter..." << endl;
    int choice;
    while (!(cin >> choice))
    {
        cin.clear();
        while (cin.get() != '\n');

        cout << "Ошибка. Введите 0 или 1...\n";
    }
    cout << "Задайте величину среднего размера частиц (мкм)..."<< endl;
    double a;
    while (!(cin >> a) || (cin.peek() != '\n'))
    {
        cin.clear();
        while (cin.get() != '\n');
        cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
    }
    cout << "Задайте величину безразмерного параметра, характеризующего крутизну склонов ..." << endl;
    double nu;
    while (!(cin >> nu) || (cin.peek() != '\n'))
    {
        cin.clear();
        while (cin.get() != '\n');
    }
}

```

```

        cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
    }

    double am = a / (1.0 + 1.0 / nu);

    //расчёты
    if (choice == 0)
    {
        cout << "Введите величину длины волны (мкм)..." << endl;
        double DV;
        while (!(cin >> DV) || (cin.peek() != '\n'))
        {
            cin.clear();
            while (cin.get() != '\n');
            cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
        }
        cout << "Введите значение показателя преломления (вещественной части)..." << endl;
        double PM1;
        while (!(cin >> PM1) || (cin.peek() != '\n'))
        {
            cin.clear();
            while (cin.get() != '\n');
            cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
        }
        cout << "Введите значение показателя поглощения (мнимой части)..." << endl;
        double PM2;
        while (!(cin >> PM2) || (cin.peek() != '\n'))
        {
            cin.clear();
            while (cin.get() != '\n');
            cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
        }
        cout << "Введите величину левой границы интегрирования (мкм)..." << endl;
        double left;
        while (!(cin >> left) || (cin.peek() != '\n'))
        {
            cin.clear();
            while (cin.get() != '\n');
            cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
        }
        cout << "Введите величину правой границы интегрирования (мкм)..." << endl;
        double right;
        while (!(cin >> right) || (cin.peek() != '\n'))
        {
            cin.clear();
            while (cin.get() != '\n');
            cout << "Ошибка ввода! Пожалуйста, введите корректное значение...\n";
        }
    }

    cout << endl;
    double Aext = Simpson(left, right, 50000.0, am, nu, DV, PM1, PM2);
    cout << "Вычисленное значение коэффициента ослабления - " << Aext << endl;
}
else {
    double dv[] = {
0.04430,0.04510,0.04590,0.04680,0.04770,0.04860,0.04960,0.05060,0.05170,0.05280,
0.05390,0.05510,0.05640,0.05770,0.0590,0.06050,0.0620,0.06360,0.06530,0.0670,
0.06890,0.07080,0.07290,0.07380,0.07510,0.07750,0.080,0.08270,0.08550,0.08860,
0.09180,0.0930,0.09540,0.09920,0.10330,0.10780,0.110,0.11270,0.1140,0.11810,
0.1210,0.1240,0.12720,0.12950,0.13050,0.13190,0.13330,0.13480,0.13620,0.1370,
0.13780,0.13870,0.13930,0.14090,0.14250,0.14350,0.14420,0.1450,0.14590,0.14680,
0.14760,0.1480,0.14850,0.14940,0.15120,0.15310,0.1540,0.1550,0.15690,0.1580,
0.15890,0.1610,0.1630,0.1650,0.1670,0.1690,0.1710,0.1730,0.1750,0.1770,
0.1790,0.1810,0.1830,0.1850,0.1870,0.1890,0.1910,0.1930,0.1950,0.1970,
0.1990,0.2010,0.20190,0.210,0.250,0.30,0.350,0.390,0.40,0.410,
0.420,0.430,0.440,0.450,0.460,0.470,0.480,0.490,0.50,0.510,
0.520,0.530,0.540,0.550,0.560,0.570,0.580,0.590,0.60,0.610,
0.620,0.630,0.640,0.650,0.660,0.670,0.680,0.690,0.70,0.710,
0.720,0.730,0.740,0.750,0.760,0.770,0.780,0.790,0.80,0.810,
0.820,0.830,0.840,0.850,0.860,0.870,0.880,0.890,0.90,0.910,
0.920,0.930,0.940,0.950,0.960,0.970,0.980,0.990,1.00,1.0100,
1.0200,1.0300,1.0400,1.0500,1.0600,1.0700,1.0800,1.0900,1.100,1.1100,
1.120,1.130,1.140,1.150,1.160,1.170,1.180,1.190,1.20,1.210,
1.220,1.230,1.240,1.250,1.260,1.270,1.280,1.290,1.30,1.310,
1.320,1.330,1.340,1.350,1.360,1.370,1.380,1.390,1.40,1.410,
1.420,1.430,1.440,1.4490,1.460,1.4710,1.4810,1.4930,1.5040,1.5150,

```

```

1.5270,1.5380,1.5630,1.5870,1.610,1.650,1.680,1.70,1.730,1.760,
1.80,1.830,1.840,1.850,1.8550,1.860,1.870,1.890,1.9050,1.9230,
1.9420,1.9610,1.980,2.000,2.020,2.0410,2.0620,2.0830,2.1050,2.130,
2.150,2.170,2.190,2.220,2.240,2.2450,2.250,2.260,2.270,2.290,
2.310,2.330,2.350,2.370,2.390,2.410,2.430,2.460,2.50,2.520,
2.550,2.5650,2.580,2.590,2.60,2.620,2.6750,2.7250,2.7780,2.8170,
2.8330,2.8490,2.8650,2.8820,2.8990,2.9150,2.9330,2.950,2.9670,2.9850,
3.0030,3.0210,3.040,3.0580,3.0770,3.0960,3.1150,3.1350,3.1550,3.1750,
3.1950,3.2150,3.2360,3.2570,3.2790,3.30,3.3220,3.3450,3.3670,3.390,
3.4130,3.4360,3.460,3.4840,3.5090,3.5340,3.5590,3.6240,3.7320,3.7750,
3.8470,3.9690,4.0990,4.2390,4.3480,4.3870,4.4440,4.5050,4.5470,4.560,
4.580,4.7190,4.9040,5.00,5.10,5.20,5.2630,5.40,5.5560,5.7140,
5.7470,5.780,5.8140,5.8480,5.8820,6.0610,6.1350,6.250,6.2890,6.3290,
6.3690,6.410,6.4520,6.4940,6.5790,6.6670,6.7570,6.8970,7.0420,7.1430,
7.2460,7.3530,7.4630,7.5760,7.6920,7.8120,7.9370,8.0650,8.1970,8.3330,
8.4750,8.6960,8.9290,9.0910,9.2590,9.5240,9.8040,10.00,10.20,10.310,
10.420,10.530,10.640,10.750,10.870,11.00,11.110,11.360,11.630,11.90,
12.20,12.50,12.820,12.990,13.160,13.330,13.510,13.70,13.890,14.080,
14.290,14.710,15.150,15.380,15.630,16.130,16.390,16.670,16.950,17.240,
18.180,18.320,18.610,18.870,19.230,19.610,20.00,20.410,20.830,22.220,
22.60,23.050,23.60,24.60,25.00,26.0,28.570,31.00,33.330,34.480,
35.640,37.0,38.240,39.60,41.140,42.760,43.580,44.580,45.50,46.150,
46.710,47.360,48.0,48.780,50.030,51.280,52.750,53.50,54.240,55.00,
55.740,56.40,57.00,57.460,58.40,59.290,60.00,61.00,61.250,62.50,
63.780,64.670,65.580,66.550,67.60,69.00,70.530,73.00,75.00,76.290,
80.00,82.970,85.00,86.80,90.800,95.170,100.00 };
double pm1[] = {
0.82280,0.8250,0.82550,0.82580,0.82630,0.82810,0.83470,0.84280,0.84830,0.85050,
0.84970,0.84890,0.85190,0.85660,0.86470,0.87970,0.8970,0.91730,0.940,0.96790,
1.00930,1.05360,1.09860,1.11830,1.14490,1.18850,1.22730,1.26290,1.31170,1.38070,
1.40910,1.40280,1.39480,1.39640,1.40470,1.39810,1.38860,1.38060,1.37720,1.37830,
1.39290,1.40610,1.39990,1.37770,1.36070,1.33890,1.3210,1.3030,1.28710,1.28490,
1.28510,1.2970,1.31510,1.35750,1.4130,1.45250,1.48450,1.51570,1.54840,1.57290,
1.59150,1.60210,1.60770,1.61560,1.6220,1.63110,1.63450,1.63630,1.63530,1.63090,
1.62140,1.58180,1.54820,1.52250,1.50270,1.4870,1.47430,1.46350,1.45430,1.44620,
1.4390,1.43260,1.42680,1.42150,1.41670,1.41220,1.40810,1.40430,1.40070,1.39740,
1.39430,1.39140,1.39010,1.38010,1.35090,1.33390,1.32490,1.32030,1.31940,1.31850,
1.31770,1.3170,1.31630,1.31570,1.31510,1.31450,1.3140,1.31350,1.3130,1.31260,
1.31210,1.31170,1.31140,1.3110,1.31060,1.31030,1.310,1.30970,1.30940,1.30910,
1.30880,1.30850,1.30830,1.3080,1.30780,1.30760,1.30730,1.30710,1.30690,1.30670,1.30650,
1.30620,1.3060,1.30590,1.30570,1.30550,1.30530,1.30510,1.30490,1.30470,1.30460,
1.30440,1.30420,1.3040,1.30390,1.30370,1.30350,1.30330,1.30320,1.3030,1.30280,
1.30270,1.30250,1.30230,1.30220,1.3020,1.30190,1.30170,1.30150,1.30140,1.30120,
1.3010,1.30090,1.30070,1.30050,1.30030,1.30020,1.30,1.29980,1.29970,1.29950,
1.29930,1.29910,1.2990,1.29880,1.29860,1.29840,1.29820,1.2980,1.29790,1.29770,
1.29750,1.29730,1.29710,1.29690,1.29670,1.29650,1.29630,1.29610,1.29590,1.29570,
1.29550,1.29530,1.29510,1.29490,1.29460,1.29440,1.29410,1.29390,1.29370,1.29340,
1.29310,1.29290,1.29270,1.29240,1.29210,1.2920,1.29180,1.29160,1.29140,1.29120,
1.29090,1.29030,1.28970,1.2890,1.28790,1.2870,1.28630,1.28530,1.28430,1.28280,
1.28160,1.28110,1.28070,1.28050,1.28020,1.27970,1.27880,1.2780,1.27710,1.27620,
1.27560,1.2750,1.27440,1.27360,1.27280,1.27180,1.27070,1.26940,1.26770,1.26630,
1.26480,1.26330,1.26090,1.25910,1.25870,1.25820,1.25730,1.25640,1.25450,1.25250,
1.25040,1.24820,1.24590,1.24350,1.24090,1.23820,1.23370,1.2270,1.22320,1.21690,
1.21350,1.20970,1.20710,1.20430,1.19830,1.17760,1.15070,1.10830,1.06570,1.04530,
1.02360,1.00010,0.97470,0.95630,0.95380,0.96780,0.98730,1.00260,1.0180,1.0390,
1.07220,1.12590,1.20890,1.32150,1.42250,1.49330,1.54780,1.5970,1.63360,1.64770,
1.64050,1.62480,1.61080,1.59050,1.57140,1.55590,1.53960,1.52410,1.50860,1.49490,
1.48270,1.4710,1.46040,1.45020,1.44110,1.43280,1.41460,1.39240,1.3850,1.3750,
1.36230,1.35260,1.34470,1.34060,1.34010,1.34120,1.34440,1.34730,1.34820,1.34910,
1.3470,1.33790,1.33250,1.32680,1.32120,1.31760,1.310,1.30130,1.29330,1.29170,
1.29060,1.29020,1.29040,1.29150,1.30150,1.30830,1.31520,1.31670,1.31780,1.31870,
1.31940,1.32010,1.32070,1.32140,1.32190,1.32290,1.32420,1.32440,1.32360,1.32290,
1.32180,1.320,1.31830,1.31580,1.31230,1.30860,1.30470,1.30070,1.29640,1.29170,
1.28350,1.27350,1.26550,1.25610,1.23870,1.21510,1.19260,1.16590,1.15010,1.13230,
1.11360,1.09710,1.08670,1.08330,1.08860,1.10230,1.14390,1.19830,1.25460,1.31940,
1.38220,1.44120,1.46830,1.49280,1.51320,1.530,1.54580,1.55960,1.57010,1.57750,
1.57620,1.56370,1.55590,1.54810,1.53530,1.53020,1.52940,1.53060,1.53030,1.51410,
1.51040,1.50430,1.49820,1.49390,1.49630,1.49860,1.49560,1.48770,1.45750,1.44860,
1.4390,1.42820,1.41020,1.4030,1.38540,1.34040,1.29690,1.26410,1.2530,1.24450,
1.23710,1.23170,1.22430,1.20540,1.17420,1.15490,1.14960,1.18530,1.25430,1.34740,
1.47250,1.58740,1.68410,1.75050,1.76490,1.76680,1.76870,1.77920,1.79550,1.80520,
1.80410,1.7940,1.78050,1.7410,1.6930,1.6610,1.64190,1.63960,1.63720,1.64710,
1.65960,1.67540,1.69450,1.71670,1.74660,1.7780,1.81850,1.84190,1.85040,1.86170,
1.86690,1.86880,1.86990,1.86980,1.86810,186540 };
double pm2[] = { 0.1640,0.1730,0.1830,0.1950,0.2080,0.2230,0.240,0.250,0.2590,0.2680,

```

```

0.2790,0.2970,0.3190,0.340,0.3660,0.3920,0.4160,0.440,0.4640,0.4920,
0.5170,0.5280,0.5330,0.5340,0.5310,0.5240,0.510,0.50,0.4990,0.4680,
0.380,0.360,0.3390,0.3180,0.2910,0.2510,0.2440,0.2390,0.2390,0.2440,
0.2470,0.2240,0.1950,0.1740,0.1720,0.180,0.1940,0.2130,0.2430,0.2710,
0.2890,0.3340,0.3440,0.3820,0.4010,0.40650,0.4050,0.3890,0.3770,0.3450,
0.3320,0.3150,0.2980,0.2740,0.2280,0.1980,0.1720,0.1560,0.110,0.0830,
0.0580,0.0220,0.008470,0.003260,0.001260,4.8370e-4,1.8620e-4,7.1650e-5,2.7570e-
5,1.0610e-5,
4.0810e-6,1.570e-6,5.4030e-7,1.8290e-7,6.2180e-8,2.1130e-8,7.1810e-9,2.440e-
9,8.2890e-10,2.8160e-10,
9.5650e-11,3.2490e-11,2.0e-11,2.0e-11,2.0e-11,2.0e-11,2.0e-11,2.0e-11,2.3650e-
11,2.6690e-11,3.1350e-11,
4.140e-11,6.2680e-11,9.2390e-11,1.3250e-10,1.9560e-10,2.8610e-10,4.1720e-
10,5.8890e-10,8.0360e-10,1.0760e-9,
1.4090e-9,1.8130e-9,2.2890e-9,2.8390e-9,3.4610e-9,4.1590e-9,4.930e-9,5.730e-
9,6.890e-9,8.580e-9,
1.040e-8,1.220e-8,1.430e-8,1.660e-8,1.890e-8,2.090e-8,2.40e-8,2.90e-8,3.440e-
8,4.030e-8,
4.30e-8,4.920e-8,5.870e-8,7.080e-8,8.580e-8,1.020e-7,1.180e-7,1.340e-7,1.40e-
7,1.430e-7,
1.450e-7,1.510e-7,1.830e-7,2.150e-7,2.650e-7,3.350e-7,3.920e-7,4.20e-7,4.440e-
7,4.740e-7,
5.110e-7,5.530e-7,6.020e-7,7.550e-7,9.260e-7,1.120e-6,1.330e-6,1.620e-6,2.0e-
6,2.250e-6,
2.330e-6,2.330e-6,2.170e-6,1.960e-6,1.810e-6,1.740e-6,1.730e-6,1.70e-6,1.760e-
6,1.820e-6,
2.040e-6,2.250e-6,2.290e-6,3.040e-6,3.840e-6,4.770e-6,5.760e-6,6.710e-6,8.660e-
6,1.020e-5,
1.130e-5,1.220e-5,1.290e-5,1.320e-5,1.350e-5,1.330e-5,1.320e-5,1.320e-5,1.310e-
5,1.320e-5,1.340e-5,1.390e-5,1.420e-5,1.480e-5,1.580e-5,1.740e-5,1.980e-5,3.4420e-
5,5.9590e-5,
1.0280e-4,1.5160e-4,2.030e-4,2.9420e-4,3.9870e-4,4.9410e-4,5.5320e-4,5.3730e-
4,5.1430e-4,4.9080e-4,
4.5940e-4,3.8580e-4,3.1050e-4,2.6590e-4,2.3610e-4,2.0460e-4,1.8750e-4,1.650e-
4,1.5220e-4,1.4110e-4,
1.3020e-4,1.310e-4,1.3390e-4,1.3770e-4,1.4320e-4,1.6320e-4,2.5660e-4,4.0810e-
4,7.060e-4,0.001110,
0.001440,0.001610,0.001640,0.001570,0.001460,0.001270,0.001020,7.5860e-4,5.2550e-
4,4.0250e-4,
3.2350e-4,2.7070e-4,2.2280e-4,2.0370e-4,2.0260e-4,2.0350e-4,2.0780e-4,2.1710e-
4,2.5380e-4,3.1380e-4,
3.8580e-4,4.5910e-4,5.1870e-4,5.6050e-4,5.9560e-4,6.2590e-4,6.820e-4,7.530e-
4,7.6850e-4,7.6470e-4,
7.4730e-4,7.3920e-4,7.4370e-4,7.5430e-4,8.0590e-
4,0.001370,0.003510,0.013460,0.032450,0.045720,
0.062870,0.085480,0.11980,0.1690,0.2210,0.2760,0.3120,0.3470,0.3880,0.4380,0.4930,0.5540,
0.6120,0.6250,0.5930,0.5390,0.4910,0.4380,0.3720,0.30,0.2380,0.1930,0.1580,0.1210
0.1030,0.08360,0.06680,0.053120,0.042860,0.035230,0.028870,0.023470,0.019210,0.015860,0.013260,0.0
1130,
0.008150,0.006670,0.006970,0.008250,0.011120,0.014710,0.018670,0.024110,0.026560,0.02990,0.031790,
0.03090,
0.030070,0.028830,0.01940,0.013470,0.01240,0.01220,0.013020,0.01380,0.016830,0.022320,0.032560,0.0
35390,
0.038830,0.04270,0.046430,0.050450,0.064390,0.06560,0.06360,0.062650,0.06170,0.061010,0.060310,0.0
59640,
0.058990,0.05780,0.0570,0.05680,0.054280,0.051610,0.04940,0.04840,0.0460,0.04440,0.04290,0.040410,
0.039110,0.038190,0.03760,0.037240,0.0370,0.036770,0.036540,0.036640,0.037060,0.037890,0.040260,0.
04450,
0.050080,0.064610,0.0750,0.0880,0.1080,0.1340,0.1680,0.2040,0.2480,0.280,0.3410,0.3790,0.4090,0.42
20,
0.4220,0.4030,0.3890,0.3740,0.3540,0.3350,0.3150,0.2940,0.2710,0.2460,0.1980,0.1640,0.1520,0.1420
0.1280,0.1250,0.1230,0.1160,0.1070,0.0790,0.077520,0.074550,0.0720,0.0760,0.0750,0.0670,0.0550,0.0
450,
0.0290,0.02750,0.0270,0.02730,0.02890,0.030,0.0340,0.051220,0.086150,0.13480,0.16150,0.18950,0.222
70,
0.25280,0.28530,0.3240,0.39450,0.45210,0.55350,0.67820,0.76840,0.82540,0.84580,0.81580,0.74140,
0.61910,0.53530,0.4780,0.45990,0.44680,0.42140,0.3860,0.35080,0.31960,0.29810,0.26590,0.25690,
0.27850,0.30760,0.31460,0.34710,0.37480,0.39020,0.40240,0.41150,0.41670,0.41670,0.40890,0.3830,
0.35430,0.3340,0.29440,0.26790,0.25190,0.2390,0.2140,0.19130,0.17060 };

```

```

double dv_x[29501];
double pm1_x[29501];
double pm2_x[29501];
double dv_per = 0.5;

```

```

double P = 1.0;
bool f = false;
for (int n = 0; n < 29501; n++)
{
    f = false;
    for (int i = 0; i < 467; i++)
    {
        if ((dv_per < dv[i]) && (f == false))
        {
            if (dv_per == dv[i - 1])
            {
                dv_x[n] = dv_per;
                pm1_x[n] = pm1[i - 1];
                pm2_x[n] = pm2[i - 1];
                f = true;
            }
            else
            {
                dv_x[n] = dv_per;
                P = (dv_per - dv[i - 1]) / (dv[i] - dv[i - 1]);
                pm1_x[n] = P*(pm1[i] - pm1[i - 1]) + pm1[i - 1];
                pm2_x[n] = P*(pm2[i] - pm2[i - 1]) + pm2[i - 1];
                f = true;
            }
        }
    }
    dv_per += 0.001;
}

ofstream outData;
outData.open("dv_x.csv", ios::app);
for (int i = 0; i < 29501; i++)
{
    string perem = std::to_string(dv_x[i]);
    bool f = false;
    for (int j = 0; ((j < perem.length()) && (f == false)); j++)
    {
        if (perem[j] == '.')
        {
            perem[j] = ',';
            f = true;
        }
    }
    outData << perem << endl;
}
outData.close();
outData.open("pm1_x.csv", ios::app);
for (int i = 0; i < 29501; i++)
{
    string perem = std::to_string(pm1_x[i]);
    bool f = false;
    for (int j = 0; ((j < perem.length()) && (f == false)); j++)
    {
        if (perem[j] == '.')
        {
            perem[j] = ',';
            f = true;
        }
    }
    outData << perem << endl;
}
outData.close();
outData.open("pm2_x.csv", ios::app);
for (int i = 0; i < 29501; i++)
{
    char perem[16];
    std::stringstream ss;
    ss << pm2_x[i];
    ss >> perem;
    bool f = false;
    for (int j = 0; ((j < 16) && (f == false)); j++)
    {
        if (perem[j] == '.')
        {
            perem[j] = ',';
        }
    }
}

```

```

        f = true;
    }
    }
    outData << perem << endl;
}
outData.close();

double Aext[29501];
outData.open("Aext_x.csv", ios::app);
for (int i = 0; i < 29501; i++)
{
    string perem = std::to_string(Aext[i]);
    bool f = false;
    for (int j = 0; ((j < perem.length()) && (f == false)); j++)
    {
        if (perem[j] == '.')
        {
            perem[j] = ',';
            f = true;
        }
    }
    outData << perem << endl;
}
outData.close();
}
cout << "Конец вывода..." << endl;
system("pause");
}

```

**ПРИЛОЖЕНИЕ Б**  
(обязательное)

Таблица Б.1 – Трудозатраты на выполнение проекта

Этап	Исполнители	Продолжительность работ, дни			Трудоемкость работ по исполнителям чел.-дн.			
					$T_{РД}$		$T_{КД}$	
		$t_{min}$	$t_{max}$	$t_{ож}$	НР	И	НР	И
Постановка целей и задач	НР	1	2	1,40	1,61	0	1,95	0
Разработка и утверждение технического задания (ТЗ)	НР, И	2	3	2,40	2,76	0,28	3,35	0,34
Подбор и изучение материалов по тематике	НР, И	3	6	4,20	1,45	4,83	1,76	5,85
Разработка календарного плана	НР, И	1	2	1,40	1,61	0,16	1,95	0,19
Обсуждение литературы	НР, И	2	4	2,80	0,64	3,22	0,78	3,90
Выбор исходных параметров и необходимых выходных характеристик	НР, И	2	4	2,80	3,22	1,29	3,90	1,56
Подбор методов для расчета характеристик	НР, И	3	6	4,2	4,83	3,86	5,85	4,68
Реализация программы	И	6	10	7,60	0	8,74	0	10,59
Оформление полученных зависимостей в виде графиков и таблиц	И	2	4	2,80	0	3,22	0	3,90
Подведение итогов	НР, И	1	2	1,40	0,97	1,61	1,18	1,95
Итого:				31	17,09	27,23	20,71	33,00

**ПРИЛОЖЕНИЕ В**  
(обязательное)

Таблица В.1 – Линейный график работы

Этап	НР	И	3	6	9	12	15	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45
1	1,95	0	■														
2	3,35	0,34	■	■													
3	1,76	5,85		■	■	■											
4	1,95	0,19				■											
5	0,78	3,90					■	■									
6	3,90	1,56						■	■								
7	5,85	4,68								■	■						
8	0	10,59										■	■	■	■		
9	0	3,90													■	■	
10	1,18	1,95														■	■

НР – ■; И – ■