

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий

Направление подготовки 14.04.02 Ядерные физика и технологии / Технологии радиационной безопасности

Отделение школы (НОЦ) Отделения ядерно-топливного цикла

### МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

Тема работы
<b>Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова релятивистских электронов</b>
УДК <u>539.1.074.4:539.121</u>

Студент

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0АМ84	Сергеев Михаил Владимирович		

Руководитель ВКР

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	А.П. Потылицын	д.ф. – м.н.		

### КОНСУЛЬТАНТЫ ПО РАЗДЕЛАМ:

По разделу «Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	И.В. Кащук	к.т.н		

По разделу «Социальная ответственность»

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф. – м.н.		

### ДОПУСТИТЬ К ЗАЩИТЕ:

Руководитель ООП	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШЯТ ОЯТЦ	Д.А. Веригин	к.ф. – м.н.		

Томск – 2020 г.

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии / Технологии радиационной безопасности  
 Отделение школы (НОЦ) Отделения ядерно-топливного цикла

УТВЕРЖДАЮ:  
 Руководитель ООП  
 \_\_\_\_\_ Веригин Д.А.  
 (Подпись)     (Дата)     (Ф.И.О.)

**ЗАДАНИЕ**  
**на выполнение выпускной квалификационной работы**

В форме:

Магистерской диссертации
--------------------------

Студенту:

Группа	ФИО
0AM84	Сергеев Михаил Владимирович

Тема работы:

Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова релятивистских электронов	
Утверждена приказом директора (дата, номер)	№59-93/с от 28.02.2020

Срок сдачи студентом выполненной работы:

--	--

**ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ:**

<b>Исходные данные к работе</b>	Дифракционное излучение Вавилова- Черенкова, дифракционное излучение, спектральное распределение, угловое распределение, интенсивность излучения, электронный пучок
<b>Перечень подлежащих исследованию, проектированию и разработке вопросов</b>	Аналитический обзор литературных источников; проводилось моделирование спектральных и угловых распределений дифракционного излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения от диэлектрической призмы при помощи математического пакета Wolfram Mathematica 11 для различных параметров пучка, мишени, излучения; Социальная ответственность,

	финансовый менеджмент, ресурсоэффективность.
<b>Перечень графического материала</b>	91 рисунок

**Консультанты по разделам выпускной квалификационной работы**

Раздел	Консультант
Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова	Профессор ИШФВП, д.ф.-м.н. Потылицын Александр Петрович
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	Доцент ОСГН ШБИП к.т.н Кашук Ирина Вадимовна
Социальная ответственность	Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ к.ф.-м.н. Гоголева Татьяна Сергеевна
Английская часть	Преподаватель ШБИП ОИЯ Смирнова Ульяна Александровна

**Названия разделов, которые должны быть написаны на русском и иностранном языках:**

Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова
Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова от диэлектрической призмы
Социальная ответственность
Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение
Vavilov-Cherenkov diffraction radiation

<b>Дата выдачи задания на выполнение выпускной квалификационной работы по линейному графику</b>	
---	--

**Задание выдал руководитель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	А.П. Потылицын	д.ф.-м.н		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	М.В. Сергеев		

## Планируемые результаты освоения

Код	Результат обучения*	Требования ФГОС ВО, СУОС, критериев АИОР, и/или заинтересованных сторон
Общие по направлению подготовки (специальности)		
P1	Применять глубокие, математические, естественнонаучные, социально-экономические и профессиональные знания для теоретических и экспериментальных исследований в области использования ядерной энергии, систем учета, контроля и физической защиты источников ионизирующего излучения, технологий радиационной безопасности и защиты от ионизирующего излучения, в профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОПК-1,2, ПК-3, УК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.1), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P2	Ставить и решать инновационные инженерно-физические задачи, реализовывать проекты в области использования ядерной энергии, систем учета, контроля и физической защиты источников ионизирующего излучения, технологий радиационной безопасности и защиты от ионизирующего излучения.	Требования ФГОС (ПК-9,10,13, 14, 15, ОПК-1,УК-4), Критерий 5 АИОР (пп.1.2), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P3	Создавать теоретические, физические и математические модели, описывающие распространение и взаимодействие ионизирующих излучений с веществом и живой материей, процессы в реакторах и ускорителях, процессы и механизмы переноса радиоактивности в окружающей среде.	Требования ФГОС (ПК-1,13, 22, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.3) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P4	Разрабатывать новые алгоритмы и методы: расчета современных физических установок и устройств; измерения характеристик полей ионизирующих излучений; оценки количественных характеристик источников ионизирующего излучения; измерения радиоактивности объектов окружающей среды; исследований в радиоэкологии.	Требования ФГОС (ПК-2, 4, 6, 8, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.4) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P5	Оценивать перспективы развития ядерной отрасли, анализировать радиационные риски и сценарии потенциально возможных аварий, разрабатывать меры по снижению рисков и обеспечению ядерной и радиационной безопасности руководствуясь законами и нормативными документами, составлять экспертное заключение.	Требования ФГОС (ПК-5, 7, 11, 12, УК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (п.1.4), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P6	Проектировать и организовывать инновационный бизнес, разрабатывать и внедрять новые виды продукции и технологий, формировать эффективную стратегию и активную политику риск-менеджмента на предприятии, применять методы оценки качества и результативности труда персонала, применять знание основных положений патентного законодательства и авторского права Российской Федерации.	Требования ФГОС (ПК-16-21, 23, УК-2), Критерий 5 АИОР (п.1.5) , требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P7	Демонстрировать глубокие знания социальных, этических и культурных аспектов инновационной профессиональной деятельности.	Требования ФГОС (ОПК-1, УК-4, 5), Критерий 5 АИОР (пп.2.4,2.5)
P8	Самостоятельно учиться и непрерывно повышать квалификацию в течение всего периода профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ( УК-6, ПК-1, ОПК-1), Критерий 5 АИОР (2.6), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P9	Активно владеть иностранным языком на уровне, позволяющем работать в иноязычной среде, разрабатывать документацию, презентовать результаты профессиональной деятельности.	Требования ФГОС ( ПК-11, 16, 17, УК-4, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (п.2.2), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
P10	Эффективно работать индивидуально и в коллективе,	Требования ФГОС (ПК-18, 23, УК-

	демонстрировать ответственность за результаты работы и готовность следовать корпоративной культуре организации.	3,6, ОПК-3), Критерий 5 АИОР (пп.1.6, 2.3), требования профессиональных стандартов 24.020, 24.079, 24.030
--	---	---

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

Школа Инженерная школа ядерных технологий  
 Направление подготовки 14.04.02 Ядерная физика и технологии / Технологии радиационной безопасности  
 Уровень образования Магистратура  
 Отделение школы (НОЦ) Отделения ядерно-топливного цикла  
 Период выполнения 2018/2020 учебные года

Форма представления работы:

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)
09.03.2020	Составление технического задания и выбор направления исследования	5
16.03.2020	Разработка общей методики проведения исследований	5
18.03.2020	Подбор и изучение материалов по теме	5
25.03.2020	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	10
03.04.2020	Проведение расчетов	20
23.04.2020	Создание графических зависимостей	10
30.04.2020	Анализ и описание результатов	10
14.05.2020	Проверка полученных результатов	10
29.05.2020	Оформление выполненной работы	10
01.06.2020	Подготовка к защите диссертационной работы	15

**Составил преподаватель:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВТ	А.П. Потылицын	д.ф.-м.ф.		

**СОГЛАСОВАНО:  
Руководитель ОПП**

Зав. кафедрой	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ИШЯТ ОЯЦТ	Д.А. Веригин	к.ф.-м.н.		

## ЗАДАНИЕ ДЛЯ РАЗДЕЛА «СОЦИАЛЬНАЯ ОТВЕТСТВЕННОСТЬ»

Студенту:

Группа	ФИО
0AM84	Сергеев Михаил Владимирович

Школа	Магистрант	Отделение (НОЦ)	14.04.02 Ядерная физика и технологии/Технологии радиационной безопасности
Уровень образования		Направление/специальность	

Тема ВКР:

<b>Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова релятивистских электронов</b>	
<b>Исходные данные к разделу «Социальная ответственность»:</b>	
1. Характеристика объекта исследования (вещество, материал, прибор, алгоритм, методика, рабочая зона) и области его применения	Теоретическое исследование дифракционного излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при пролете заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени.
<b>Перечень вопросов, подлежащих исследованию, проектированию и разработке:</b>	
<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.	– ГОСТ 12.0.002-2014 – ГОСТ 12.0.003.2015 – ФЗ «Об основах охраны труда» №181-ФЗ – ГОСТ 12.1.004-91
<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 параметров микроклимата; – шум; – электромагнитное излучение; – недостаточная освещенность рабочей зоны; – психофизиологические нагрузки; – электрический ток.
<b>3. Экологическая безопасность:</b>	– влияние высокотехнологических продуктов на окружающую среду; – процесс переработки электроники.
<b>4. Безопасность в чрезвычайных ситуациях:</b>	– анализ типичной ЧС: пожар на рабочем месте; – превентивные меры и порядок действий при возникновении ЧС.

Дата выдачи задания для раздела по линейному графику	
--	--

Задание выдал консультант:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Ассистент ИШЯТ ОЯТЦ	Т.С. Гоголева	к.ф.-м.н		

Задание принял к исполнению студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Сергеев Михаил Владимирович		

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

Студенту:

Группа 0AM84	ФИО Сергеев Михаил Владимирович
-----------------	------------------------------------

Школа	ИШЯТ	Отделение Школа	ОЯТЦ
<b>Уровень образования</b>	Магистрант	<b>Направление/специальность</b>	14.03.02 Ядерные физика и технологии/ Технологии радиационной безопасности

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

<i>1. Стоимость ресурсов научного исследования (НИ): материально-технических, энергетических, финансовых, информационных и человеческих</i>	<i>Стоимость материальных ресурсов и специального оборудования определены в соответствии с рыночными ценами г. Томска Тарифные ставки исполнителей определены штатным расписанием НИ ТПУ</i>
<i>2. Нормы и нормативы расходования ресурсов</i>	<i>Норма амортизационных отчислений на специальное оборудование</i>
<i>3. Используемая система налогообложения, ставки налогов, отчислений, дисконтирования и кредитования</i>	<i>Отчисления во внебюджетные фонды 30 %</i>

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

<i>1. Анализ конкурентных технических решений (НИ)</i>	<i>Расчет конкурентоспособности SWOT-анализ</i>
<i>2. Формирование плана и графика разработки и внедрения (НИ)</i>	<i>Структура работ. Определение трудоемкости. Разработка графика проведения исследования</i>
<i>3. Составление бюджета инженерного проекта (НИ)</i>	<i>Расчет бюджетной стоимости НИ</i>
<i>4. Оценка ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности (НИ)</i>	<i>Интегральный финансовый показатель. Интегральный показатель ресурсоэффективности. Интегральный показатель эффективности.</i>

**Перечень графического материала**

<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Оценка конкурентоспособности ИП</li> <li>2. Матрица SWOT</li> <li>3. Диаграмма Ганта</li> <li>4. Бюджет НИ</li> <li>5. Основные показатели эффективности НИ</li> </ol>
--

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

**Задание выдал консультант:**

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Доцент ОСГН ШБИП	Кашук Ирина Вадимовна	К.Т.Н доцент		

**Задание принял к исполнению студент:**

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Сергеев Михаил Владимирович		

## Оглавление

Аннотация.....	12
Реферат .....	13
Введение .....	14
1 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова .....	15
1.1 Генерация поляризованного излучения .....	15
1.2 Излучение Вавилова-Черенкова .....	17
1.3 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова.....	18
2 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова от диэлектрической призмы .....	20
2.1 Спектрально-угловое распределение плотности ДИ и ДИВЧ .....	20
2.2 Проверка границ применимости .....	22
2.3 Сравнение моделей распределений плотности ИВЧ .....	26
2.4 Сравнения распределений ДИВЧ с результатами полученными на микротроне ТПУ .....	29
2.5 Компоненты поля спектрально-углового распределения ИВЧ и ДИ..	32
2.6 Моделирование распределений для микротрона ТПУ .....	35
2.7 Моделирование для эксперимента на ускорителе КЕК.....	39
Заключение .....	64
3 Социальная ответственность .....	66
3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности ...	67
3.1.1 Правовые нормы трудового кодекса.....	67
3.1.2 Организация рабочего места исследователя .....	67
3.2 Производственная безопасность .....	70
3.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов.....	70
3.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных факторов .....	71
3.2.3 Психофизиологические факторы .....	74
3.2.4 Электробезопасность.....	75
3.3 Экологическая безопасность .....	79

3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях .....	80
Выводы .....	84
4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение	85
Введение .....	85
4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения...	86
4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования.....	86
4.1.2 Анализ конкурентных технических решений .....	86
4.1.3 SWOT-анализ.....	88
4.2 Планирование научно-исследовательских работ .....	90
4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования .....	90
4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения.....	92
4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования.....	93
4.3 Бюджет научно-технического исследования.....	96
4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ .....	96
4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования .....	97
4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы.....	97
4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы.....	99
4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления) ...	99
4.3.6 Накладные расходы .....	100
4.4 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования .....	100
Выводы по разделу .....	105
Список используемых источников .....	106
Приложение А.....	109

## **Аннотация**

Излучение Вавилова-Черенкова было открыто в 1934 году, с того момента оно было детально рассмотрено во множестве теоретических и экспериментальных работах, и широко используется во многих областях, связанных с ядерной физикой и радиоактивностью.

Позже было доказано наличие излучения Вавилова-Черенкова при прохождении заряда вблизи мишени, но считалось что интенсивность такого излучения слишком низкая для его регистрации. В 2018 году был проведен эксперимент, в котором было доказано, что некогерентное оптическое излучение Вавилова-Черенкова при пролете вблизи мишени обладает достаточной интенсивностью для его использования. Данный факт послужил толчком в проведении дальнейших теоретических и экспериментальных исследований в данной области.

В данной работе проводилось исследование дифракционного излучения Вавилова-Черенкова, возникающего при пролете заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени для пучков с энергией от 6 МэВ до 5 ГэВ. Моделирование было проведено в пакете Wolfram Mathematica.

Рассмотренный механизм излучения не сопровождается непосредственным взаимодействием частиц пучка с мишенью, что открывает перспективы невозмущающей диагностики пучков на современных ускорителях

## **Реферат**

Выпускная квалификационная работа 123 с., 91 рис., 20 табл., 32 источник.

Ключевые слова: излучение Вавилова-Черенкова, дифракционное излучение Вавилова-Черенкова, дифракционное излучение, невозмущающая диагностика, диэлектрическая призма, моделирование, Wolfram Mathematica.

Объектом исследования является: Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова (ДИВЧ).

Цель работы – Определить оптимальную геометрию и параметры диэлектрических мишеней для использования ДИВЧ, получить и использовать компоненты интенсивности поля ДИВЧ и ДИ, провести моделирования для экспериментов на ускорителях ТПУ и КЕК.

В процессе исследования проводилось моделирование характеристик дифракционного излучения Вавилова-Черенкова и дифракционного излучения с помощью математического пакета Wolfram Mathematica и обработки в Microsoft Excel.

Степень внедрения: Были проведены эксперименты по изучаемому предмету. В настоящее время ведутся теоретические проработки и подготовка к будущим экспериментам.

Область применения: Невозмущающая диагностика пучков заряженных частиц. Определение диэлектрических констант материала мишени.

Экономическая значимость работы на данный момент состоит в улучшении качества определения характеристик пучков и мишеней, так и в уменьшении времени работы оборудования.

## Введение

В данной работе были рассмотрены основные понятия поляризационного излучения, в частности излучения Вавилова-Черенкова и некоторые его свойства. Излучение Вавилова-Черенкова возникает при прохождении заряженных частиц, движущихся с постоянной скоростью, через оптически прозрачную среду, в которой скорость частиц больше фазовой скорости света в этой среде.

Излучение Вавилова-Черенкова нашло применение при его использовании в детектирующих установках. Черенковское излучение не зависит от химического состава среды, и, следовательно, при его исследовании можно определять как энергию и скорость, так и направление движения элементарных частиц от ускорителей, а также и космических лучей. В частности, детекторы черенковского излучения используют при контроле герметичности контуров ядерных установок.

В данной работе подробно исследуется так называемое дифракционное излучение Вавилова-Черенкова, которое возникает, когда пучок заряженных частиц пролетает около диэлектрической мишени, в отличии от собственно излучения Вавилова-Черенкова.

Ранее считалось, что излучение Вавилова-Черенкова, возникающее при пролете частиц вблизи диэлектрика слишком мало для того, чтобы его учитывать. В последние годы экспериментально и теоретически было показано, что мощности излучения достаточно чтобы получать информацию о характеристиках самого пучка и мишени. При прохождении заряженных частиц в непосредственной близости от мишени, поля частиц поляризуют среду в области  $\approx \gamma\beta\lambda$ , т.е. в данном случае излучение генерируется без непосредственного взаимодействия частиц с средой. Данное свойство представляет интерес, так как с его помощью возможно использовать излучение Вавилова-Черенкова в качестве одного из методов невозмущающей диагностики.

# **1 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова**

## **1.1 Генерация поляризационного излучения**

Поляризационное излучение – это электромагнитное излучение, образующееся при поляризации среды полем заряженных частиц. Под поляризационным излучением понимают излучение Вавилова-Черенкова (ИВЧ), излучение Смита-Парселла (ИСП), дифракционное излучение (ДИ), переходное излучение (ПИ) и т.д. У всех этих типов излучения единая природа генерации. При движении частиц происходит возбуждение электронных оболочек атомов материала мишени при их деформации полем движущейся заряженной частицы. Динамическая поляризация электронных оболочек является причиной генерации излучения, будь то движение около мишени как ДИ и ИСП или в материале мишени – ИВЧ, ПИ. Точное решение задачи такого типа можно получить при решении уравнения Максвелла для поля движущегося заряда, пренебрегая изменением энергии и направления движения частицы, с учетом зарядов и изменения плотности токов в материале мишени.

Первым из упомянутых ранее, было обнаружено ИВЧ вторичных электронов под воздействием гамма-излучения при исследовании люминесценции жидкостей [1]. В 1953 году впервые зарегистрировано ИСП прохождении электронного пучка вблизи поверхности с периодически меняющимися электродинамическими характеристиками – дифракционной решетки [2]. Применение ИСП на данный момент рассматривается достаточно широко, для генерации ТГц излучения, спектроскопии, невозмущающей диагностики, применение в области медицины и др. [3, 4]. ДИ, которое было получено теоретически Франком И.М. еще в сороковых годах, после обнаружения ИСП, было детально изучено на нерелятивистских пучках заряженных частиц в сантиметровом диапазоне длин волн, которое привело к возникновению нового ответвления сверхвысокочастотной электроники, развитие которого не останавливается до сих пор [5, 6]. Теория ПИ начала свое бурное развитие с момента написания первой статьи Гинзбургом В.Л. и Франком И.М. в 1945 году, в которой они теоретически предсказали этот вид

излучения [7]. Из их работы следует, что излучение частицами возможно в связи с изменением фазовой скорости распространения электромагнитных волн в веществе, а не только с ускорением заряда, как считалось раньше. Только через двадцать лет было экспериментально зафиксировано ПИ, из-за его малой интенсивности излучения, при пролете через границу раздела сред [8, 9]. Важным моментом является то, что несмотря на единую природу этих физических явлений, при рассмотрении задач о ИВЧ, ИСП, ДИ и ПИ используемые методы решения кардинально отличаются.

## 1.2 Излучение Вавилова-Черенкова

В 1934 году в лаборатории под руководством Вавилова С.И. проводились исследования работавшим там Черенковым П.А. При исследовании люминесценции жидкостей под воздействием электромагнитного излучения, было обнаружено свечение неизвестной природы, которое позднее было названо излучением Вавилова-Черенкова (ИВЧ) [10].

В дальнейшем было определено, что свечение вызывается электронами, образовавшимися от взаимодействия  $\gamma$ -лучей радия, движущимися со скоростями, превышающими фазовую скорость света в среде. Электроны выбиваются с оболочек атомов среды. При проведенных следующих экспериментов определили, что яркость мало зависит от химических свойств и природы, излучение поляризовано в направлении электрического вектора по направлению движения частиц. Важным моментом было то, отсутствовал как примесное, так и температурное тушение (ослабление свечение), в отличии от люминесценции [10].

Позже, в 1958 году за открытие была присуждена Нобелевская премия по физике Черенкову и за теоретическое объяснения явления Франку И.М. и Тамму И.Е. [11].

При пролете заряженной частицы движущийся в среде с коэффициентом преломления  $n$ , с постоянной скоростью  $v$ , излучает электромагнитные волны в непрерывном спектре и в узком конусе. Излучение возникает в том случае, если скорость частицы  $v$  больше фазовой скорости света  $v_{\phi} = c/n$ , т.е. в этой среде  $v > c/n$ . Угол  $\theta$  составляющий волновой вектор излучаемых волн  $k$  образуется со скоростью  $v$ , с направлением движения частиц, подчиняются уравнению:

$$\cos \theta = c/v * n$$

В 1957 году в работе [12] провели исследование, в котором ИВЧ генерируется без непосредственного взаимодействия электронов с материалом мишени. При пролете электронов вблизи мишени, поля частиц поляризуют мишень в области  $\approx \gamma\beta\lambda$ . При этих условиях ИВЧ генерируется без взаимодействия электронов с мишенью.

### 1.3 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова

ДИ, в релятивистском случае распространяется по направлению движения частиц и сосредоточено в малой области углов, в отличие от ИВЧ, которое, как известно, возникает под большими углами от направления движения частиц, позволяет с легкостью отделить эти типы излучения.

Исследование ИВЧ в оптическом диапазоне от электронов высоких энергий является предметом большого количества теоретических и прикладных работ. Отрицательной стороной такого метода измерения параметров пучка или мишени то, что при прохождении частицы через мишень она рассеивается, иногда этим можно пренебречь, но далеко не всегда. Модель генерации ДИВЧ и ДИ, при которой заряженная частица пролетает в непосредственной близости с мишенью, обладающей некоторой спектральной дисперсией и проводимостью, рассматривалась в статьях [13, 14]. Несомненное преимущество такого вида излучения — это отсутствие потерь на ионизацию в материале мишени. В случае электронных пучков с Лоренц-фактором более 10, область взаимодействия существенно увеличивается, ее характерный размер может принимать макроскопические значения  $\approx \gamma\lambda$ . Этот факт, по сравнению с пучками, у которых  $\gamma < 10$ , в том числе не релятивистскими, позволяет рассматривать излучение, генерируемое без непосредственного взаимодействия пучка с мишенью. До недавних пор, считало, что такой вид излучения, как дифракционное излучение Вавилова-Черенкова (ДИВЧ), в связи с своей слабой интенсивностью не было необходимости учитывать, не говоря уже о исследованиях на его основании.

В недавней работе [15] группой ученых, в том числе и из ТПУ, был проведен эксперимент, в котором, наблюдалось некогерентное ДИВЧ от позитронного пучка с энергией 5.3 ГэВ. Пучок в этом эксперименте проходит в непосредственной близости, на расстоянии около 0.8 мм, от излучателя. Форму диэлектрической мишени (излучателя) подобрали таким образом, чтобы черенковское излучение было направлено на детектор, состоящий из оптической системы оснащенной камерой с оптическим усилением, такая

оптическая система позволяет исследовать двумерные угловые распределения. Диагностика пучка данным методом позволяет проводить корректировку характеристик пучка в режиме онлайн [16].

Используя работу [17], в которой решена задача об излучении Вавилова-Черенкова, для сред с резкими границами, рассмотрим ИВЧ от диалектической призмы конечных размеров. Стоит упомянуть что аналогичная задача была рассмотрена Гинзбургом В.Л. и Франком И.М. в 1947 году [18]. Тогда было исследовано излучение, возникающее при равномерном движении заряженной частицы внутри цилиндрического канала с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_1$  заполненного веществом с  $\epsilon_2$ , в этой задаче важным моментом являются сравнительно небольшие потери на ИВЧ, в то время как основными являются ионизационные потери. Аналогичные задачи при использовании сложных геометрий требуют особых подходов, связанных с постановкой граничных условий для их решения. Автор применил метод поляризационных токов при рассмотрении задачи о ИВЧ, генерируемого при движении заряженной частицы с Лоренц-фактором  $\gamma$  в вакууме на расстоянии  $b$  под углом  $\psi$  к призматической мишени с углом раствора  $\varphi$  и противоположащей стороной  $a$  с заданной диэлектрической проницаемостью  $\epsilon$ . Таким образом, было получено спектрально-угловое распределение поляризационного излучения «вперед», которое включает в себя как ДИ, так и ИВЧ. Найденное выражение позволяет построить необходимые нам распределения.

## 2 Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова от диэлектрической призмы

### 2.1 Спектрально-угловое распределение плотности ДИ и ДИВЧ

Используемое выражение из статьи [17] получено в необычном для таких задач виде, обычно принято рассматривать излучение с привязкой к направлению движения заряда, в данном случае углы наблюдения откладываются от декартовой системы координат. В связи с этим произведем замену координат на связанную с направлением движения частицы,  $\theta' = \theta - \alpha$ , где  $\alpha$  – угол, под которым частица движется относительно оси  $z$ .

Аналогично в выражении (1) учитывается поворот мишени относительно пучка частиц, что с учетом сказанного выше дает следующее выражение для  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi - \psi$$

Представленное ниже выражение спектрально-угловой плотности поляризационного излучения, полученное в работе [17], включает как дифракционное излучение, так и излучение Вавилова-Черенкова:

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2\beta^2}{4\pi^2\lambda c} \frac{\cos^2(\theta' - \alpha)}{|P|^2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right|^2 \\ &* \left| 1 - \frac{P * \text{Exp} \left[ i \frac{\omega}{\beta c} \Sigma a \text{Cot}[\phi] \right] + \Sigma \text{Cot}[\phi] \text{Exp} \left[ -i \frac{\omega}{\beta c} aP \right]}{P + \Sigma \text{Cot}[\phi]} \right| \\ &* \left\{ \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon \cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)}} \right|^2 \left| \cos \alpha \left( \gamma^{-1} \sin(\theta' - \alpha) - iK \cos \varphi \right. \right. \right. \\ &* \left. \left. \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) + \sin \alpha \left( iK \sin(\theta' - \alpha) + \gamma^{-1} \cos \varphi \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) \right. \\ &\left. - \gamma\beta \sin(\theta' - \alpha) \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \sin^2 \varphi \right|^2 \\ &+ \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)}} \right|^2 \left( \gamma \sin \varphi \right)^2 \left( \sin^2(\theta' - \alpha) + \left| \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right| \right) \\ &* \left[ 1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + 2\beta\gamma^{-2} \sin \alpha \sin(\theta' - \alpha) \cos \varphi - \gamma^{-2} \sin^2 \alpha (K^2 - \gamma^{-2}) \right] \\ &* \frac{\text{Exp} \left[ -2 \frac{\omega}{\gamma\beta c} (h + a \text{Cot} \phi) K \cos \alpha \right]}{K^2 (1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + \beta^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin^2(\theta' - \alpha) \sin^2 \varphi] + 2\beta \sin \alpha \cos \varphi \sin(\theta' - \alpha))} \end{aligned} \quad (1)$$

$$P = \text{Cos}(\alpha) - \beta\sqrt{\varepsilon - \text{Sin}^2(\theta' - \alpha)} + i\gamma^{-1}K \text{Sin}(\alpha)$$

$$\Sigma = \text{Sin}(\alpha) + \beta \text{Cos}(\varphi)\text{Sin}(\theta' - \alpha) - i\gamma^{-1}K \text{Cos}(\alpha)$$

$$K = \sqrt{1 + (\gamma\beta \text{Sin}(\theta' - \alpha)\text{Sin}(\varphi))^2}$$

$$h = \frac{b}{\text{Cos}(\alpha)}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi - \psi,$$

где  $\beta = v/c$  – отношение скорости заряженной частицы к скорости света,  $\theta'$  – полярный угол в новой системе координат, представленной на рисунке 1, повернутой относительно  $\theta$  на угол  $\alpha$ ,  $\omega = 2\pi c/\lambda$  – угловая частота излучения,  $\gamma$  – лоренц-фактор заряженной частицы.

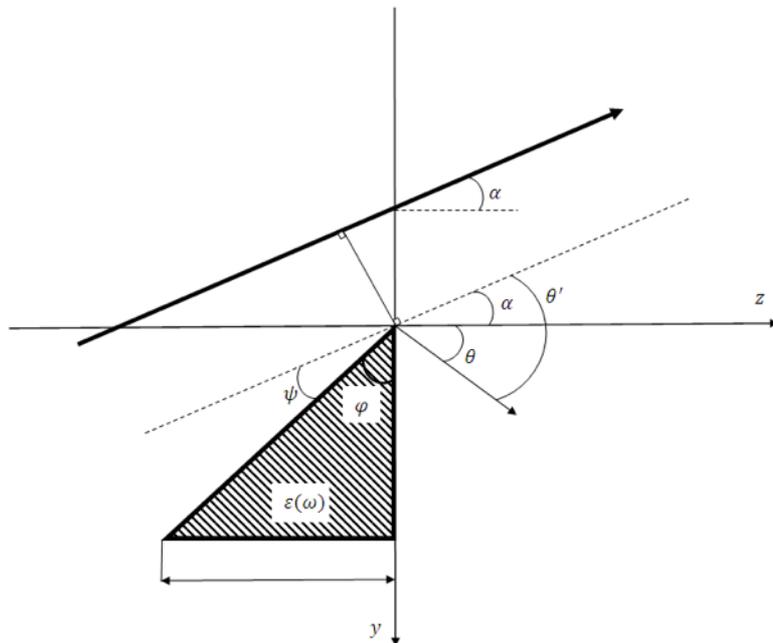


Рисунок 1 – Схема, иллюстрирующая используемые в формуле (1) обозначения и движение заряженной частицы относительно диэлектрической призмы

Прежде чем использовать формулу (1) необходимо рассмотреть формулу на границы применимости, особенно это актуально для данной формулы в присутствии сильной экспоненциальной зависимости.

При всех вычислениях и моделированиях использовался пакет Wolfram Mathematica, для консолидации данных и подготовки отчета использовался Microsoft Office.

## 2.2 Проверка границ применимости

В процессе получения спектрально-углового распределения были сделаны некоторые приближения, которые накладывают определенные ограничения на возможные значения задаваемых, во-первых, выражение получено для углов пролета  $\alpha < \alpha_{cr}$ , где  $\alpha_{cr}$  – это критический угол, увеличение которого приведет к тому, что заряженная частица будет пересекать мишень, вызывая при этом дополнительное ДИ и ИВЧ, возникновение которого не учитывается данной формулой.

$$\alpha_{cr} = \text{Arcsin}\left(\frac{b}{a/\sin(\phi)}\right) + \pi/2 - \phi$$

Во-вторых, ограничения на геометрию мишени, необходимо чтобы сохранялась ее треугольная форма и следовательно угол  $\phi$  находился в пределах от 0 до  $\pi/2$ .

В-третьих, данная задача была решена с применением коэффициентов Френеля в случае бесконечной плоской границы раздела, это приближение справедливо только в случае, когда отношение  $a/\text{tg}(\phi)$  значительно превышает длину волны излучения  $\lambda$ .

Рассмотрим поведение углового распределения ИВЧ от угла призмы  $\phi$ , по значению интенсивности в пике распределения ИВЧ, для это рассмотрим различные углы призмы и сравним значение интенсивности в единицах  $e^2/\pi c^2$ , для простоты, результат представлен на рисунке 2.

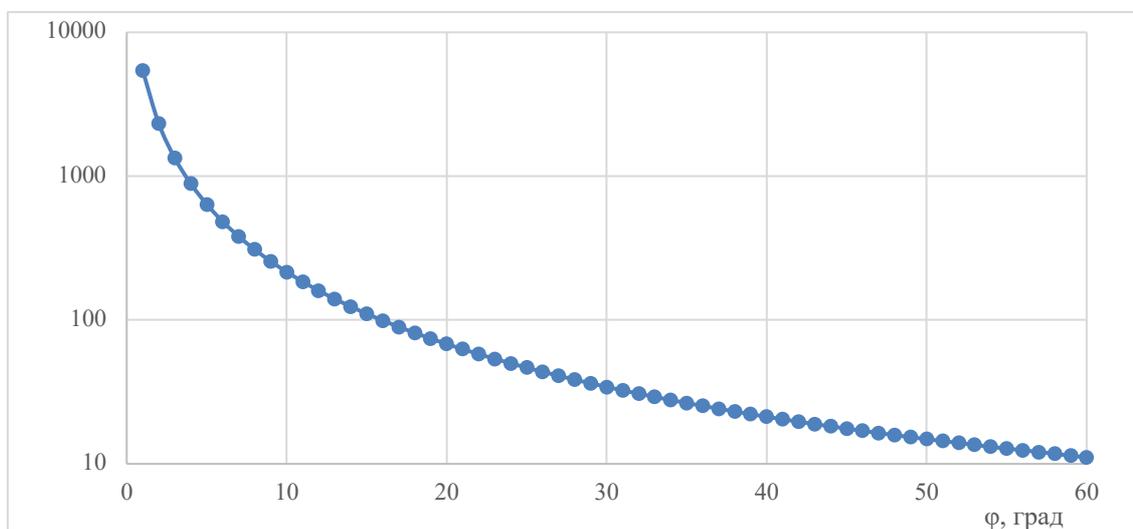


Рисунок 2 – Зависимость интенсивности ИВЧ в пике от угла призмы

Как можно видеть с уменьшением угла интенсивность сильно возрастает особенно это заметно при  $\varphi < 20^\circ$ , чтобы сильно не увеличивать размеры призмы для дальнейшей проверки границ применимости будем использовать  $\varphi = 5^\circ$ .

Далее рассмотрим каким образом будет вести себя пакет Wolfram Mathematica при моделировании для разных значений длины волны излучения  $\lambda$  и прицельного параметра  $b$  (рис.3-8) при стороне призмы  $\alpha = 45$  мм и Лоренц-факторе  $\gamma = 12$ .

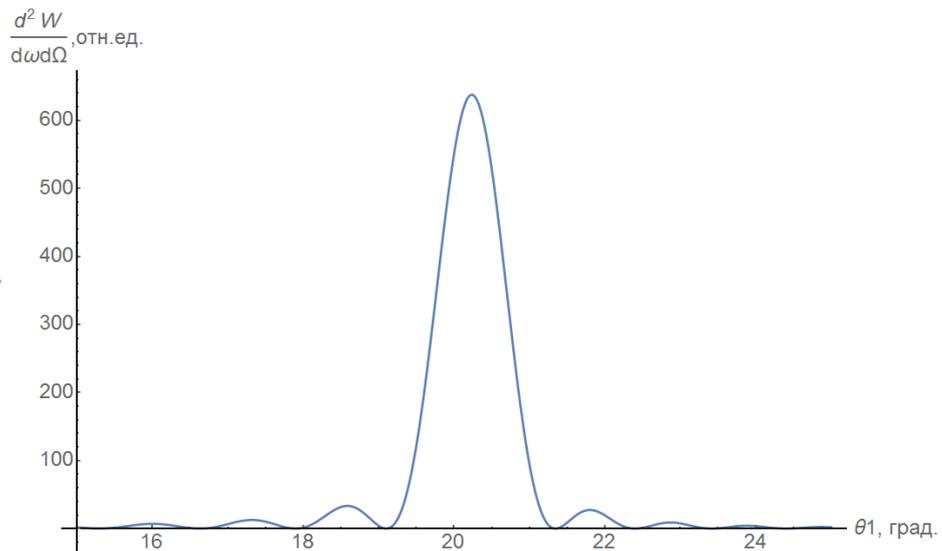


Рисунок 3 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 4$  мм,  $b = 15$  мм

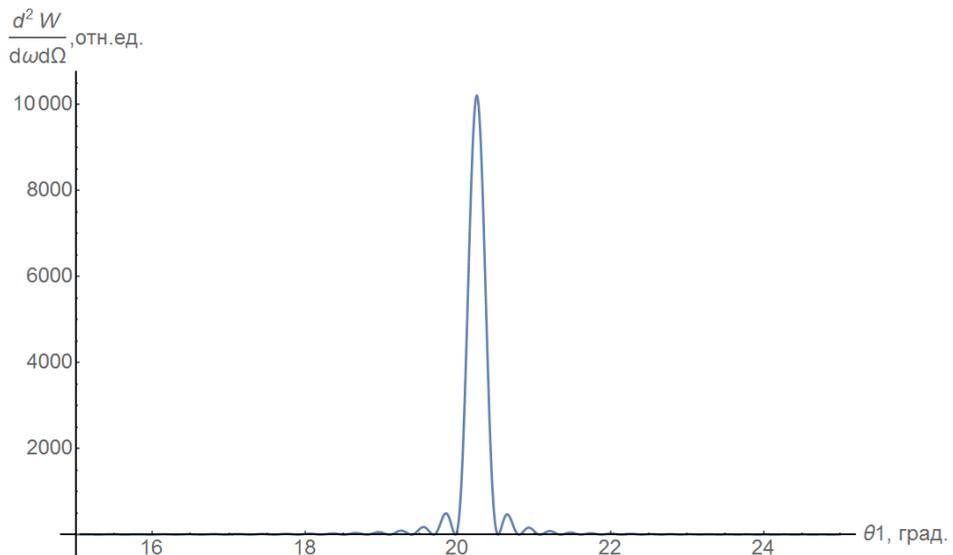


Рисунок 4 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 1$  мм,  $b = 3.75$  мм

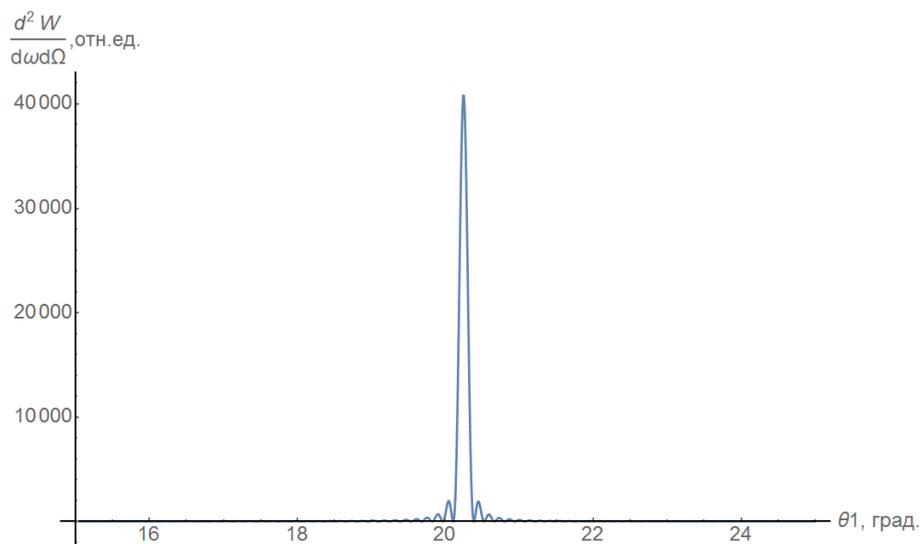


Рисунок 5 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 0.5$  мм,  $b = 1.875$  мм

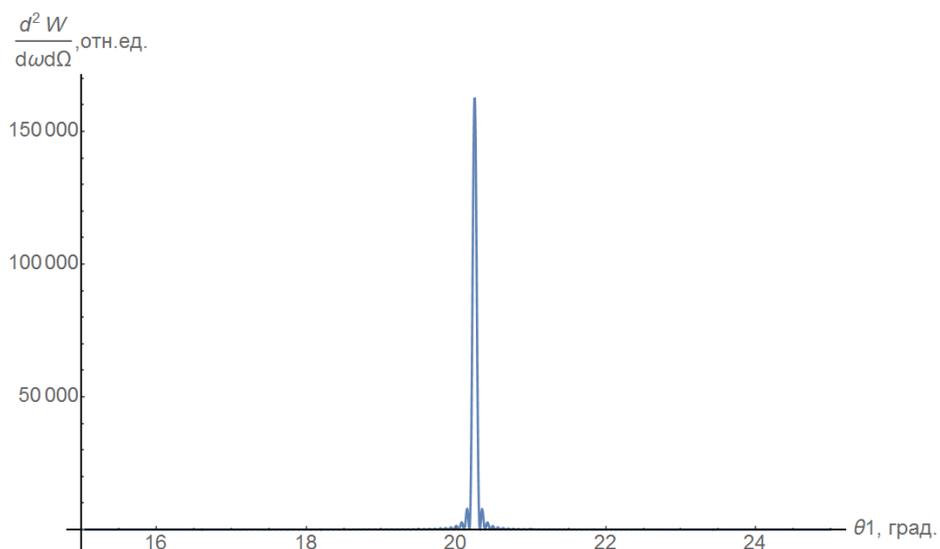


Рисунок 6 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 0.25$  мм,  $b = 0.9375$  мм

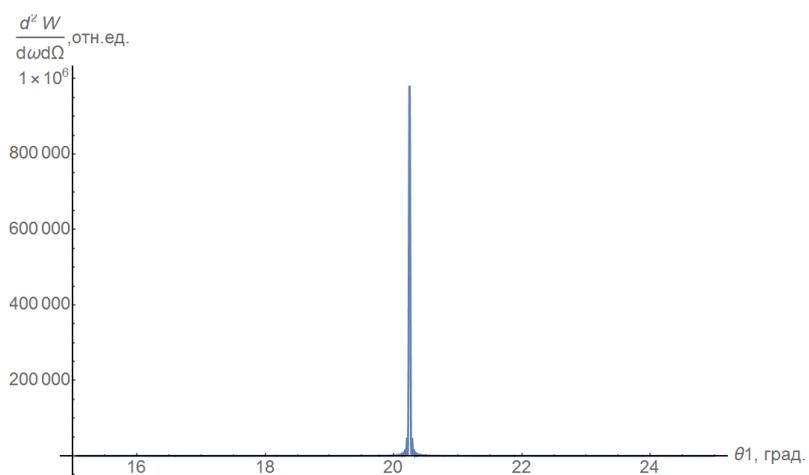


Рисунок 7 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 0.10$  мм,  $b = 0.375$  мм

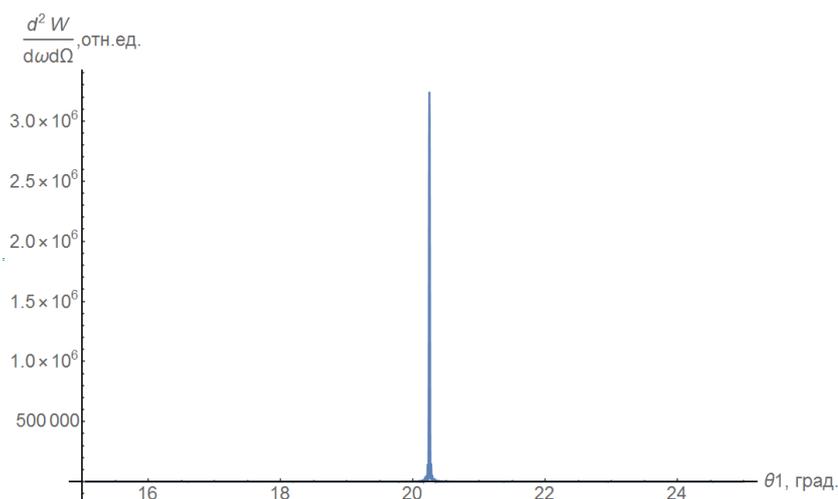


Рисунок 8 – Интенсивность ИВЧ при  $\lambda = 0.0637$  мм,  $b = 0.239$  мм

На рисунке 8 изображены минимальные значения  $\lambda$  и  $b$  возможные для расчета при  $\alpha = 45$  мм, при дальнейшем уменьшении происходит ошибка вычисления в пакете Wolfram Mathematica, следовательно, при данных значениях:

$$\frac{\alpha}{\lambda_{min}} \approx 706.4$$

При дальнейших моделированиях с разными значениями было замечено что причина такого «поведения» при моделировании является ограничение наложенные на используемое средство вычисления – пакет Wolfram Mathematica.

В данном случае причиной стало ограничение на величину промежуточных вычислений, а именно аргумент экспоненты (2) принимает значения более -720, что соответствует  $\sim 10^{-313}$ , такое маленькое значение исчезает при дальнейшем умножении с другими элементами формулы (1), что приводит к получению адекватных значений.

$$\text{Exp} \left[ -2 \frac{\omega}{\gamma \beta c} (h + a \text{Cot } \phi) K \cos \alpha \right] \quad (2)$$

Используя в дальнейшем вычисленное значение можно оценить размеры призмы, прицельного параметра для используемых значений Лоренц-фактора, длины волны и т.п.

### 2.3 Сравнение моделей распределений плотности ИВЧ

Следующим шагом будет проведено сравнение спектрально-угловых распределений, спектров, полученных с помощью формулы (1) с работами других авторов для различных параметров эксперимента.

На рисунке 9 представлен спектр излучения Вавилова-Черенкова, полученный в работе [19], для различных прицельных параметров, на рисунке 10 показана схема эксперимента. Ниже приведены параметры моделирования [19], используемые для сравнения:

$$\gamma = 10960$$

$$a = 12 \text{ мм}$$

$$\lambda = 600 \text{ нм}$$

$$\varphi = 30 \text{ град}$$

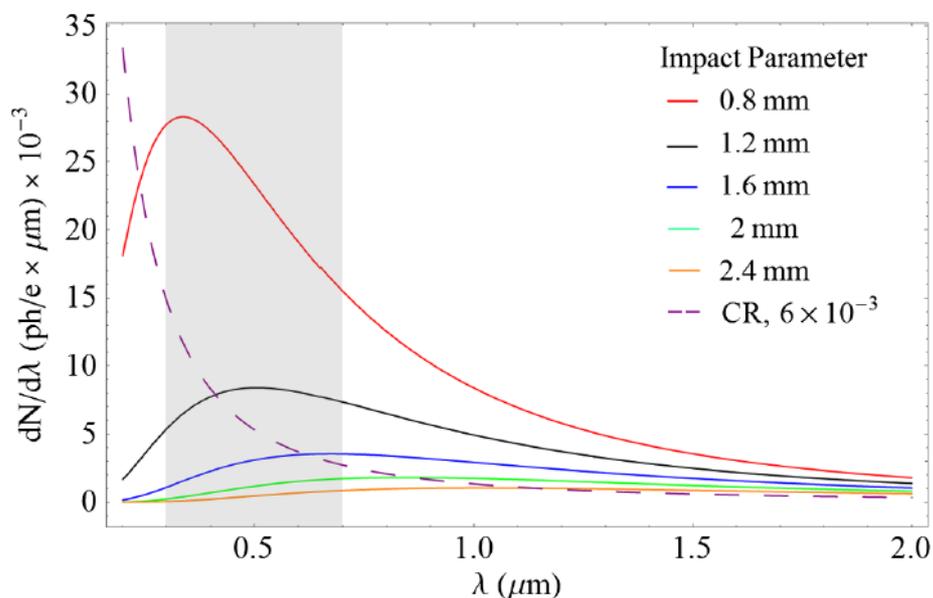


Рисунок 9 – Спектр фотонов дифракции излучения Вавилова-Черенкова позитронов с энергией 5.3 ГэВ с прицельным параметром 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 и 2.4 мм из статьи [19]

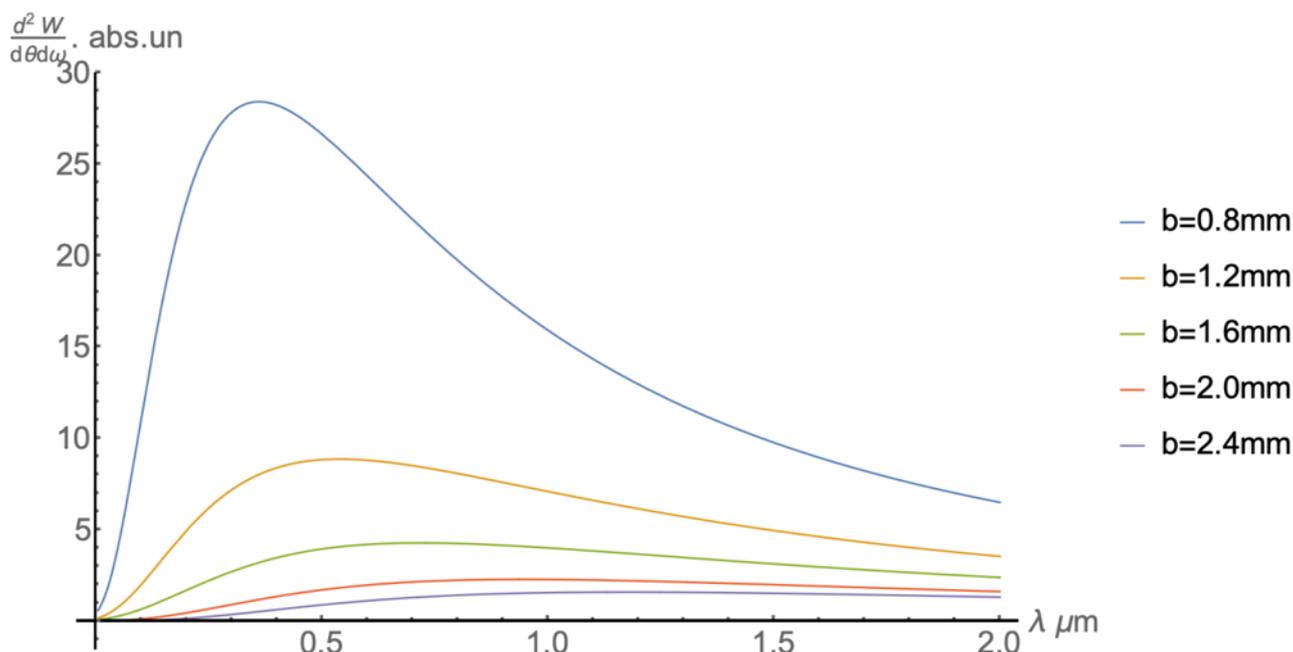


Рисунок 10 – Моделирование спектра ИВЧ по формуле (1) с параметрами эксперимента [19]

Интенсивность на рисунке 10 для  $b = 0.8$  мм нормирована на  $s$  кривой на рисунке 9, для того же значения прицельного параметра. Как можно видеть для используемых параметров эксперимента максимум интенсивности для  $b = 0.8$  мм на рис. 9 и 10 соответствует  $\sim 450$  нм и смещается в большую сторону при увеличении прицельного параметра, хотя и есть различия в «скорости» уменьшения пика, характерная зависимость видна.

В таблице 1 приведены сравнения результатов моделирования с результатами из статьи, которые были взяты с рисунка. Расположение пиков при  $b = 2.0, 2.4$  мм, не бралось, так как при данной обрисовке не удалось с достаточной точностью определить их по изображению.

Таблица 1 – Сравнение результатов статьи [19] и результатов моделирования.

b, мм	Результаты из работы [19]		Результаты, по формуле (1)	
	Интенсивность в пике, абс. ед.	Расположение пика, мкм	Интенсивность в пике	Расположение пика
0.8	28.5	0.35	28.5	0.36
1.2	8.5	0.5	8.9	0.52
1.6	3.5	0.65	4.1	0.68

Для наглядности проведено моделирование пиков ИВЧ (рис. 11) и ДИ (рис. 12) для заданных ранее параметров эксперимента.

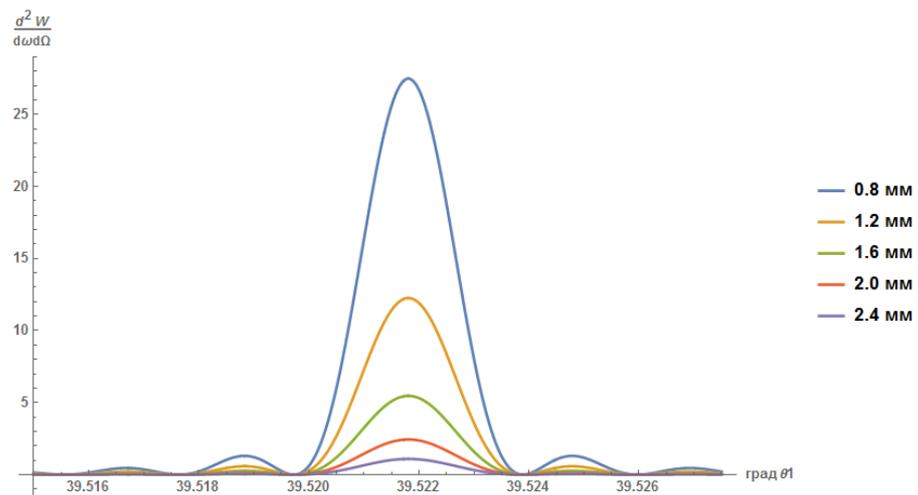


Рисунок 11 – Распределение интенсивности ИВЧ для импакт-параметра 0.8-2.4мм

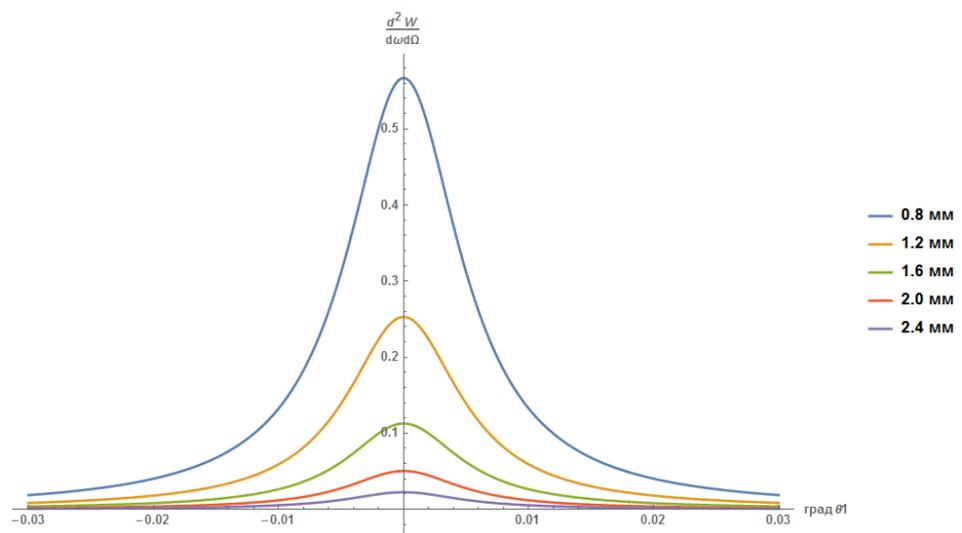


Рисунок 12 – Распределение интенсивности ДИ для импакт-параметра 0.8-2.4мм

## 2.4 Сравнения распределений ДИВЧ с результатами полученными на микротроне ТПУ

Проведем моделирование для сравнения с результатами полученными на микротроне ТПУ [20] для эксперимента со следующими параметрами (в обозначениях рисунка 1):

$$\gamma = 12$$

$$\varphi = 45^\circ$$

$$\lambda = 5 \div 50 \text{ мм}$$

$$b = 15 \text{ мм}$$

$$a = 175 \text{ мм}$$

$$\psi = 0^\circ, 6^\circ, 9^\circ, 15^\circ, 21^\circ$$

На рисунке 13 представлена схема проведения эксперимента в работе [20], стоит заметить, что геометрии эксперимента и геометрия моделирования отличается, при моделировании согласно рисунку 1 пучок электронов пролетает со направленно с гипотенузой призмы, в свою очередь в данном эксперименте пучок со направлен с катетом призмы. В используемой модели не представляется возможным использовать такой угол  $\psi$ , который бы позволил «повернуть» пучок таким образом, чтобы получить аналогичную геометрию. В работе [21] исследовали модель, где рассматривалось ДИ и ИВЧ, возникающее от удвоенной призмы (рис. 14), данная модель аналогична рассматриваемой на рис. 13. При сравнений интенсивностей ДИ и ИВЧ от призмы и ее удвоенного аналога было замечено, что пики ИВЧ полностью совпадают, в свою очередь интенсивность ДИ отличается.

По изначальным данным нас интересует только пики ИВЧ. Был сделан вывод, что в процессе генерации ИВЧ участвует только грань мишени, обращенная к траектории заряженной частицы и ее положение относительно направления пучка, в то время как за генерацию ДИ отвечают две остальные грани призмы.

Из чего можно сделать вывод что для представленного ранее случая моделирования можно использовать параметры, при которых гипотенуза (рис.1) будет равна большей стороне призмы.

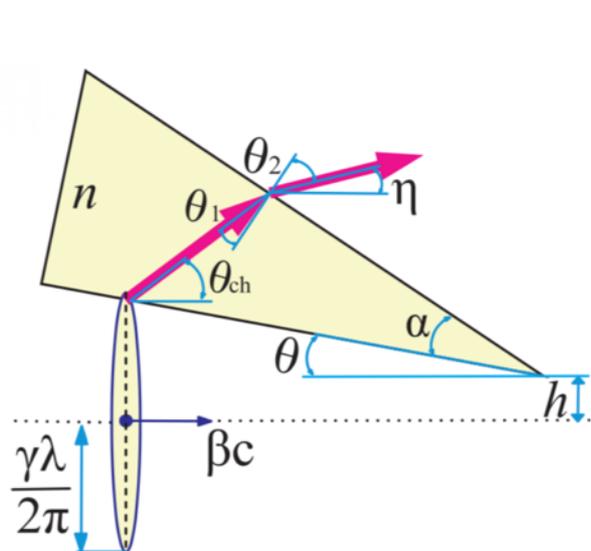


Рисунок 13 – Схема эксперимента [20]

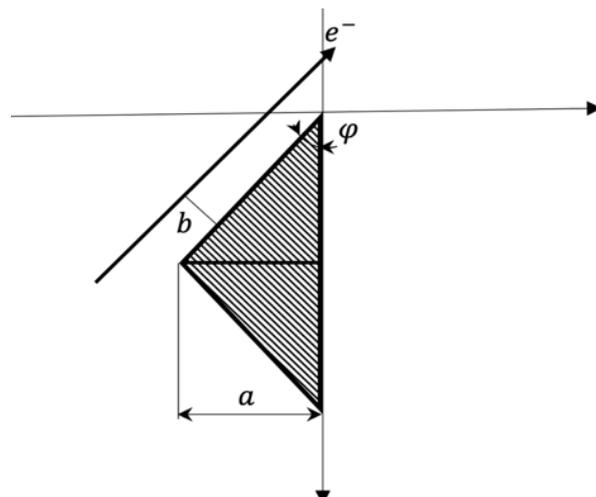


Рисунок 14 – Схема эксперимента с удвоенной призмой

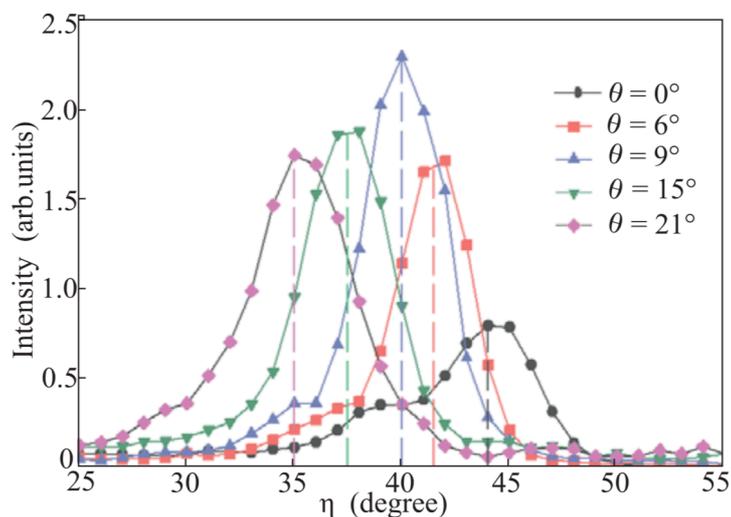


Рисунок 15 – Угловые распределения от тefлоновой призмы при различных углах  $\theta$  ее поворота из работы [20]

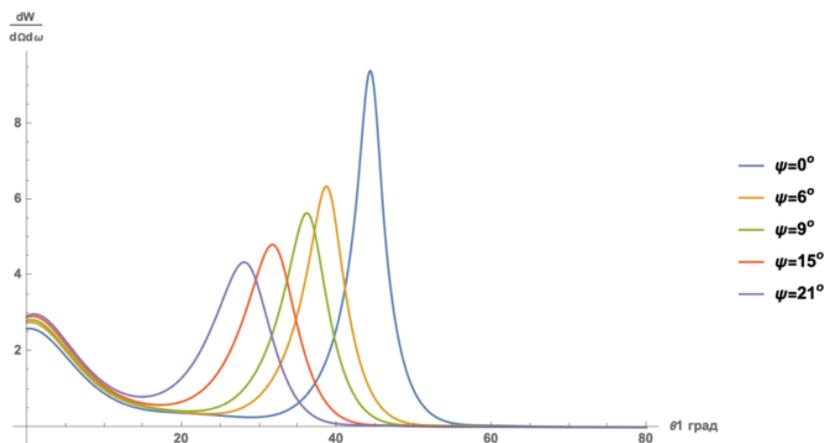


Рисунок 16 – Результаты моделирования угловых распределения от тefлоновой призмы при различных углах  $\theta$  ее поворота для параметров из работы [20]

Таблица 2 – Сравнение экспериментальных углов максимумов пика ИВЧ и теорией для тефлоновой мишени из работы [20].

$\theta$	Экспериментальные данные [20]	Теоретические данные [20]	Теоретические данные по формуле (1)
$0^\circ$	$44.3^\circ$	$44.7^\circ$	$44.4^\circ$
$6^\circ$	$41.5^\circ$	$39.2^\circ$	$39.1^\circ$
$9^\circ$	$40.0^\circ$	$36.8^\circ$	$36.5^\circ$
$15^\circ$	$37.5^\circ$	$32.5^\circ$	$31.9^\circ$
$21^\circ$	$35.0^\circ$	$29.0^\circ$	$28.6^\circ$

Сравнивая получившиеся угловые распределения (рис. 16), можно заметить, что интенсивности для различных углов поворота мишени отличаются от экспериментальных данных (рис. 16), стоит заметить, что и значение максимумов пика ИВЧ так же отличается от экспериментальных, что вероятно связано с увеличением числа псевдо-фотонов поля электрона. Отличие распределений объясняется в представлении поля электронов псевдо-фотонами, при пролете пучка частиц параллельно работает так называемый эффект затемнения, который подавляет интенсивность в пике ИВЧ. При повороте мишени происходит поворот грани, вдоль которой был направлен пучок, при этом увеличивается число псевдо-фотонов поля электронов, падающих на эту грань и преломляющихся почти под углом равным черенковскому, с точность до  $1/\gamma$ , увеличивая интенсивность излучения в пике и как следствие изменяя его положение. При больших углах поворота мишени передний край уходит от пучка за область  $\gamma\lambda$  и интенсивность в пиках падает. Аналогичная ситуация наблюдается если закрыть поглотителем грань, перпендикулярную к пучку, из чего следует что данное расхождение возникает не из-за переотражения ДИ от этой грани.

В работе [20] связывают расхождение теоретических данных с экспериментальными с вкладом дифракционного излучения, возникающего при взаимодействии кулоновского поля электронов с основанием призмы и дальнейшем его переотражением и интерференцией с полем ИВЧ в материале радиатора. Согласно данным работы (таблица 2) положение максимумов пиков ИВЧ, полученных по формуле (1) совпадает с теоретическими, полученными в работе [20].

## 2.5 Компоненты поля спектрально-углового распределения ИВЧ и ДИ

Перед продолжением моделирования необходимо получить составляющие спектрально-углового распределения интенсивности ИВЧ и ДИ, для этого воспользуемся методикой, представленной в работе [17]. Используя выражение для спектрально-углового распределения поляризованного излучения (3), разложим напряженность магнитного поля на компоненты относительно плоскости падения (4). Подставим в (4) выражение для поля излучения в среде (5), используя соотношение для перпендикулярной и параллельной плоскости падения волны на границу раздела магнитного поля.

$$\frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = \frac{cr^2}{|\varepsilon|^2} \left( |H_{\parallel}^{pol(m)}|^2 + |H_{\perp}^{pol(m)}|^2 \right) = \frac{cr^2}{|\varepsilon|^2} \left( |\sqrt{\varepsilon} f_E|^2 |H_{\parallel}^{pol}|^2 + |f_H|^2 |H_{\perp}^{pol}|^2 \right) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} |H_{\perp}^{pol(m)}|^2 &= |f_H|^2 |H_{\perp}^{pol}|^2 \\ |H_{\parallel}^{pol(m)}|^2 &= |\sqrt{\varepsilon} f_E|^2 |H_{\parallel}^{pol}|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} H^{pol}(r, \omega) &= \frac{e\beta\sqrt{\varepsilon}(\varepsilon - 1)\mathbf{F}}{4\pi c\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}} \frac{\text{Exp}[i\omega\sqrt{\varepsilon}r/c]}{r} \\ & * \left( \frac{1 - \text{Exp}\left[-ia\frac{\omega}{v}(\text{Cos}[\alpha] - \beta e_z\sqrt{\varepsilon} + i\gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2})\right]}{\text{Cos}[\alpha] - \beta e_z\sqrt{\varepsilon} + i\gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}} \right) \\ & + \frac{\text{Exp}\left[-ia\frac{\omega}{v}(\text{Cos}[\alpha] - \beta e_z\sqrt{\varepsilon} + i\gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2})\right] - \text{Exp}\left[ia\frac{\omega}{v}\text{Cot}[\varphi](\text{Sin}[\alpha] + \beta e_z\sqrt{\varepsilon} - i\gamma^{-1}\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2})\right]}{\text{Cot}[\varphi](\text{Sin}[\alpha] + \beta e_z\sqrt{\varepsilon} - i\gamma^{-1}\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}) + \text{Cos}[\alpha] - \beta e_z\sqrt{\varepsilon} + i\gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}} \\ & \frac{\text{Exp}\left[-\frac{\omega}{\gamma v}(h + a\text{Cot}[\varphi])\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}\right]}{\gamma^{-1}\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2} + i\text{Sin}[\alpha] + i\beta e_y\sqrt{\varepsilon}} * \text{Exp}\left[-ih\frac{\omega}{v}\text{Sin}[\alpha]\right] * \text{Exp}\left[-i\frac{\omega}{v}a\text{Cot}[\varphi](\text{Sin}[\alpha] + \beta e_y\sqrt{\varepsilon})\right], \end{aligned} \quad (5)$$

где используется обозначение

$$\mathbf{F} = \left\{ \begin{aligned} & (\gamma^{-1}\text{Cos}[\alpha] + i\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}) e_y + (\gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha] - i\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}) e_z, \\ & (\gamma\beta e_z\sqrt{\varepsilon} - \gamma^{-1}\text{Cos}[\alpha] - i\text{Sin}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2}) e_x, (i\text{Cos}[\alpha]\sqrt{1 + \varepsilon(1 + \gamma\beta e_x)^2} - \gamma^{-1}\text{Sin}[\alpha] - \gamma\beta e_y\sqrt{\varepsilon}) e_x \end{aligned} \right\}$$

$$\mathbf{e} = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon}} \left\{ \text{Sin}[\theta]\text{Sin}[\phi], \text{Sin}[\theta]\text{Cos}[\phi], \sqrt{\varepsilon - \text{Sin}[\theta]^2} \right\}.$$

$$f_H = \frac{2\varepsilon \text{Cos}[\theta]}{\varepsilon \text{Cos}[\theta] + \sqrt{\varepsilon - \text{Sin}[\theta]^2}}$$

$$f_E = \frac{2 \text{Cos}[\theta]}{\text{Cos}[\theta] + \sqrt{\varepsilon - \text{Sin}[\theta]^2}}$$

$$H_{\perp}^{pol} = H_x^{pol} \text{Cos}[\phi] - H_y^{pol} \text{Sin}[\phi]$$

$$H_{\parallel}^{pol} = \sqrt{(H_z^{pol})^2 + (H_x^{pol} \sin[\phi] + H_y^{pol} \cos[\phi])^2}$$

где  $H^{pol}(r, \omega)$  – выражение для поля излучения в среде,  $H_{\perp}^{pol}$ ,  $H_{\parallel}^{pol}$  – перпендикулярная и параллельная составляющие плоскости падения волны на границу раздела магнитного поля,  $H_{\perp}^{pol(m)}$ ,  $H_{\parallel}^{pol(m)}$  – компоненты напряженности магнитного поля в среде относительно плоскости падения волны,  $f_H, f_E$  – коэффициенты Френеля для одной бесконечной границы раздела.

Получим спектрально-угловое распределение компонент магнитного поля и сравним его с помощью известным уравнения спектрально-углового распределения (7).

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} = & \frac{e^2 \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha)}{4\pi^2 c} \frac{|\varepsilon - 1|^2}{|P|^2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right|^2 \left| 1 - \frac{P * \text{Exp} \left[ i \frac{\omega}{\beta c} \Sigma a \text{Cot}[\phi] \right] + \Sigma \text{Cot}[\phi] \text{Exp} \left[ -i \frac{\omega}{\beta c} a P \right]}{P + \Sigma \text{Cot}[\phi]} \right|^2 \\ & * \left\{ \left| \frac{\varepsilon}{\varepsilon \cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)}} \right|^2 \left| \cos \alpha \left( \gamma^{-1} \sin(\theta' - \alpha) - iK \cos \varphi * \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) \right. \right. \\ & + \left. \sin \alpha \left( iK \sin(\theta' - \alpha) + \gamma^{-1} \cos \varphi \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) - \gamma \beta \sin(\theta' - \alpha) \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \sin^2 \varphi \right|^2 \\ & + \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)}} \right|^2 \left( \gamma \sin \varphi \right)^2 \left( \sin^2(\theta' - \alpha) + \left| \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right| \right) \\ & * [1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + 2\beta \gamma^{-2} \sin \alpha \sin(\theta' - \alpha) \cos \varphi - \gamma^{-2} \sin^2 \alpha (K^2 - \gamma^{-2})] \} \\ & \frac{\text{Exp} \left[ -2 \frac{\omega}{\gamma \beta c} (h + a \text{Cot} \phi) K \cos \alpha \right]}{K^2 (1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + \beta^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin^2(\theta' - \alpha) \sin^2 \varphi] + 2\beta \sin \alpha \cos \varphi \sin(\theta' - \alpha))} \end{aligned} \quad (6)$$

Для сравнения используем параметры моделирования из статьи [20], и построим параллельную и перпендикулярную компоненты магнитного поля отдельно (рис.17), сравним сумму компонент с моделированием спектрально-угловым распределением интенсивности (рис. 18).

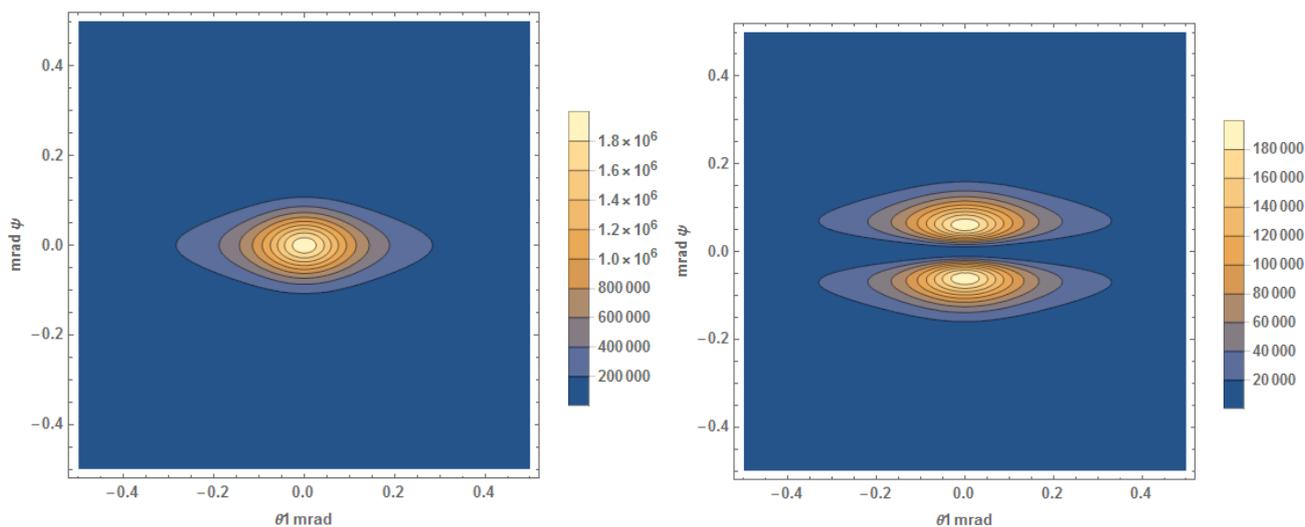


Рисунок 17 – Составляющие магнитного поля, параллельная (слева) и перпендикулярная (справа) параллельная плоскость падения волны на границу раздела, для  $\gamma = 10^4$ ,  $\lambda = 600$  нм,  $b = 0.8$  мм,  $a = 11.5$  мм,  $\varphi = 30$  град

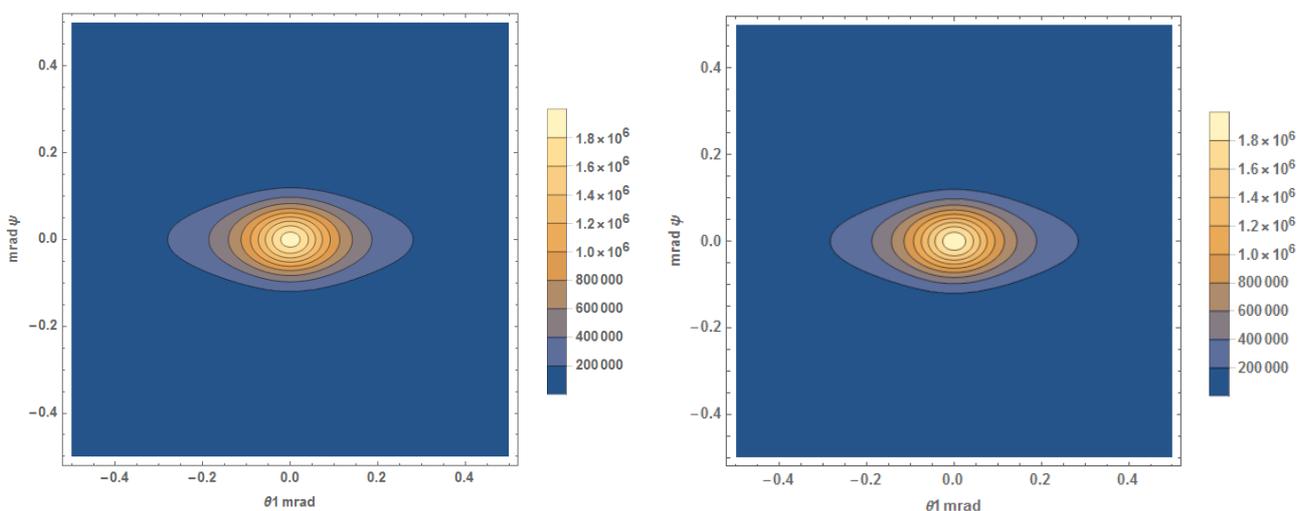


Рисунок 18 – Составляющие магнитного поля, параллельная + перпендикулярная (слева), спектрально-угловое распределение (б) (справа), для  $\gamma = 10^4$ ,  $\lambda = 600$  нм,  $b = 0.8$  мм,  $a = 11.5$  мм,  $\varphi = 30$  град

После анализа распределений на рисунке 18 становится ясно что компоненты поля получены верно и результаты моделирования идентичны с спектрально-угловым распределением (б).

## 2.6 Моделирование распределений для микротрона ТПУ

Используя полученные компоненты поля, построим контурные графики для перпендикулярной, параллельной составляющей поля и полной спектрально-угловой интенсивности излучения (рис.19-21).

На рисунке 22 построена одномерная зависимость спектрально-угловой интенсивности излучения при  $\varphi = 0$ , в этом случае параллельная составляющая поля равна нулю, соответственно полная интенсивность полностью зависит от перпендикулярной компоненты.

Результаты моделирования одномерных распределений перпендикулярной, параллельной и полной интенсивностей, при интегрировании по  $\varphi$  от  $-\pi$  до  $\pi$ , представлены на рисунках 23-25.

$$\varepsilon = 2.1$$

$$\gamma = 12$$

$$\psi = 45^\circ$$

$$b = 15 \text{ мм}$$

$$a = 175 \text{ мм}$$

$$\lambda_1 = 29.5 \text{ мм}$$

$$\lambda_2 = 22.8 \text{ мм}$$

$$\lambda_3 = 19 \text{ мм}$$

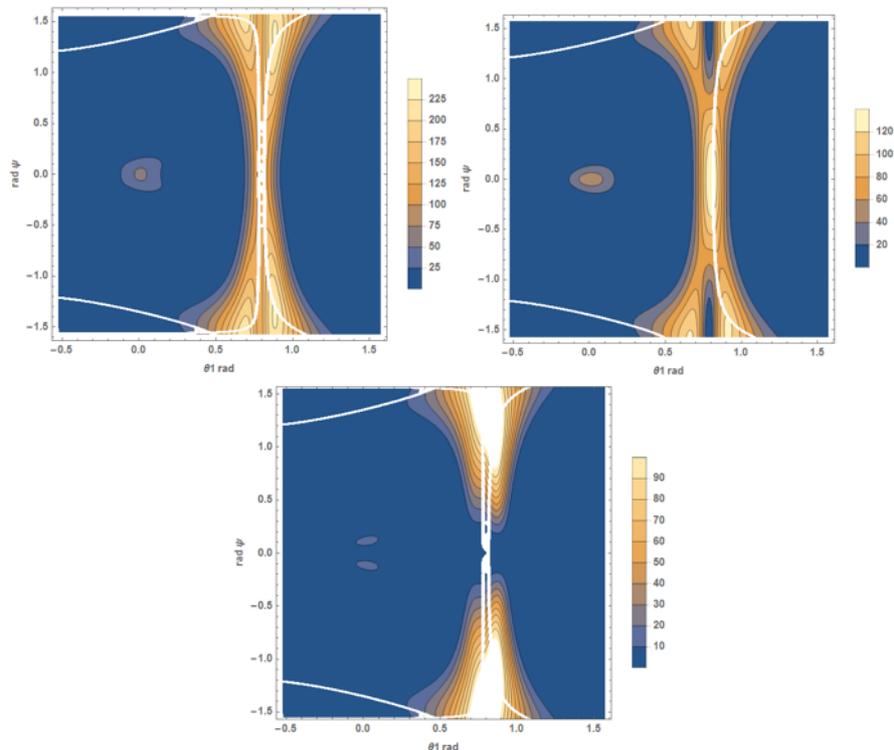


Рисунок 19 – Контурные графики ИВЧ и ДИ при  $\lambda = 29.5$  мм, для перпендикулярной (левый верхний), параллельной (правый верхний) компонент поля и полного спектрально-углового распределения (нижний)

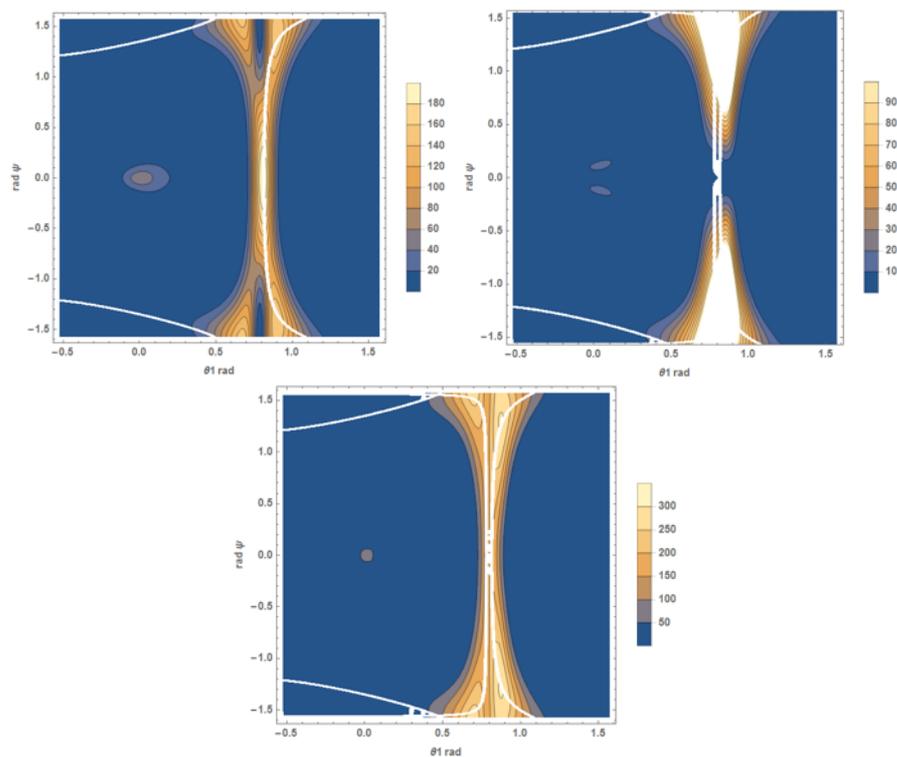


Рисунок 20 – Контурные графики ИВЧ и ДИ при  $\lambda = 22.8$  мм, для перпендикулярной (левый верхний), параллельной (правый верхний) компонент поля и полного спектрально-углового распределения (нижний)

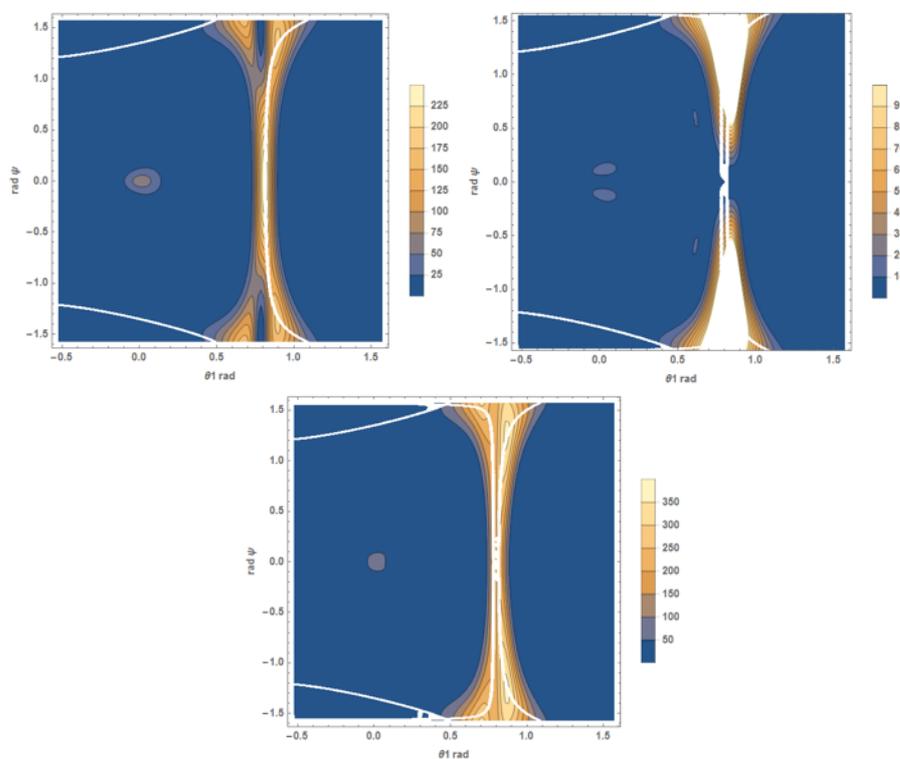


Рисунок 21 – Контурные графики ИВЧ и ДИ при  $\lambda = 19$  мм, для перпендикулярной (левый верхний), параллельной (правый верхний) компонент поля и полного спектрально-углового распределения (нижний)

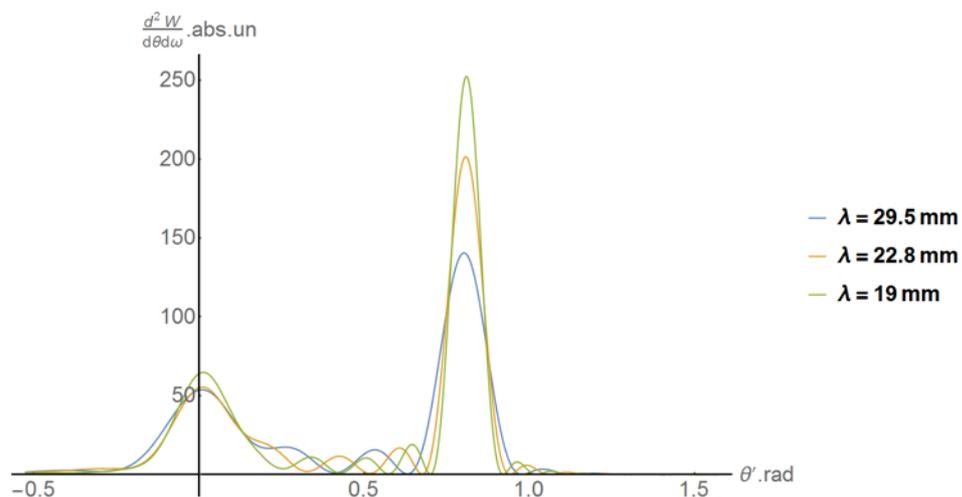


Рисунок 22 – Угловое распределения ИВЧ и ДИ при  $\varphi = 0$ , для  $\lambda = 29.5, 22.8, 19$  мм

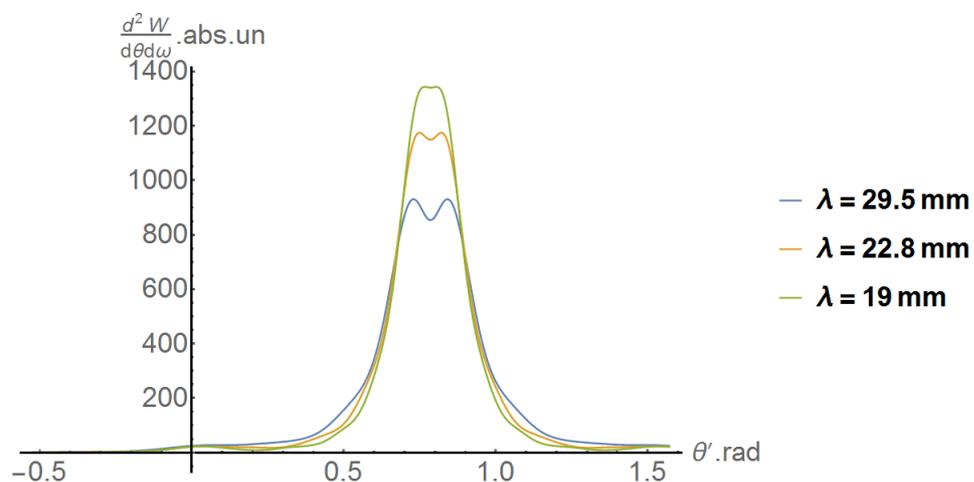


Рисунок 23 – Угловое распределения полной интенсивности ИВЧ и ДИ при интегрировании по  $\varphi$  от  $-\pi$  до  $\pi$ , для  $\lambda = 29.5, 22.8, 19$  мм

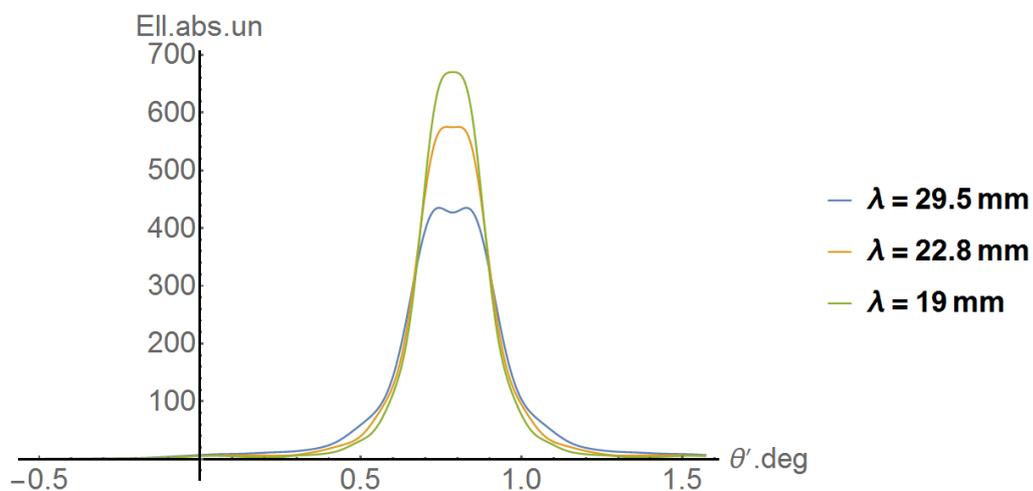


Рисунок 24 – Угловое распределения параллельной компоненты ИВЧ и ДИ при интегрировании по  $\varphi$  от  $-\pi$  до  $\pi$ , для  $\lambda = 29.5, 22.8, 19$  мм

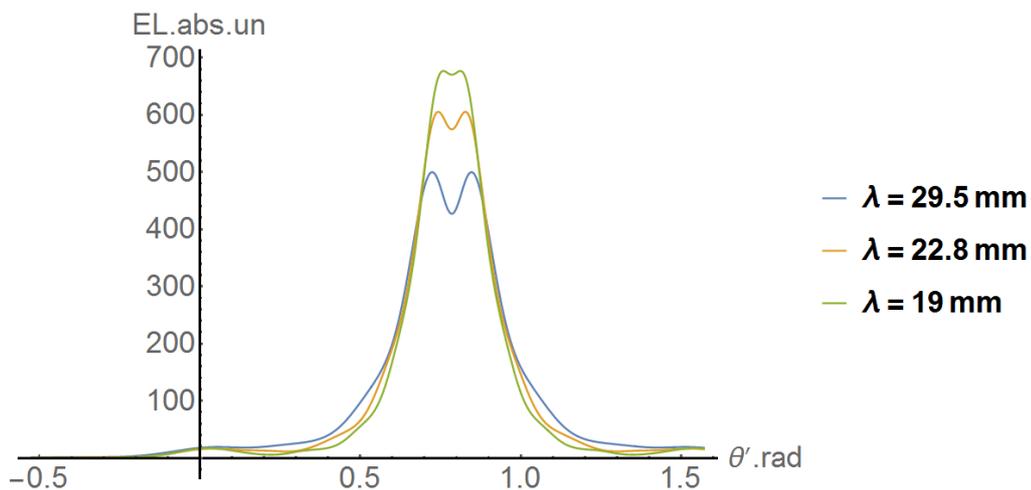


Рисунок 25 – Угловое распределения перпендикулярной компоненты ИВЧ и ДИ при интегрировании по  $\varphi$  от  $-\pi$  до  $\pi$ , для  $\lambda = 29.5, 22.8, 19$  мм

Как можно заметить, из получившихся распределений, при изменении длины волны излучения заметно изменение не только интенсивности излучения, но и формы пика ИВЧ, если говорить о полной интенсивности, что теоретически можно использовать для проверки попадающего излучения на детектор через фильтр, хотя в данном случае необходима экспериментальная проверка этого факта. К примеру, в работе [20] использовался широкополосный детектор для длин волн 5-50 мм, из-за чего могло не произойти такого изменения формы пика, хотя возможно и другое объяснение, связанное с образованием псевдофотонов, которое обсуждалось ранее. Несмотря на это, данное свойство может быть косвенно проверено в эксперименте при использовании другого типа фильтра.

## 2.7 Моделирование для эксперимента на ускорителе КЕК

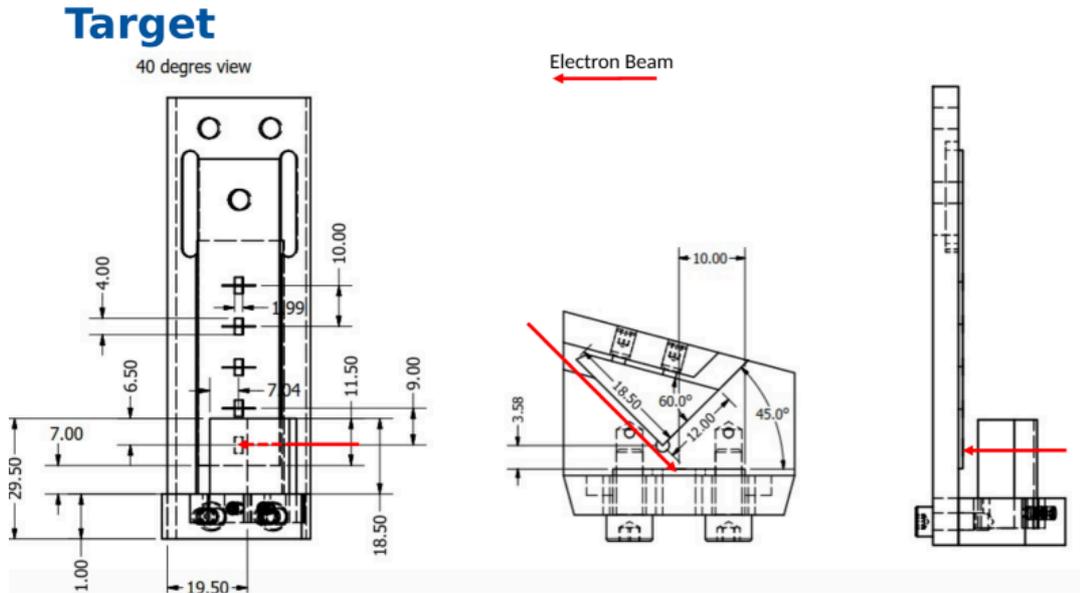


Рисунок 26 – Геометрия эксперимента на ускорителе КЕК

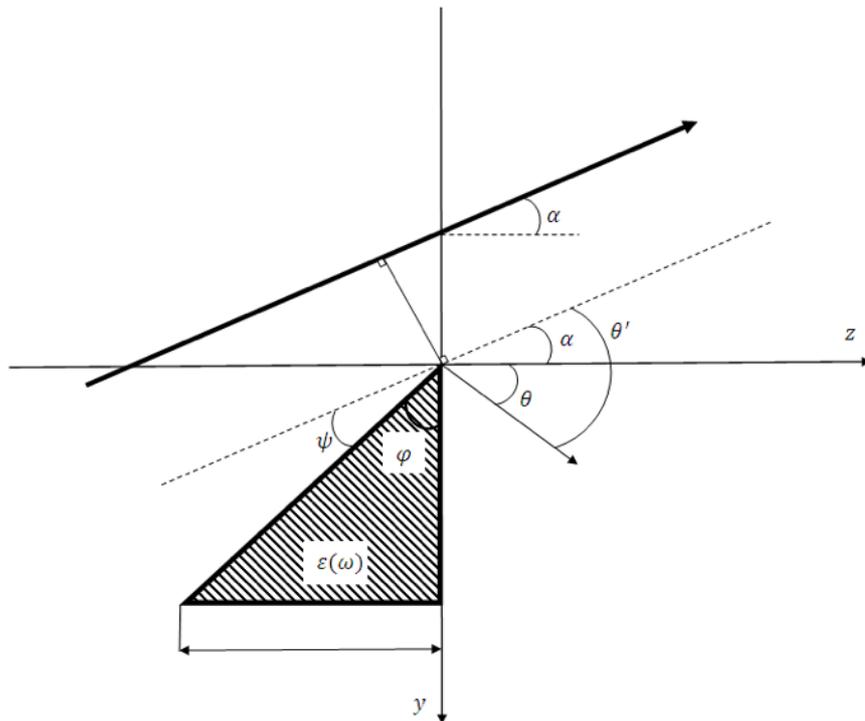


Рисунок 27 – Геометрия моделирования по формуле (1)

Ранее был рассмотрен слушай в котором проводилось моделирование для геометрии, где пучок пролетает параллельно большего катета призмы, в том примере углы у основания призмы были равны, что позволило непосредственно сравнивать эти две геометрии благодаря удвоению призмы.

В данном варианте углы при основании отличаются, и такой вариант сравнения уже нельзя использовать. Поэтому при моделировании будут

рассматривать две геометрии: первая – с идентичными параметрами мишени, вторая – с параметрами мишени, подобранными согласно работе [21].

Параметры моделирования (в обозначениях рис. 27):

$$\gamma = 2500$$

$$\lambda = 0.6 \text{ мкм}$$

$$\varepsilon = 2.13$$

$$b_1 = 1.04 \text{ мм } b_2 = 1.33 \text{ мм } b_3 = 1.68 \text{ мм } b_4 = 2.02 \text{ мм } b_5 = 2.46 \text{ мм}$$

$$\text{№1) } \varphi = 30 \text{ град}$$

$$\text{№2) } \varphi = 60 \text{ град}$$

$$a = 12 \text{ мм}$$

$$a = 16$$

Основной смысл подгонки параметров мишени (№2) в том, чтобы длины сторон призмы параллельно которым пролетают электроны были равны, как и углы «встречающие» пучок электронов.

Как следствие при такой подгонке угол раствора мишени  $\varphi$  меняется, что можно заметить по положению пика ИВЧ для представленных ниже рисунков.

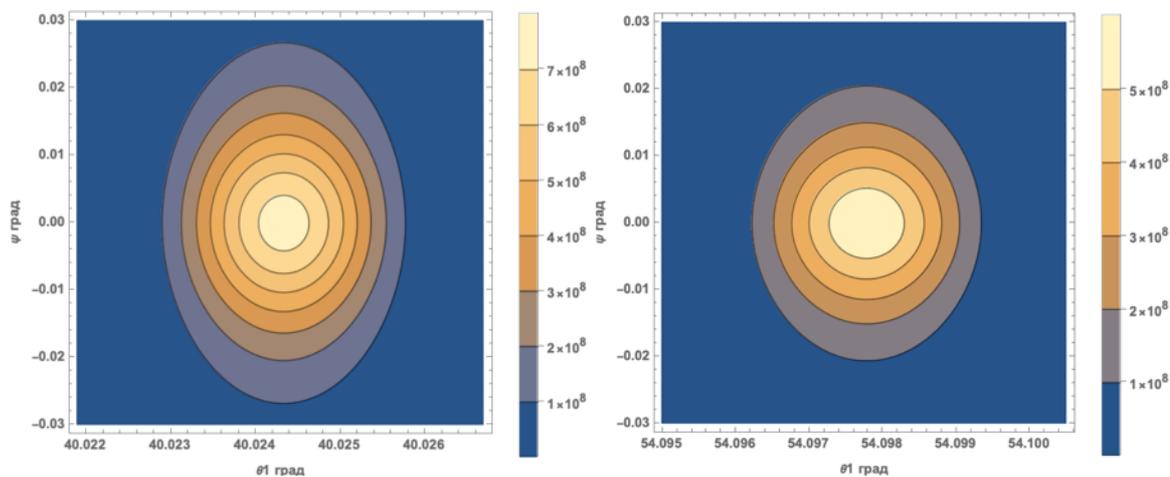


Рисунок 28 – Моделирование компоненты с исходными параметрами (№1)

слева и скорректированными (№2) справа для  $b = 1.04 \text{ мм}$

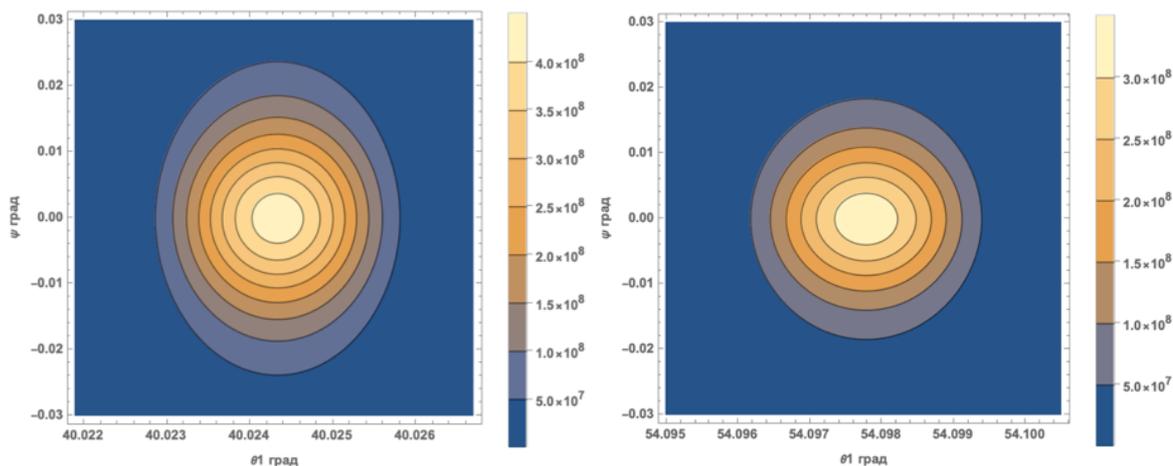


Рисунок 29 – Моделирование компоненты с исходными параметрами (№1) слева и скорректированными (№2) слева и скорректированными (№2) справа для  $b = 1.33$  мм

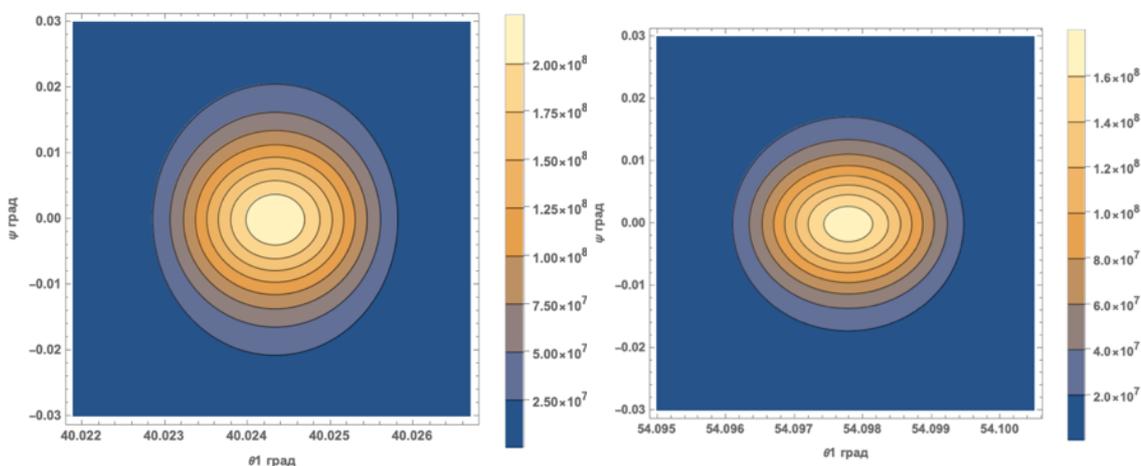


Рисунок 30 – Моделирование компоненты с исходными параметрами (№1) слева и скорректированными (№2) справа для  $b = 1.68$  мм

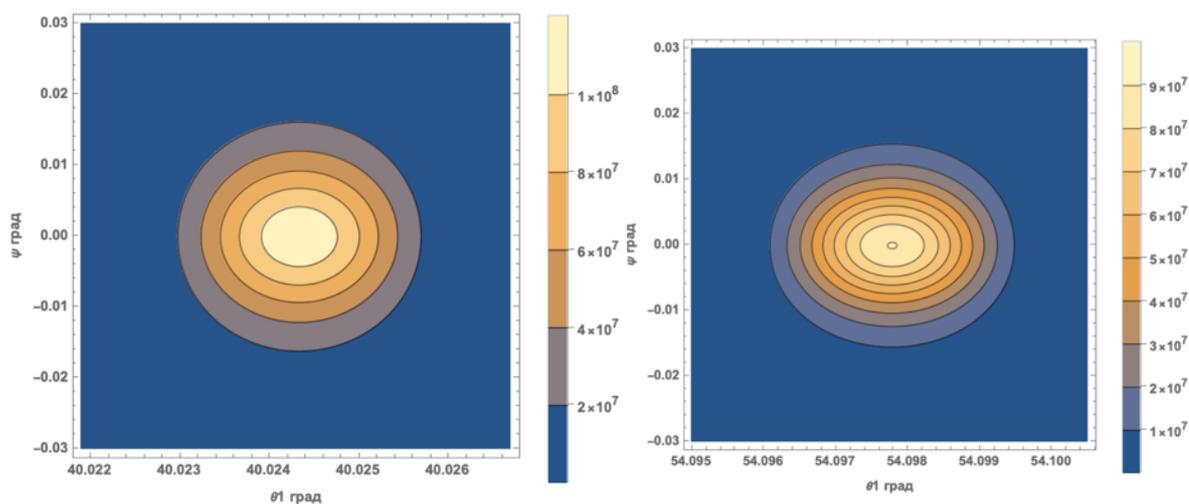


Рисунок 31 – Моделирование компоненты с исходными параметрами (№1) слева и скорректированными (№2) справа для  $b = 2.02$  мм

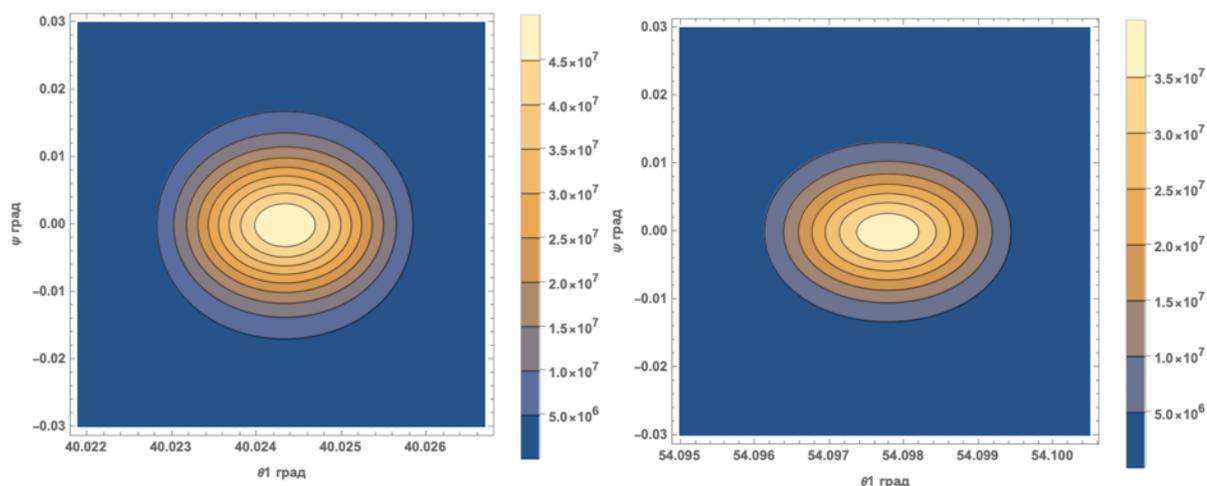


Рисунок 32 – Моделирование компоненты с исходными параметрами (№1) слева и скорректированными (№2) справа, для  $b = 2.46$  мм

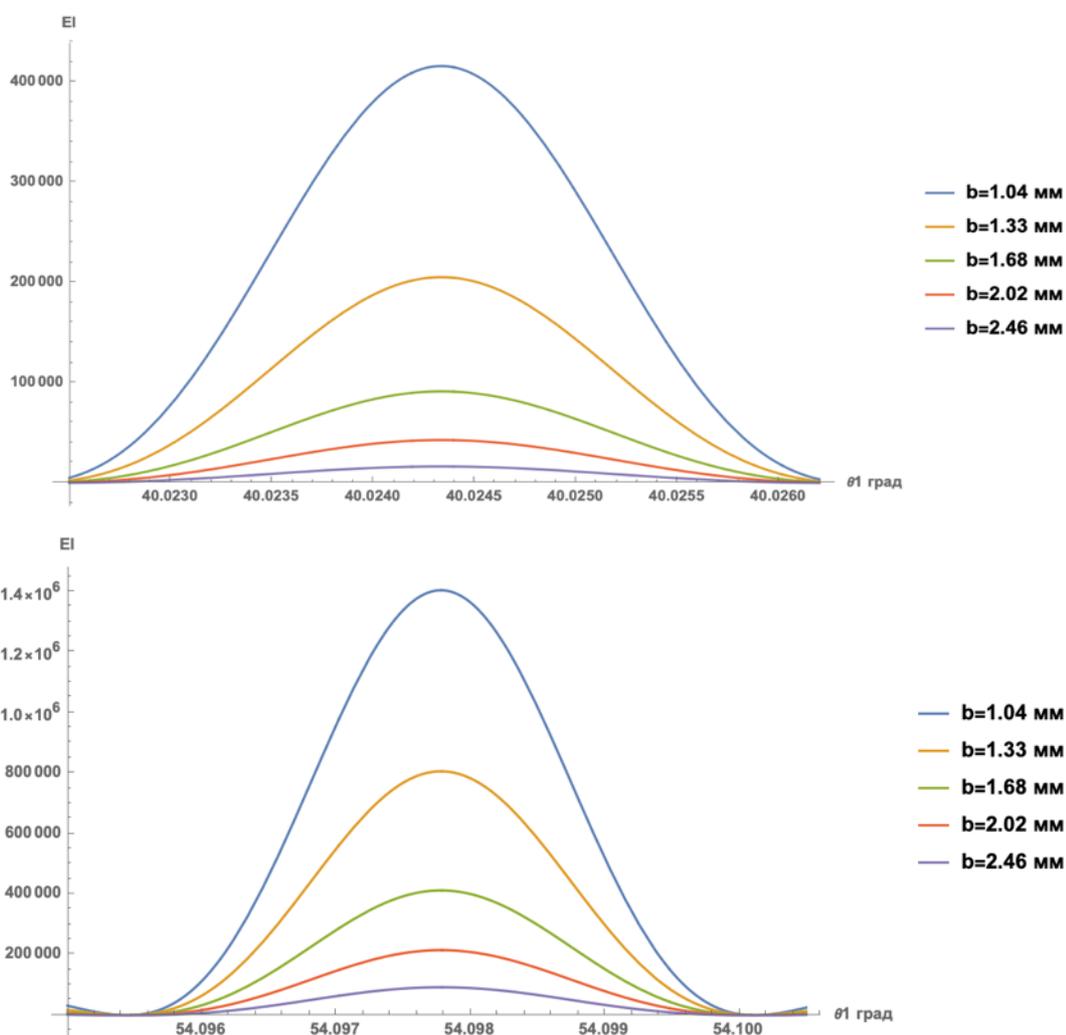


Рисунок 33 – Сравнение компонент с исходными параметрами (№1) сверху и скорректированными (№2) снизу, для нескольких  $b$  при интегрировании по  $\psi$  от -1.2 до 1.2 град

На данный момент эксперимент на ускорительном комплексе КЕК не завершен, поэтому на данный момент не представляется возможным сравнить которая из геометрий показывает корректный результат при моделировании.

Рассмотрим аналогичный набор параметров эксперимента, но для других значений прицельных параметров, аналогично моделированиям выше возьмем две «различные» призмы.

Параметры моделирования (в обозначениях рис. 27):

$$\gamma = 2500$$

$$\lambda = 0.6 \text{ мкм}$$

$$\varepsilon = 2.13$$

$$b = 0 - 500 \text{ мкм}$$

$$\text{№1) } \varphi = 30 \text{ град}$$

$$\text{№2) } \varphi = 60 \text{ град}$$

$$a = 12 \text{ мм}$$

$$a = 16 \text{ мм}$$

На представленных ниже рисунках результат моделирования перпендикулярной и параллельной компонент рассмотренных для двух типов геометрий - №1 (рис. 34-44) и №2 (рис. 51-61) для параметров прицельного параметра  $b$  от 0 до 500 мкм.

Проведено сравнение интенсивностей перпендикулярный компонент интенсивности углового распределения для нескольких значений прицельного параметра при  $\varphi = 0$  для параметров №1 (рис.45) и №2 (рис.62), при  $\theta = 0$  на рисунках 46 и 63, аналогично для параллельных компонент  $\varphi = 0$  – рис. 47, 64 и при  $\theta = 0$  – рис. 48, 65. Проведено моделирование перпендикулярных (рис. 49, 66) и параллельных (рис. 50, 67) компонент интенсивности углового распределения при интегрировании по  $\varphi$  от  $-1.2^\circ$  до  $1.2^\circ$  для двух типов геометрий.

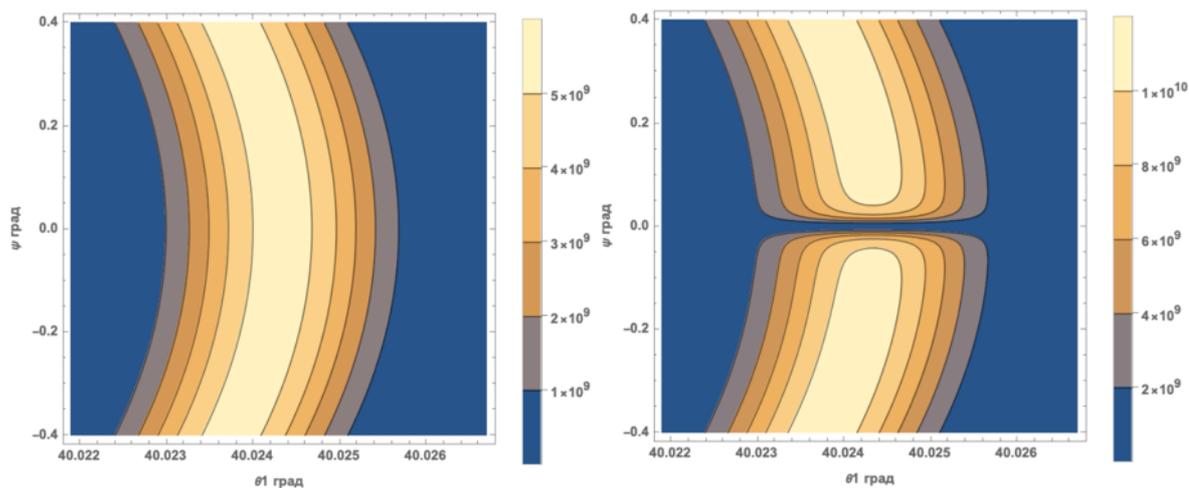


Рисунок 34 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 0$  мкм

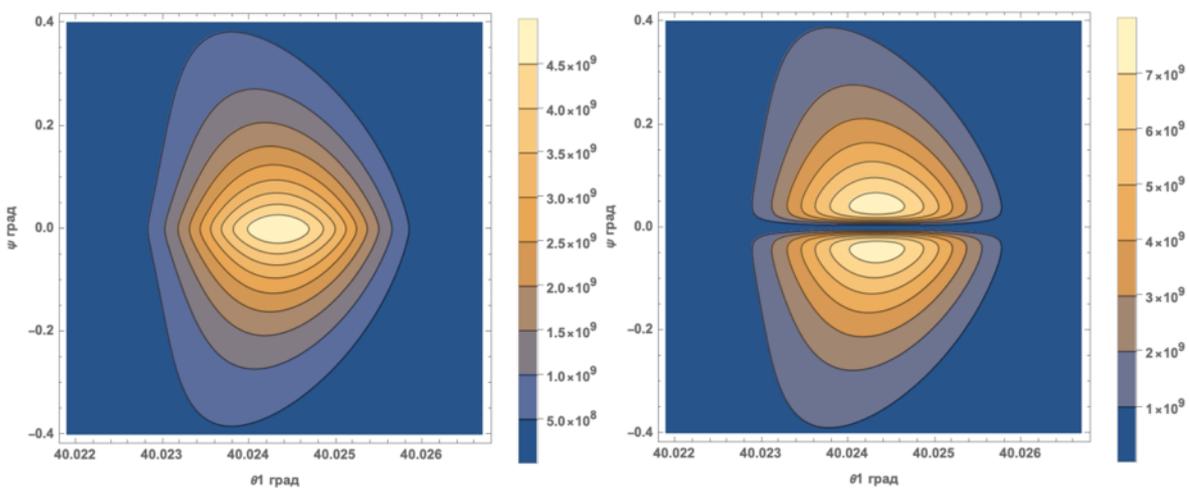


Рисунок 35 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 50$  мкм

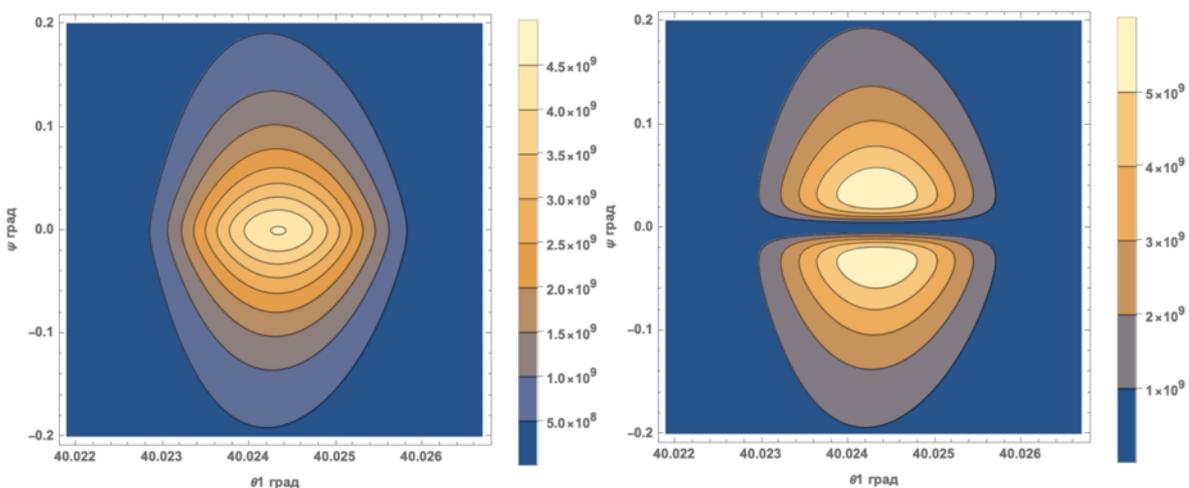


Рисунок 36 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 100$  мкм

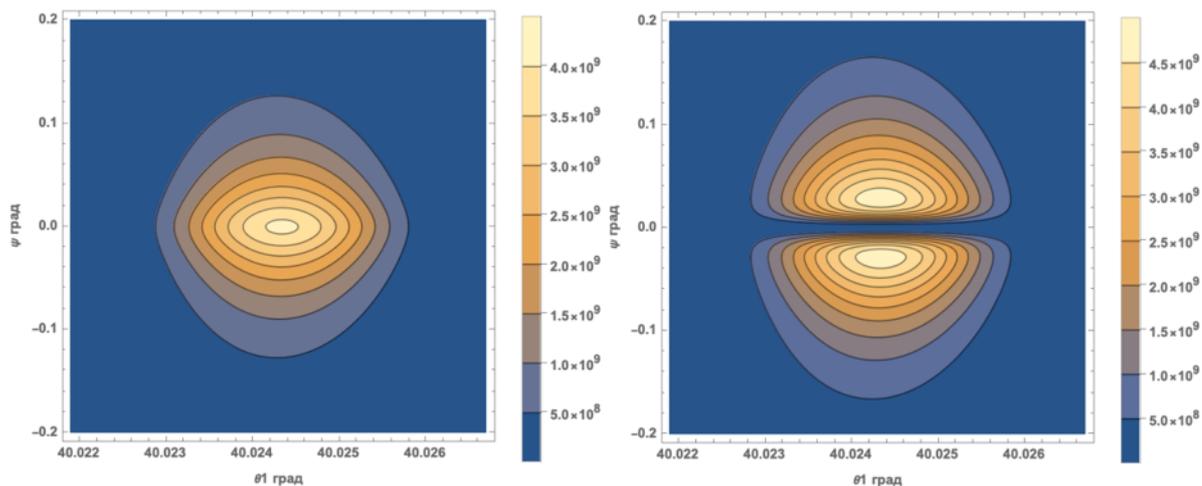


Рисунок 37 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 150$  мкм

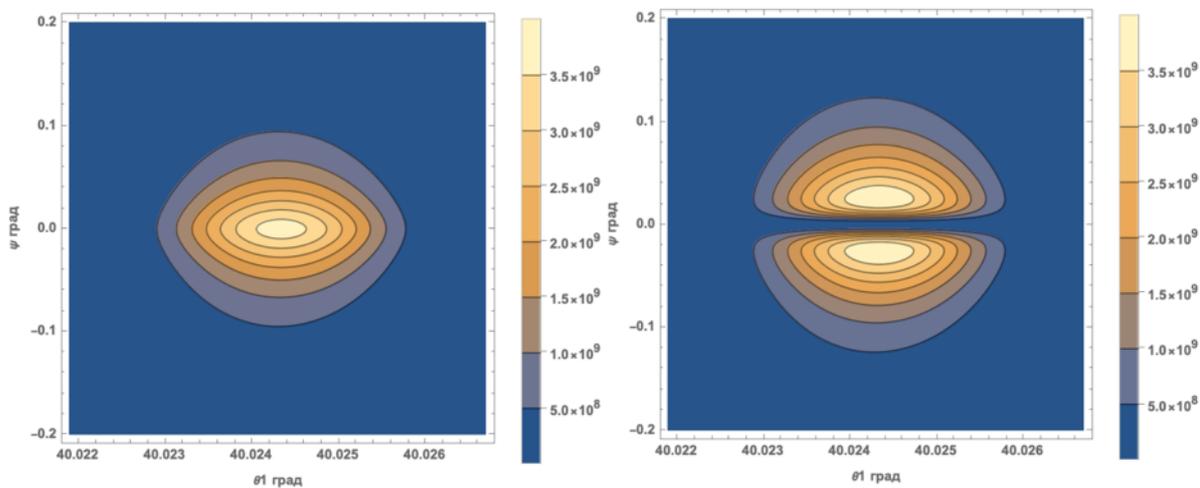


Рисунок 38 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 200$  мкм

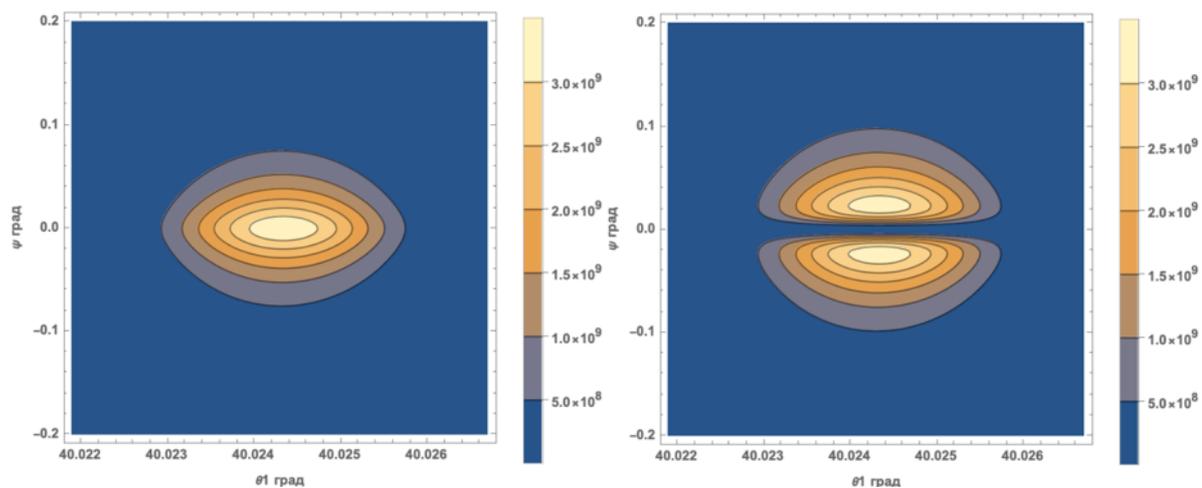


Рисунок 39 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 250$  мкм

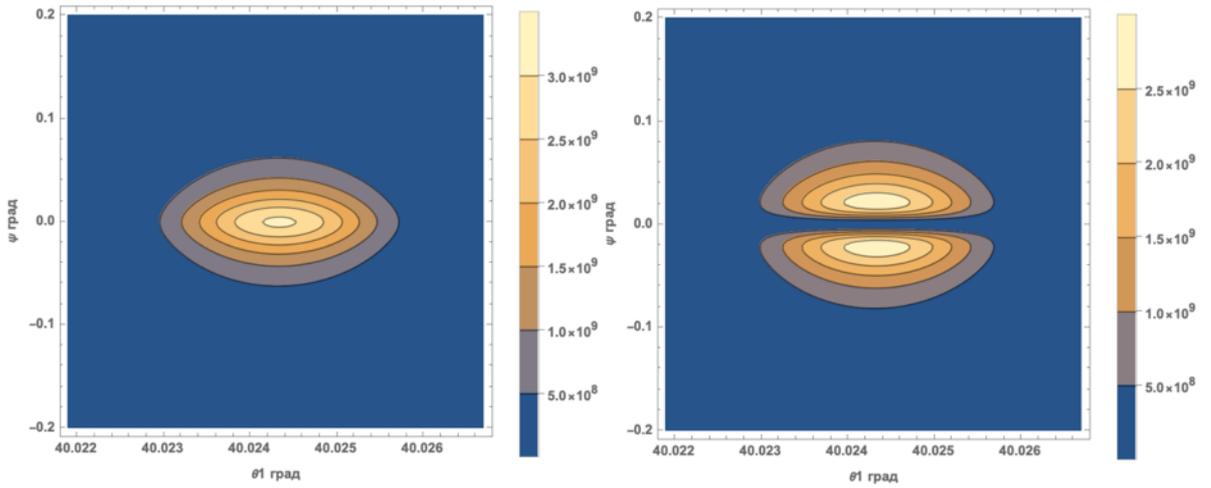


Рисунок 40 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 300$  мкм

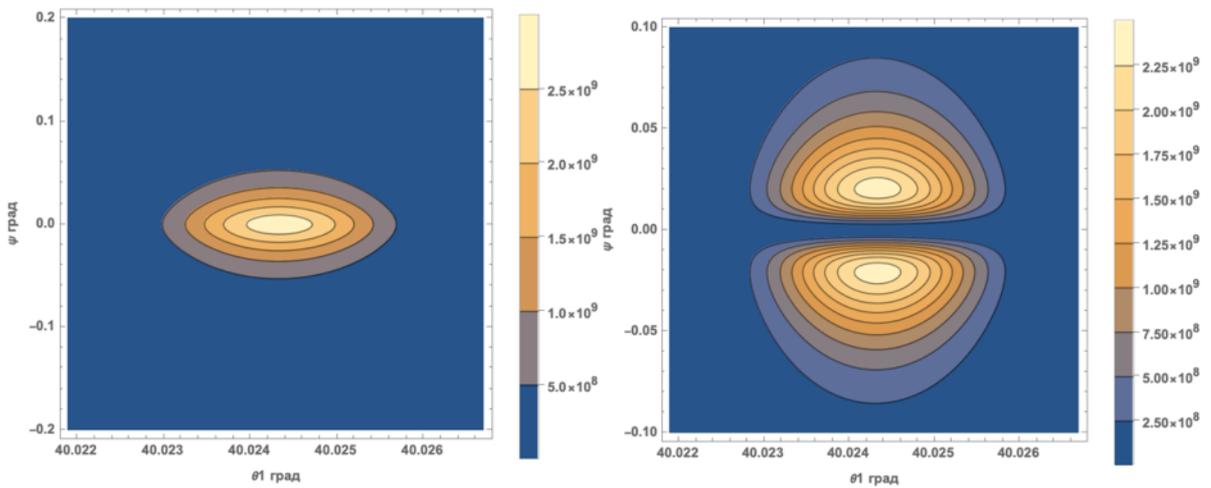


Рисунок 41 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 350$  мкм

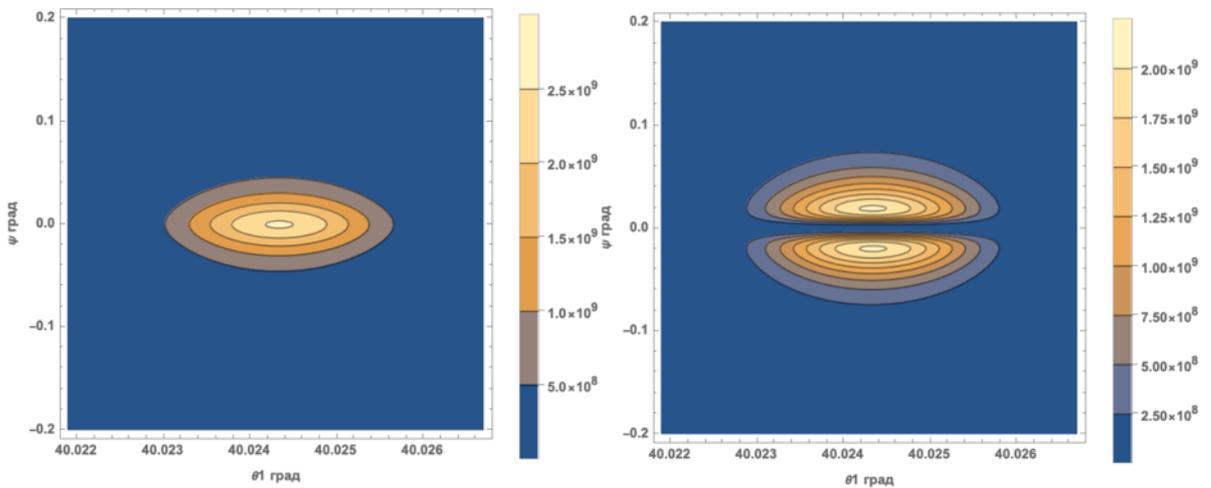


Рисунок 42 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 400$  мкм

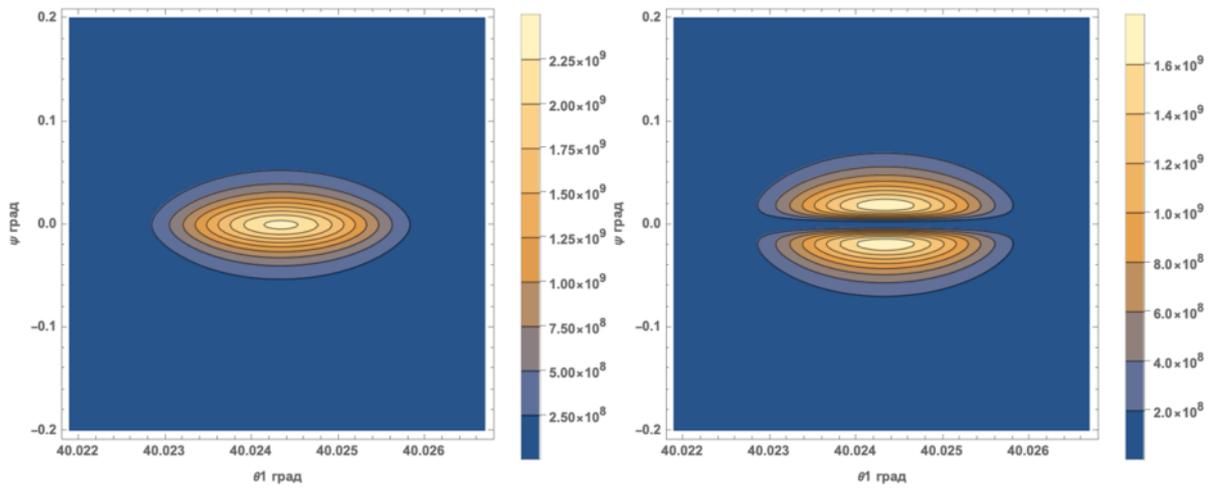


Рисунок 43 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 450$  мкм

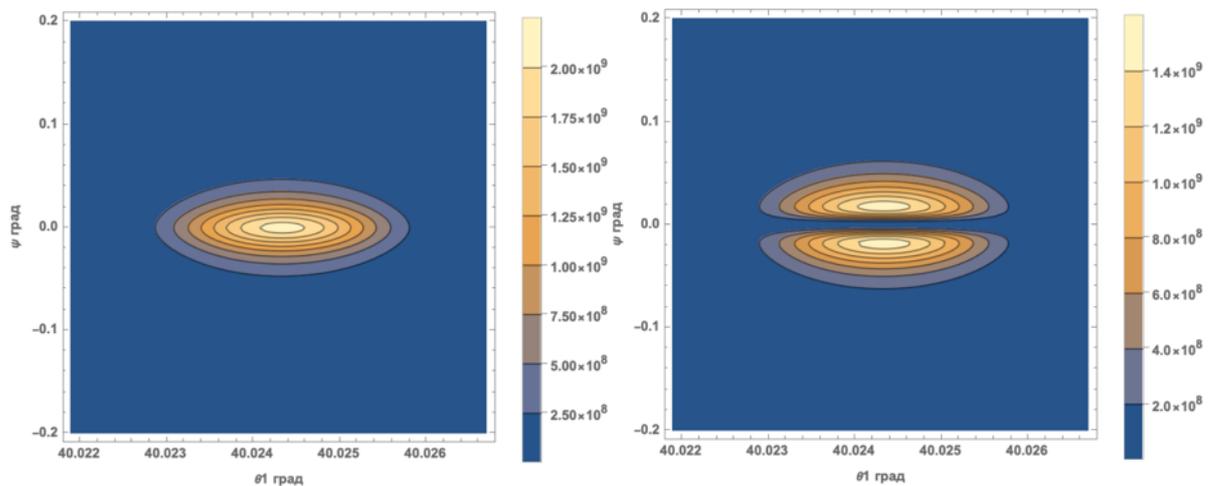


Рисунок 44 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№1) для  $b = 500$  мкм

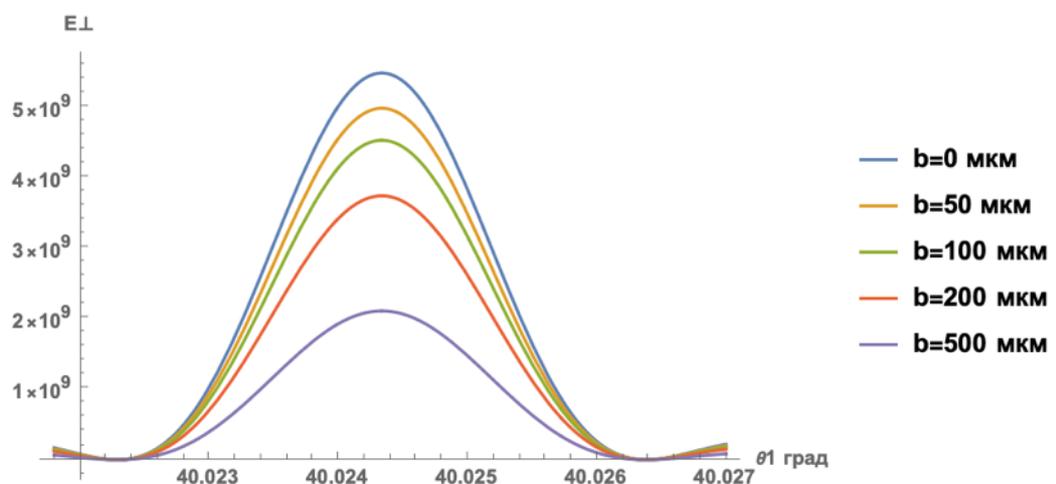


Рисунок 45 – Сравнение интенсивностей перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при  $\varphi = 0$  для параметров №1

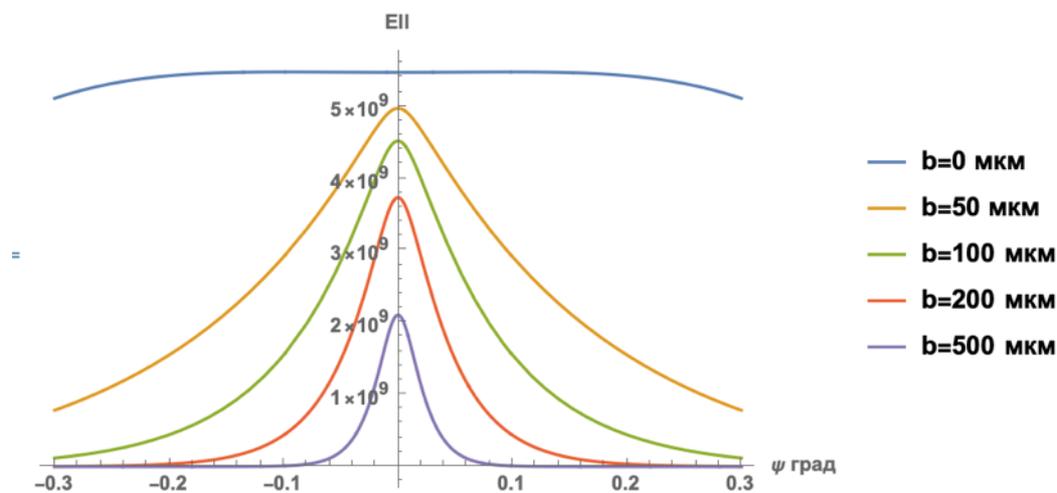


Рисунок 46 – Сравнение интенсивностей перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при  $\theta = 0$  для параметров №1

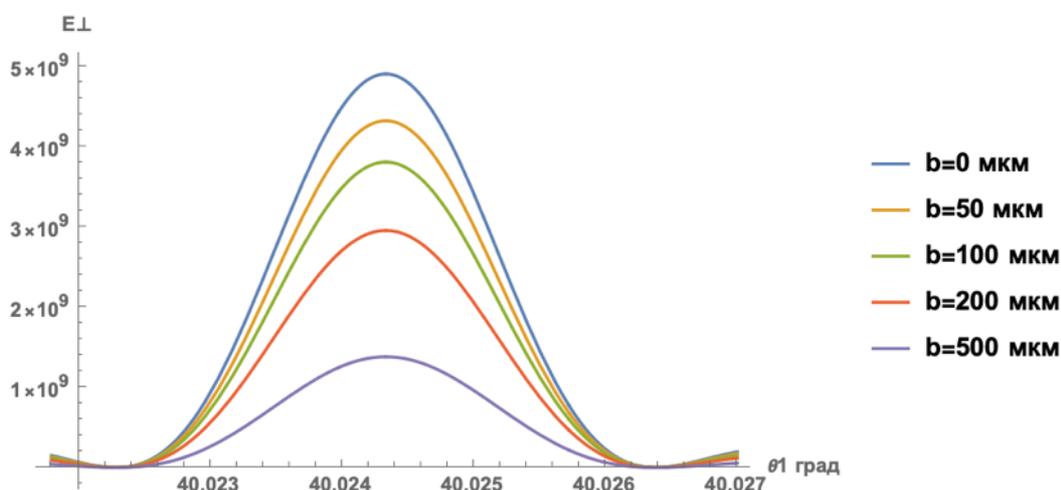


Рисунок 47 – Сравнение интенсивностей параллельных компонент для разных прицельных параметров при  $\varphi = 0$  для параметров №1

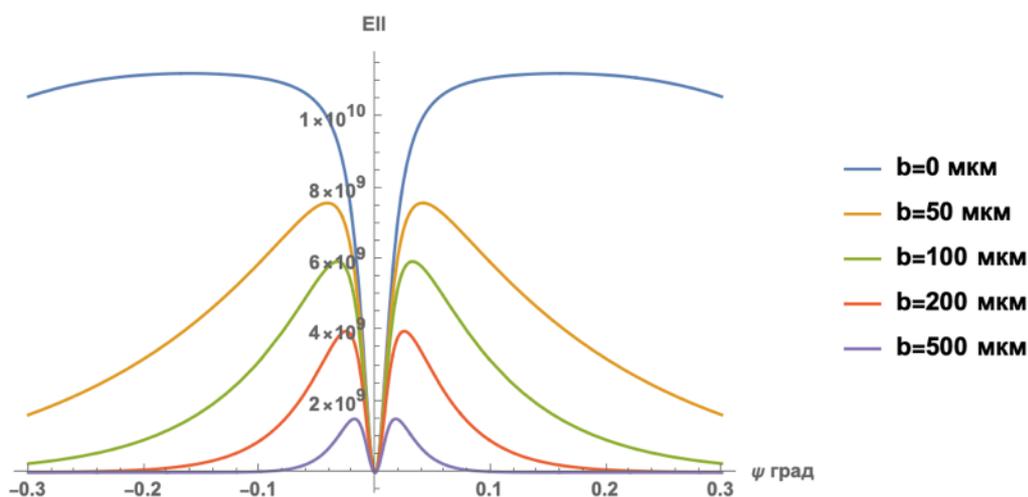


Рисунок 48 – Сравнение интенсивностей параллельных компонент для разных прицельных параметров при  $\theta = 0$  для параметров №1

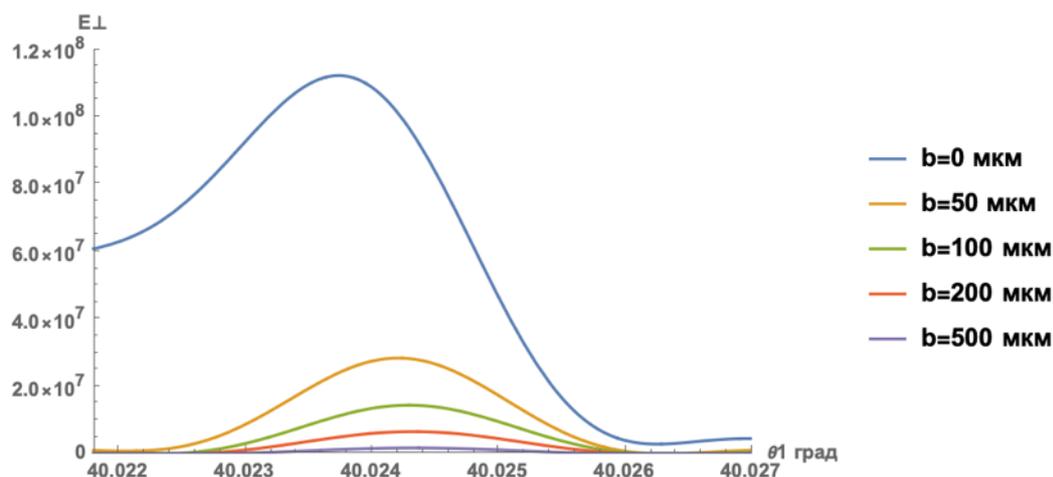


Рисунок 49 – Сравнение перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при суммировании по  $\varphi$  от  $-1.2^\circ$  до  $1.2^\circ$  для параметров №1

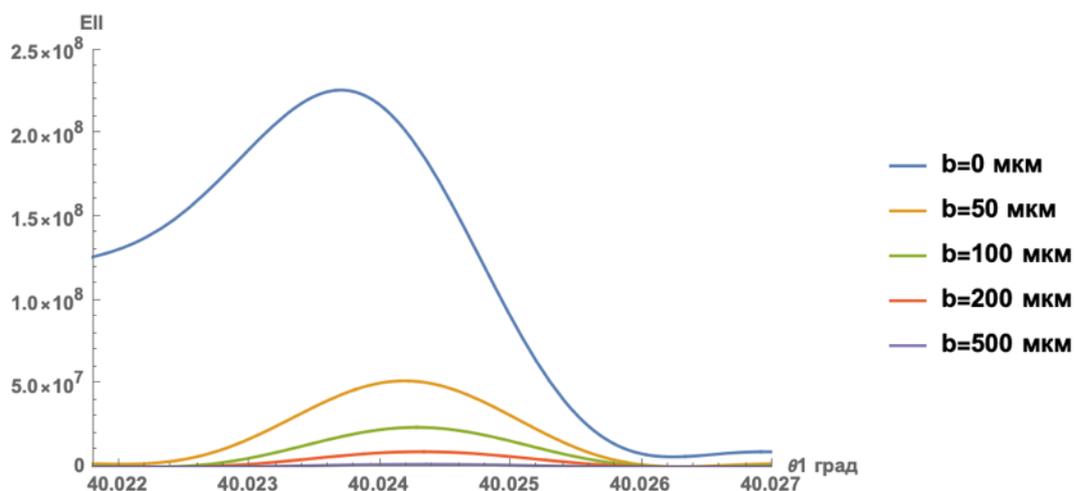


Рисунок 50 – Сравнение параллельных компонент для разных прицельных параметров при суммировании по  $\varphi$  от  $-1.2^\circ$  до  $1.2^\circ$  для параметров №1

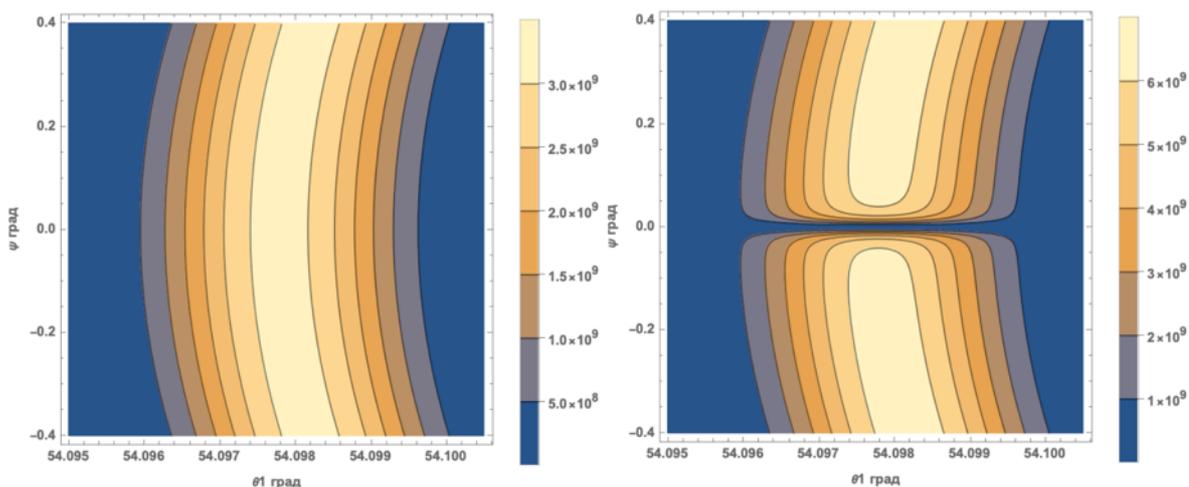


Рисунок 51 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 0$  мкм

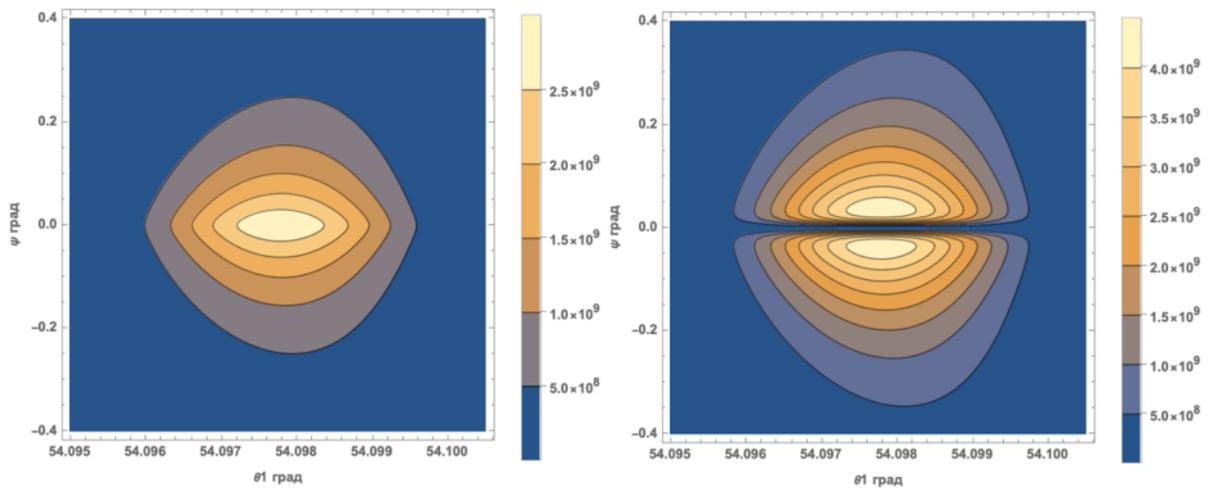


Рисунок 52 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 50$  мкм

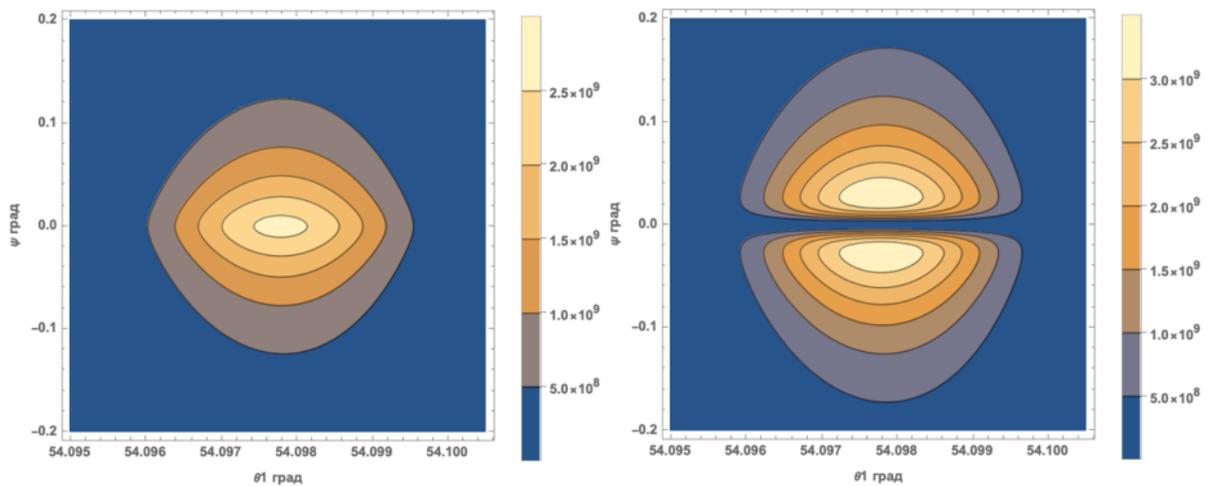


Рисунок 53 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 100$  мкм

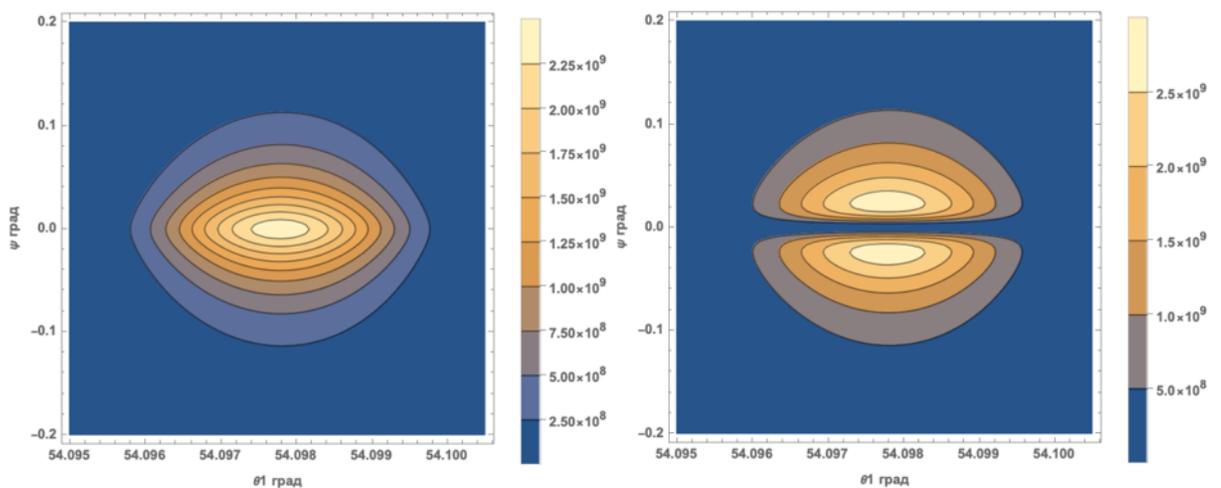


Рисунок 54 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 150$  мкм

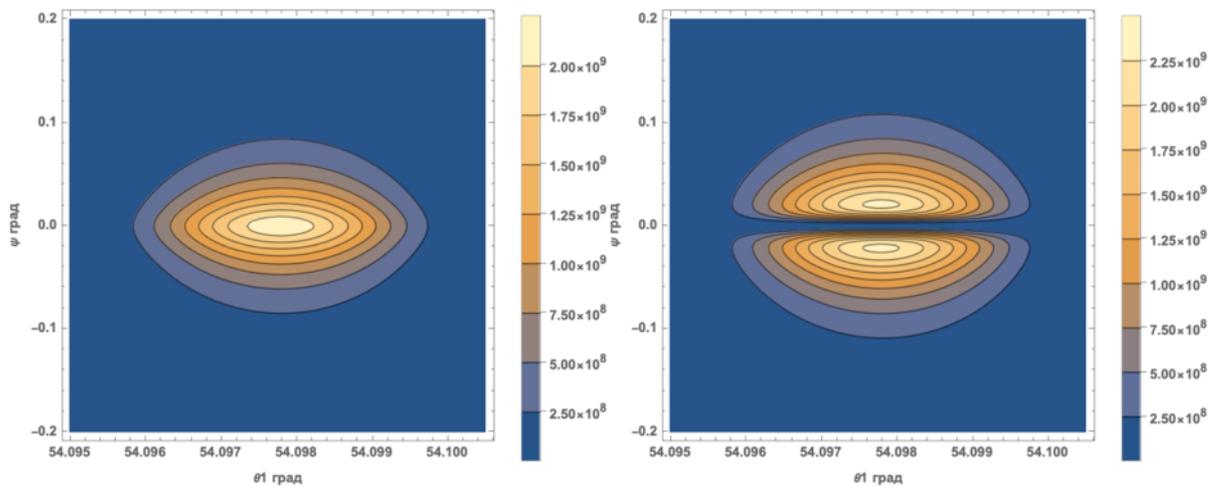


Рисунок 55 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 200$  мкм

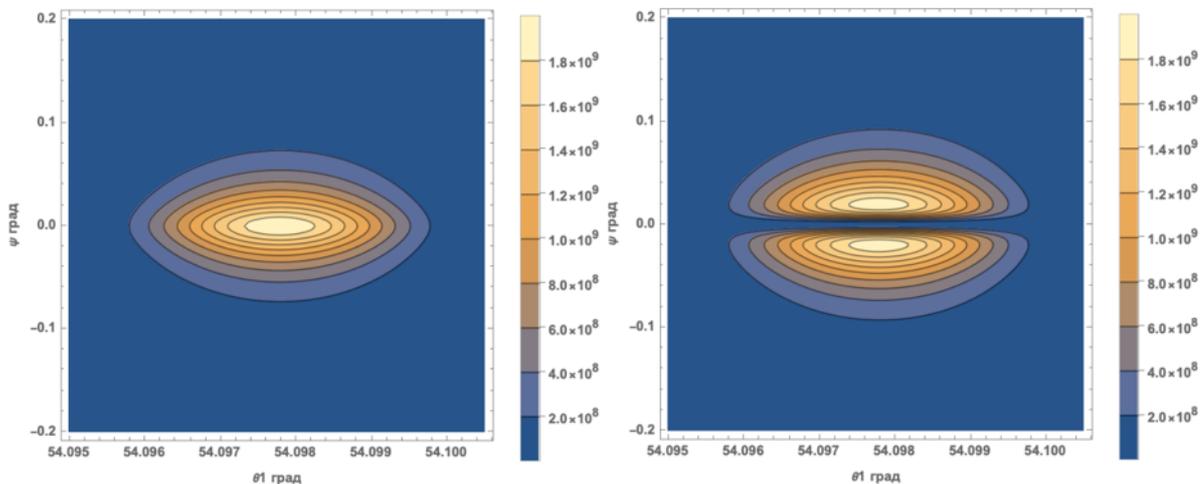


Рисунок 56 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 250$  мкм

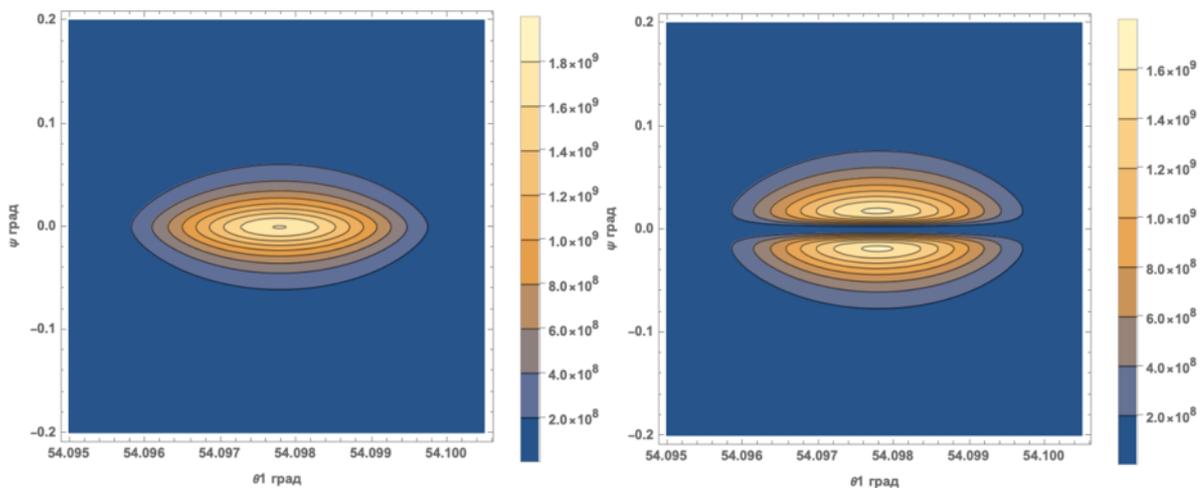


Рисунок 57 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 300$  мкм

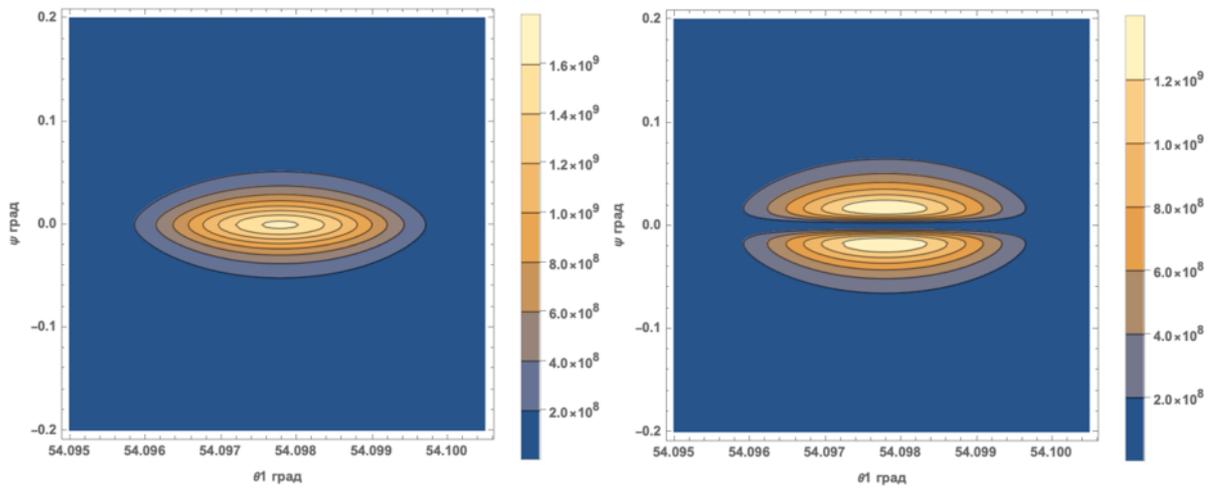


Рисунок 58 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 350$  мкм

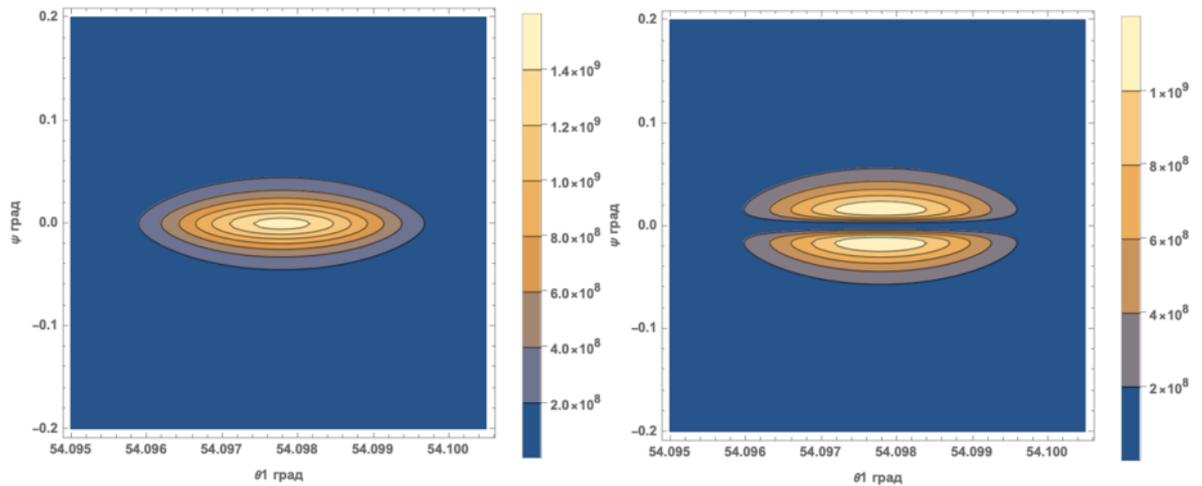


Рисунок 59 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 400$  мкм

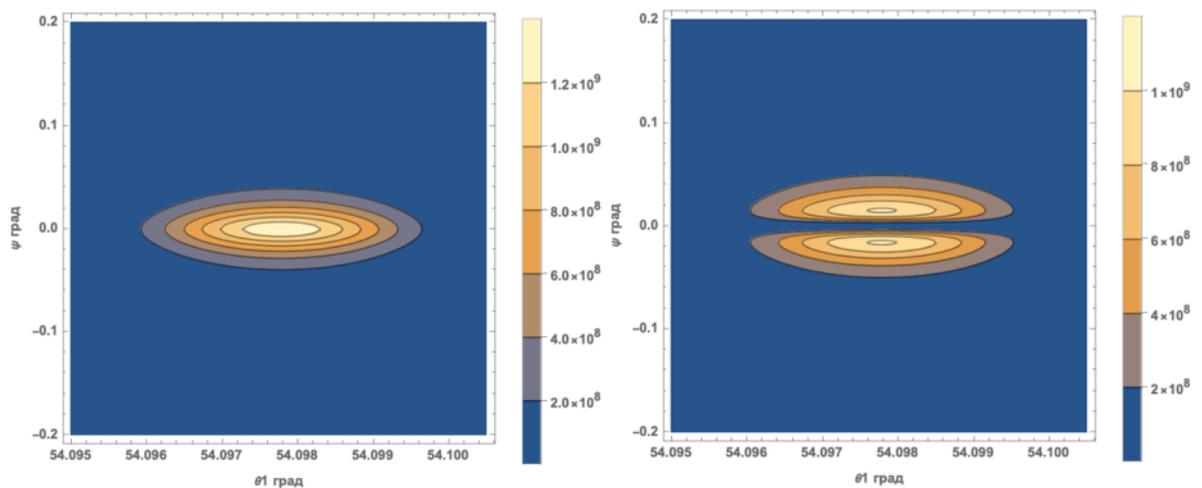


Рисунок 60 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 450$  мкм

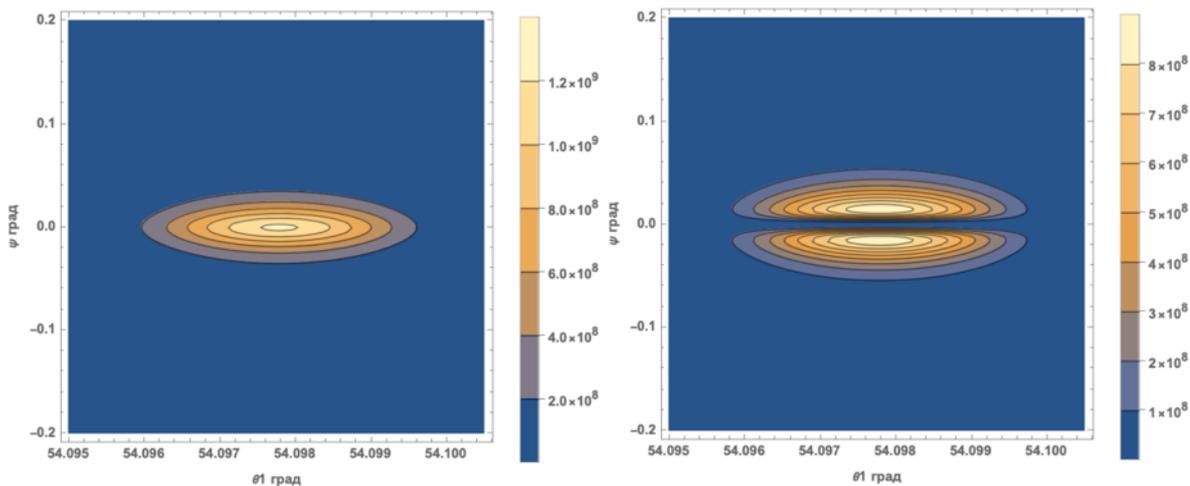


Рисунок 61 – Моделирование перпендикулярной (слева) и параллельной (справа) компонент с параметрами (№2) для  $b = 500$  мкм

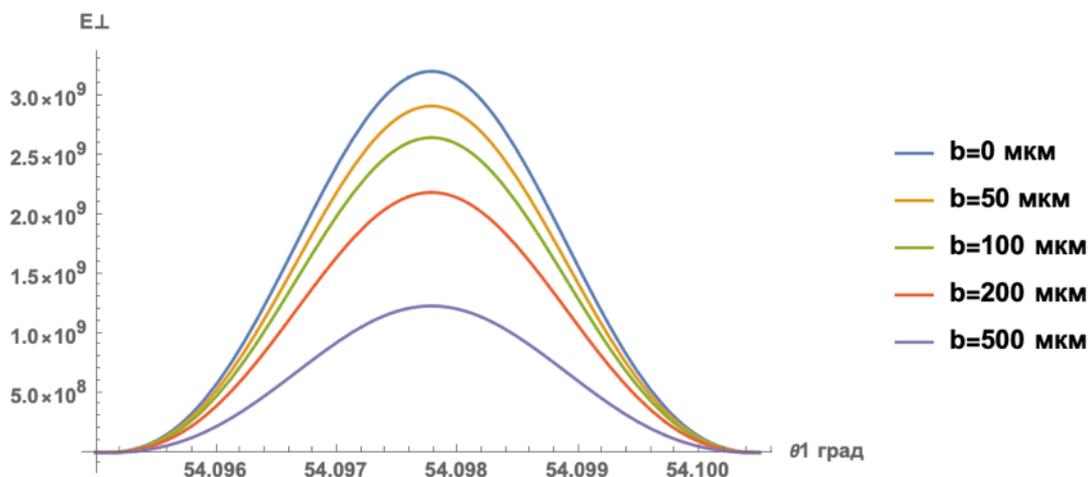


Рисунок 62 – Сравнение интенсивностей перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при  $\varphi = 0$  для параметров №2

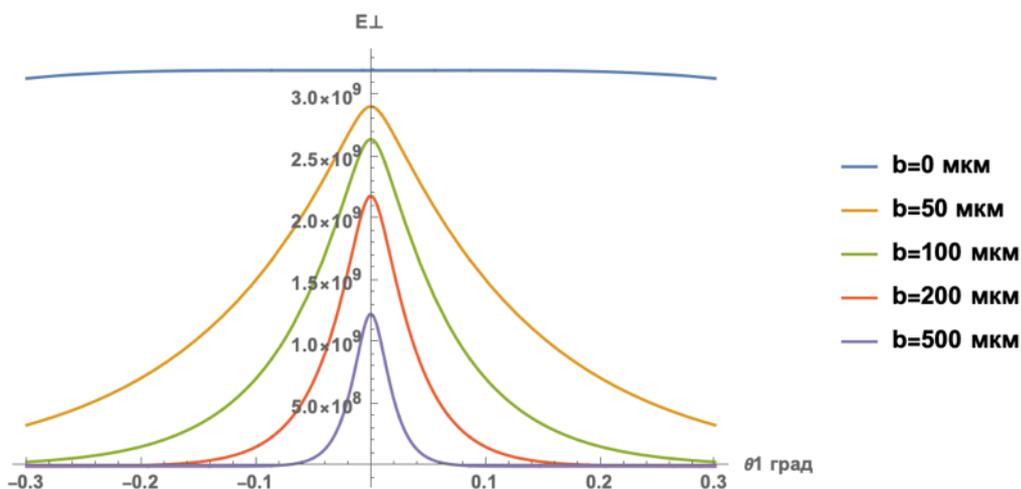


Рисунок 63 – Сравнение интенсивностей перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при  $\theta = 0$  для параметров №2

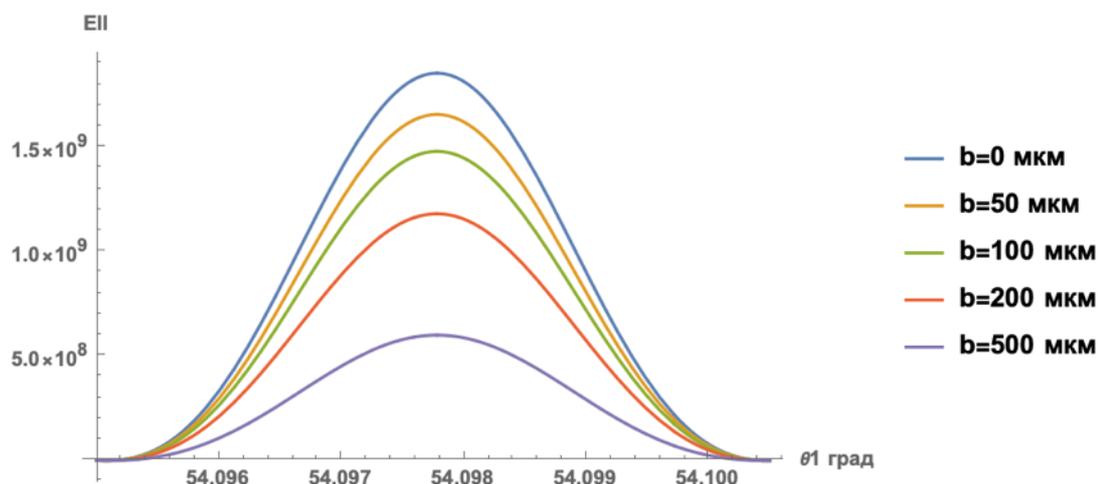


Рисунок 64 – Сравнение интенсивностей параллельных компонент для разных прицельных параметров при  $\varphi = 0$  для параметров №2

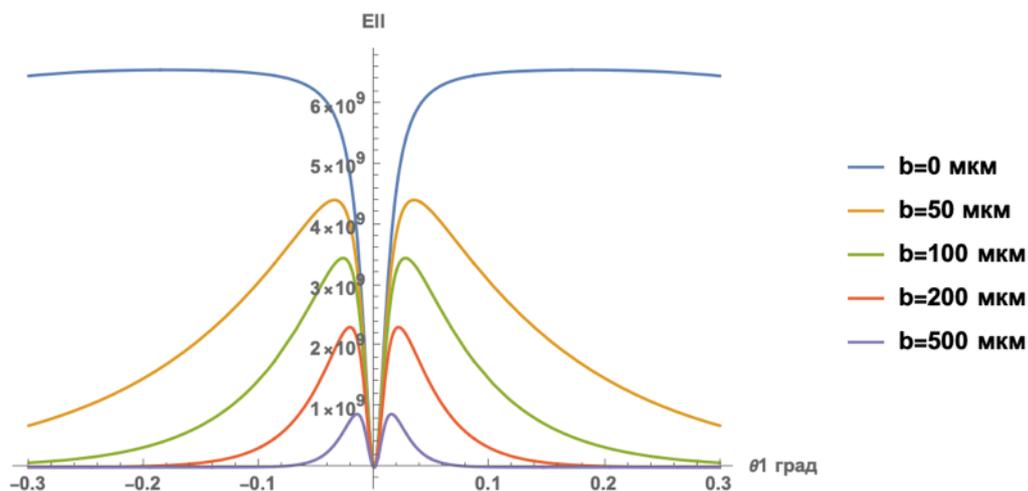


Рисунок 65 – Сравнение интенсивностей параллельных компонент для разных прицельных параметров при  $\theta = 0$  для параметров №2

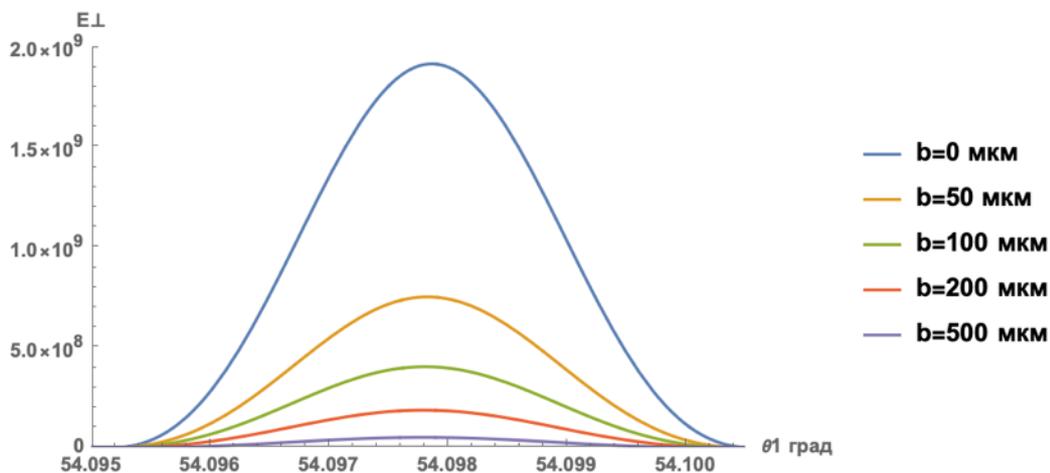


Рисунок 66 – Сравнение перпендикулярных компонент для разных прицельных параметров при суммировании по  $\varphi$  от  $-1.2^\circ$  до  $1.2^\circ$  для параметров №2

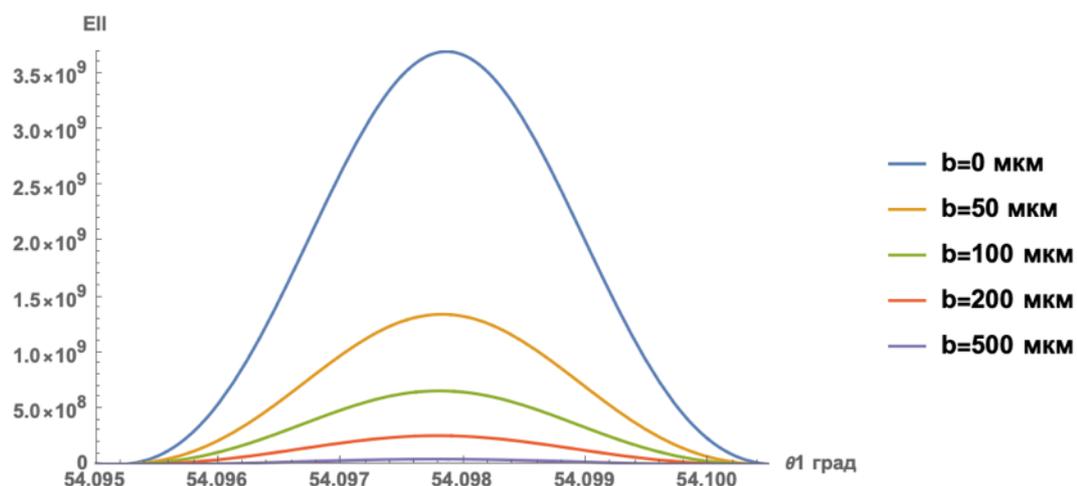


Рисунок 67 – Сравнение параллельных компонент для разных прицельных параметров при суммировании по  $\varphi$  от  $-1.2^\circ$  до  $1.2^\circ$  для параметров №2

Следующим шагом будет получение спектрально-углового распределений перпендикулярной компоненты поля. Используя полученные ранее компоненты спектрально-углового распределения поля ДИ и ИВЧ, построим контурные графики для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ с параметрами №1 (слева) и №2 (справа) при  $\lambda = 0.5$  мкм на рисунках 68-78, при  $\lambda = 0.7$  мкм на рисунках 79-89).

Геометрия моделирования изменена аналогично представленным ранее методом, параметры моделирования представлены ниже:

$$\gamma = 2500$$

$$\lambda = 0.5, 0.7 \text{ мкм}$$

$$b = 0 - 500 \text{ мкм}$$

$$\text{№1) } \varphi = 30 \text{ град}$$

$$a = 12 \text{ мм}$$

$$\text{№2) } \varphi = 60 \text{ град}$$

$$a = 16 \text{ мм}$$

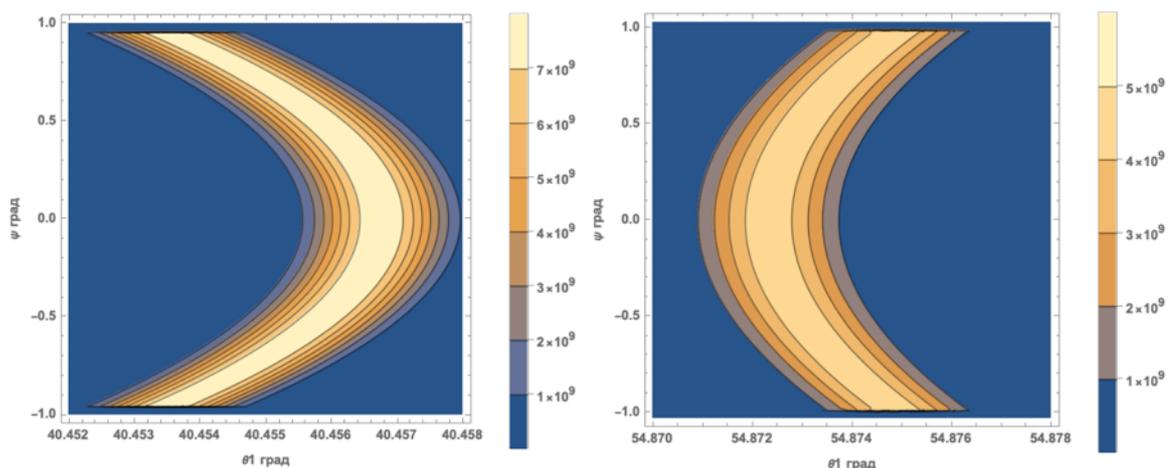


Рисунок 68 – Контурный график для интенсивности перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 0$  мкм с параметрами (№1)

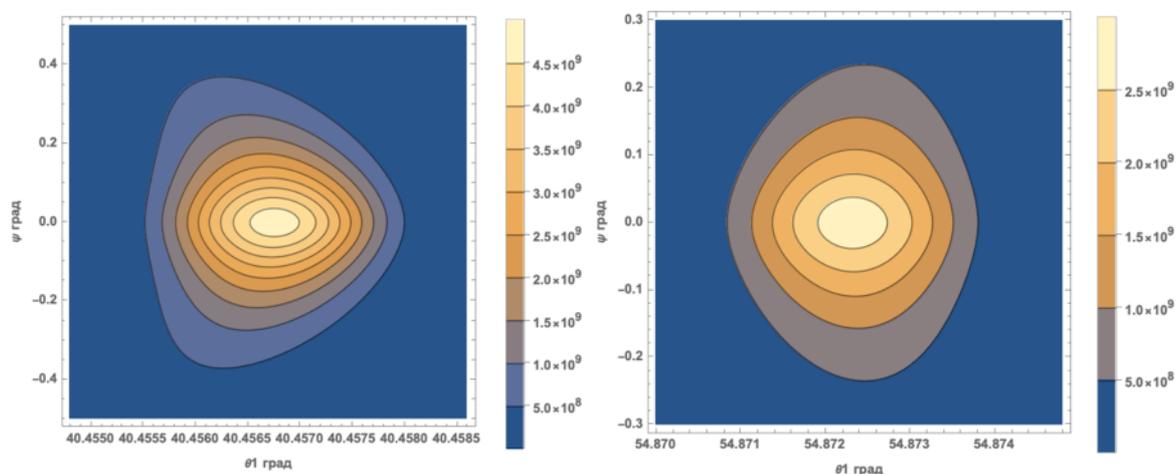


Рисунок 69 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 50$  мкм с параметрами (№1)

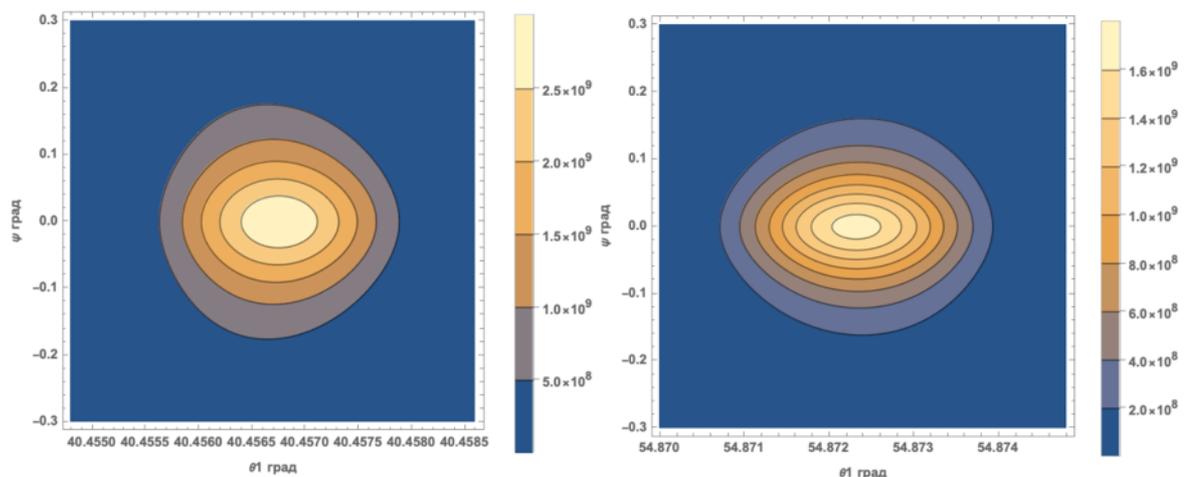


Рисунок 70 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 100$  мкм с параметрами (№1)

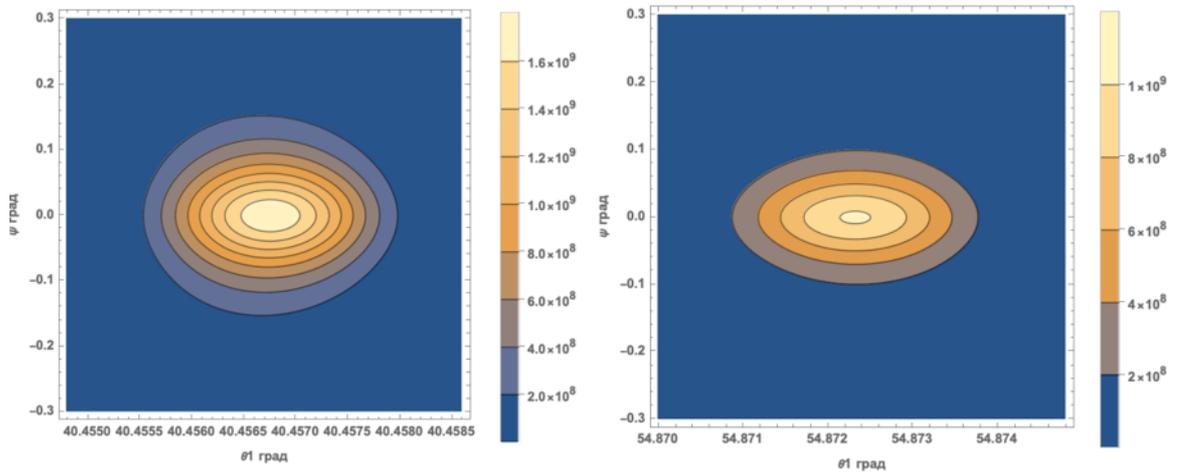


Рисунок 71 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 150$  мкм с параметрами (№1)

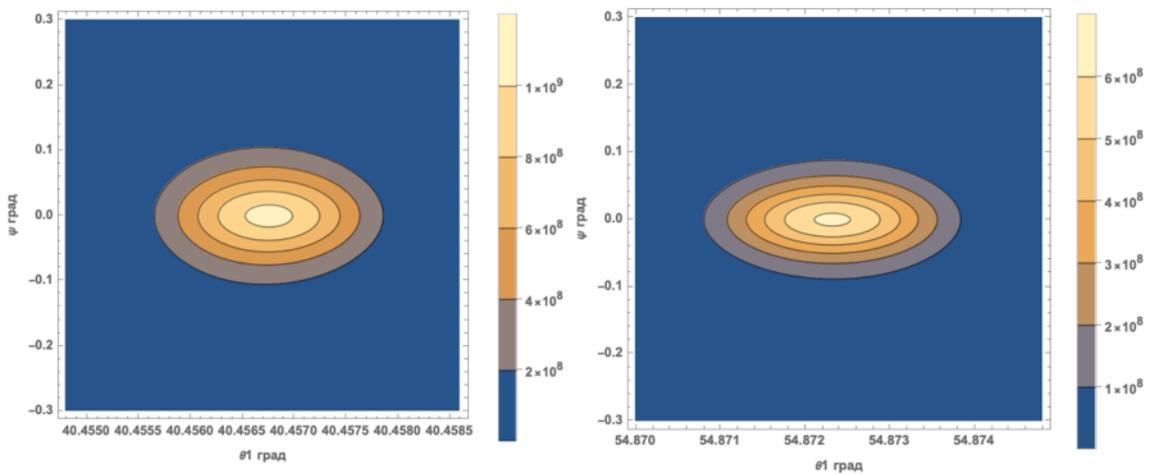


Рисунок 72 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 200$  мкм с параметрами (№1)

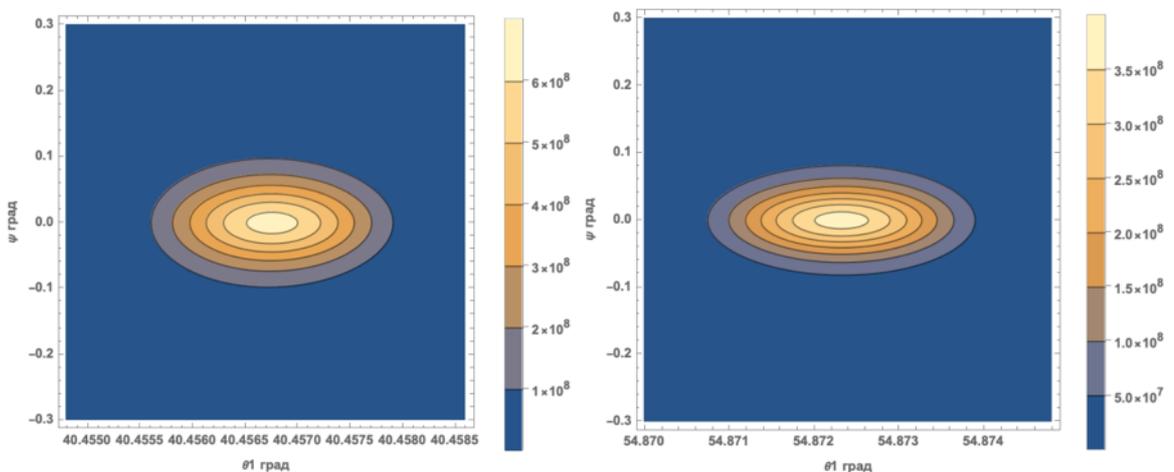


Рисунок 73 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 250$  мкм с параметрами (№1)

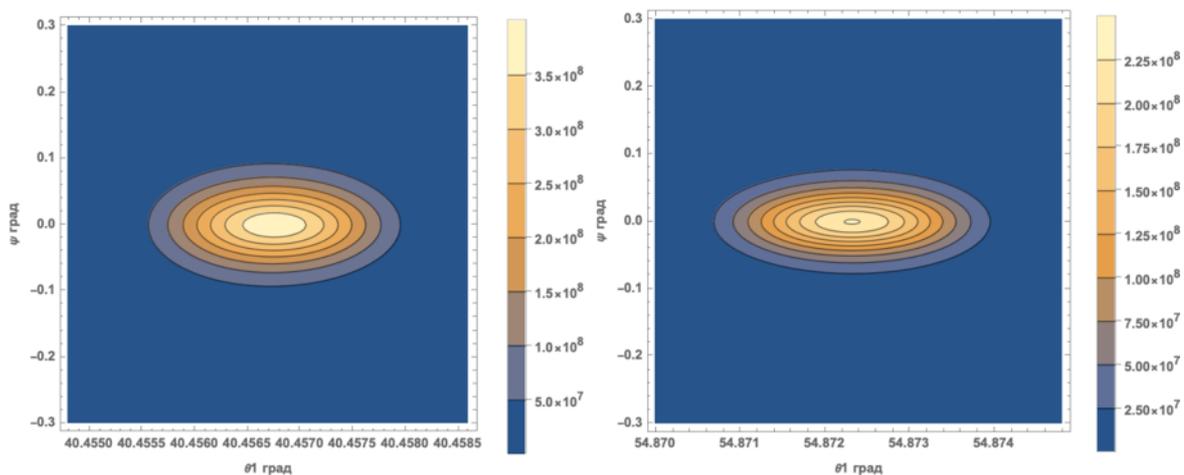


Рисунок 74 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 300$  мкм с параметрами (№1)

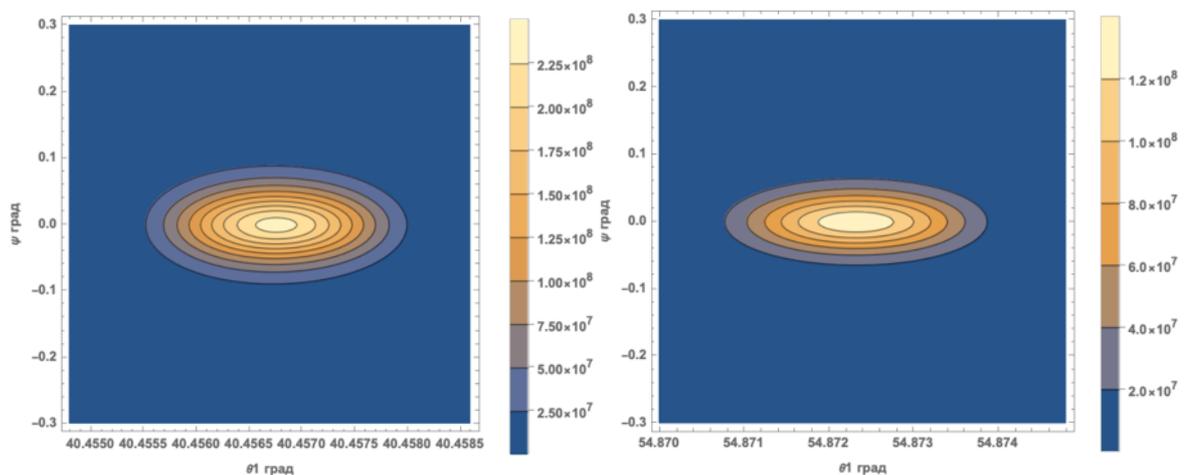


Рисунок 75 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 350$  мкм с параметрами (№1)

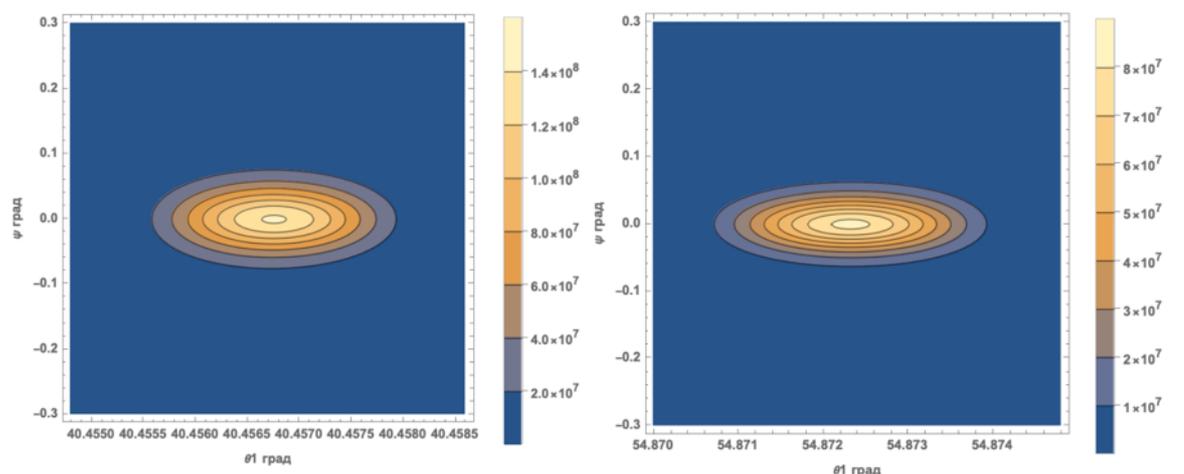


Рисунок 76 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 400$  мкм с параметрами (№1)

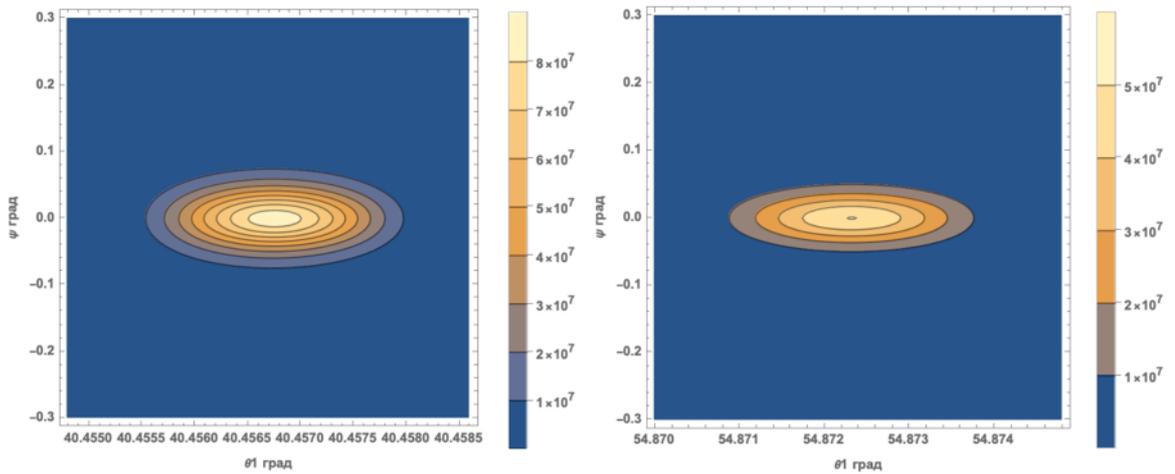


Рисунок 77 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 450$  мкм с параметрами (№1)

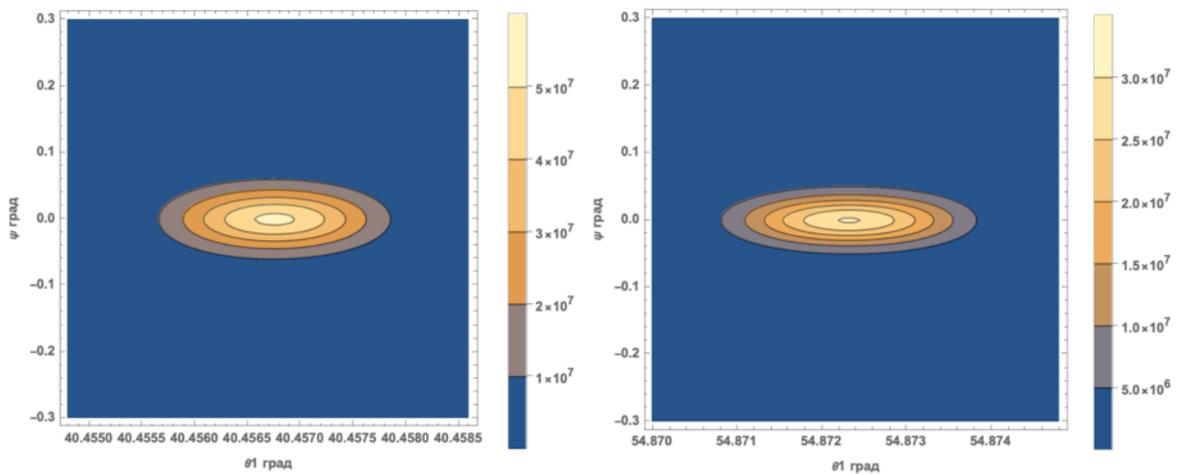


Рисунок 78 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.5$  мкм,  $b = 500$  мкм с параметрами (№1)

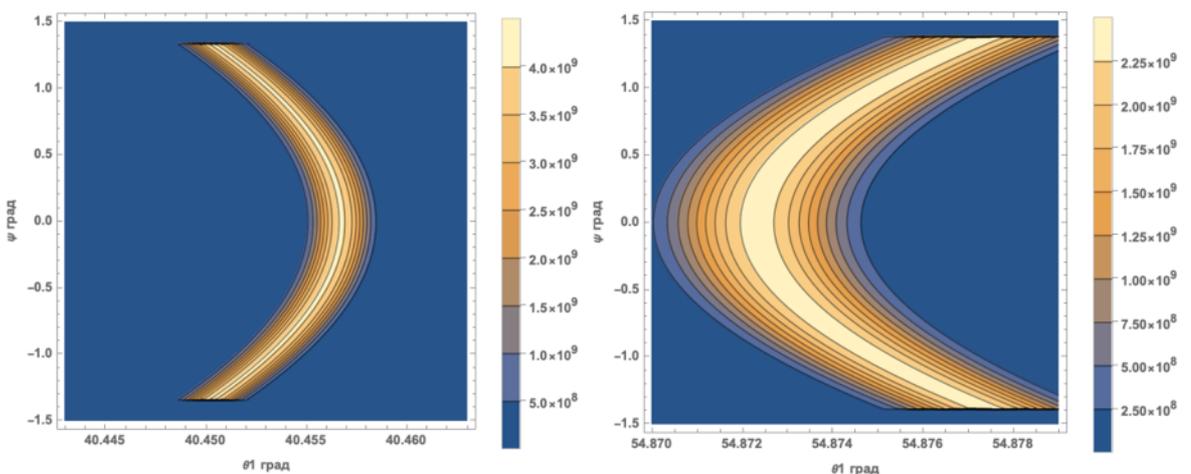


Рисунок 79 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 0$  мкм с параметрами (№1)

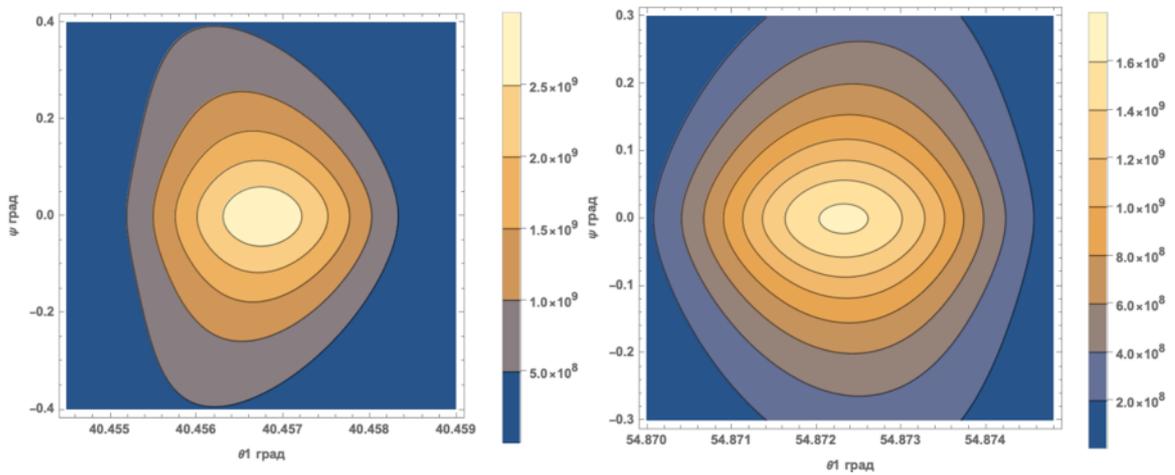


Рисунок 80 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 50$  мкм с параметрами (№1)

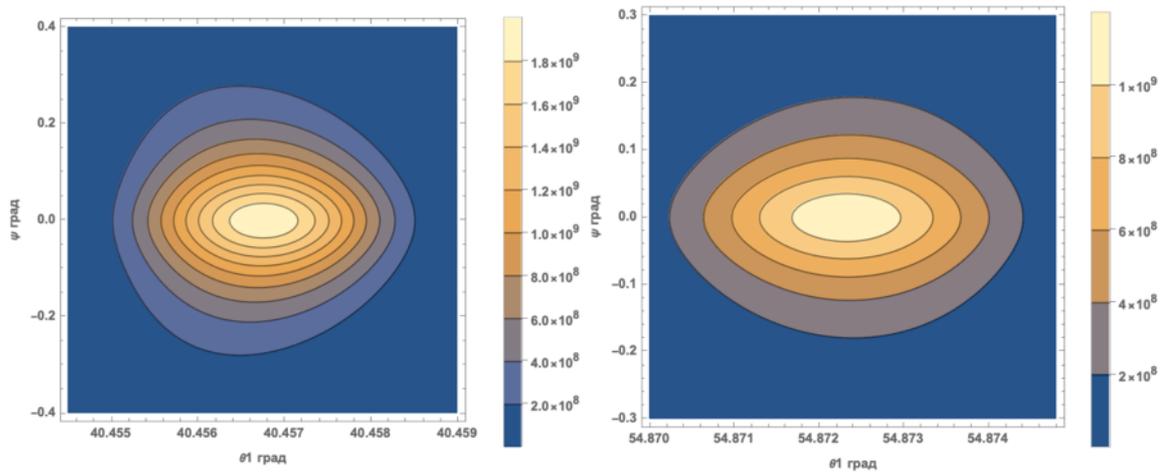


Рисунок 81 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 100$  мкм с параметрами (№1)

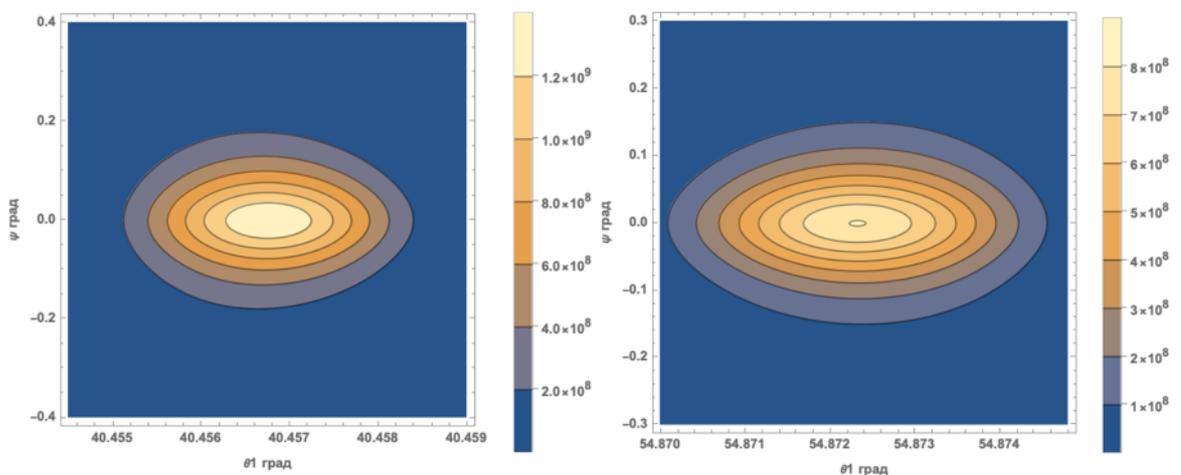


Рисунок 82 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 150$  мкм с параметрами (№1)

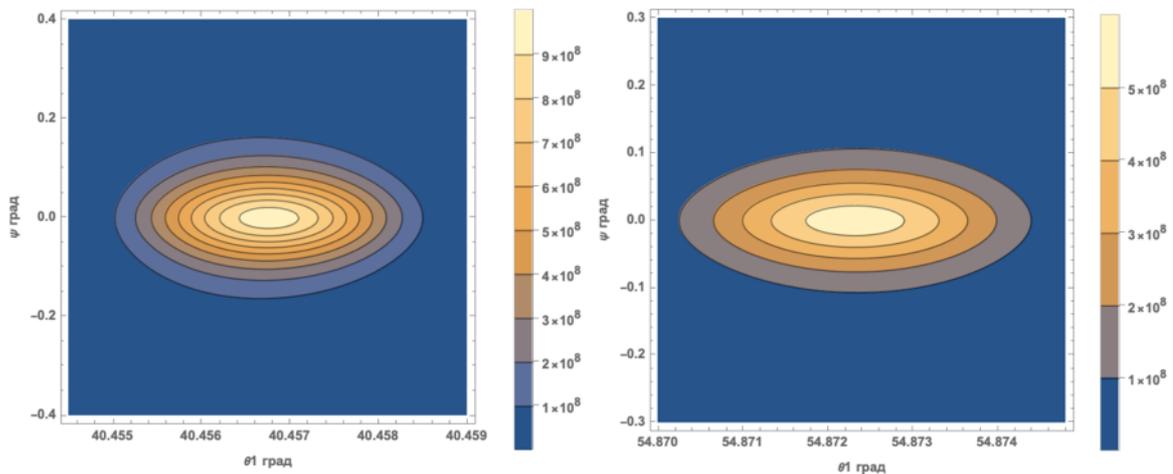


Рисунок 83 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 200$  мкм с параметрами (№1)

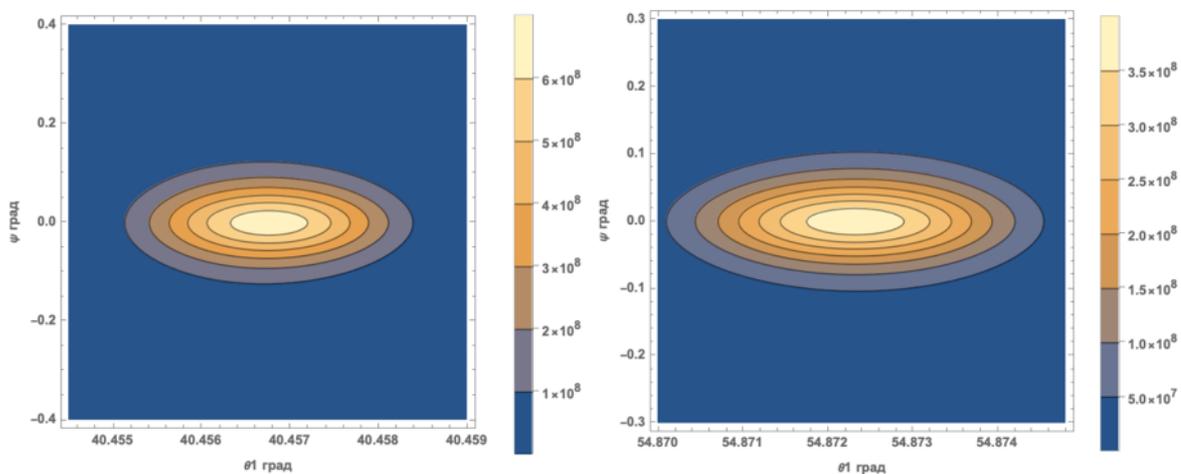


Рисунок 84 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 250$  мкм с параметрами (№1)

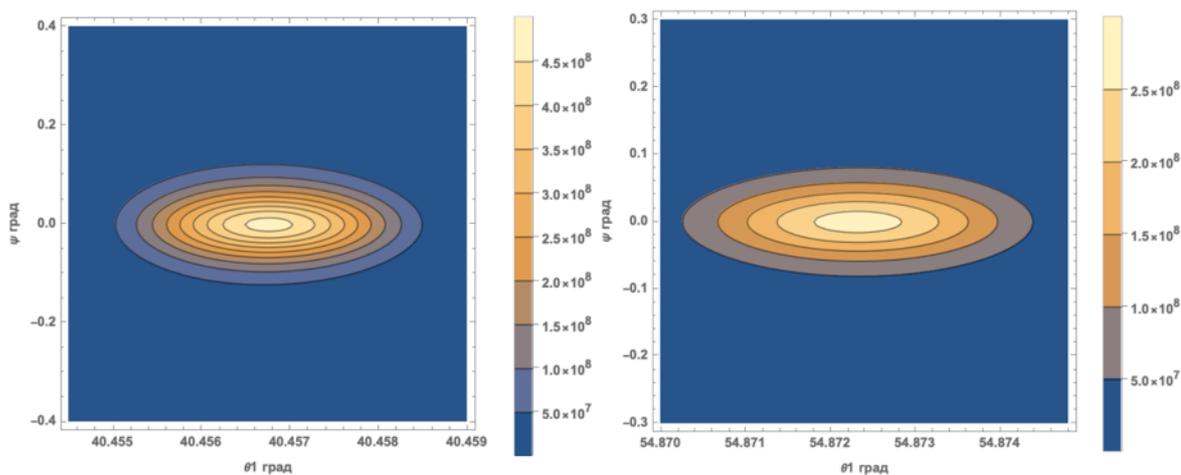


Рисунок 85 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 300$  мкм с параметрами (№1)

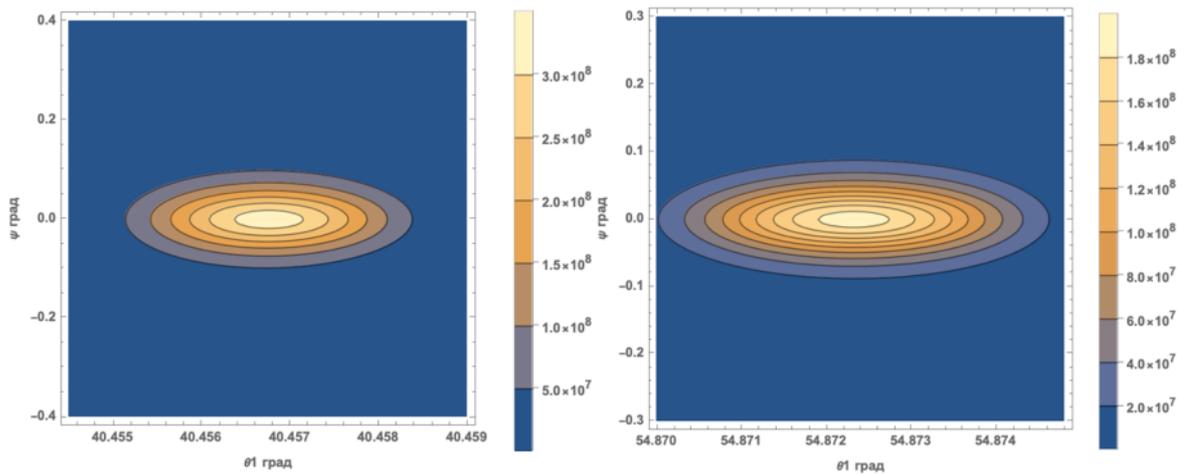


Рисунок 86 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 350$  мкм с параметрами (№1)

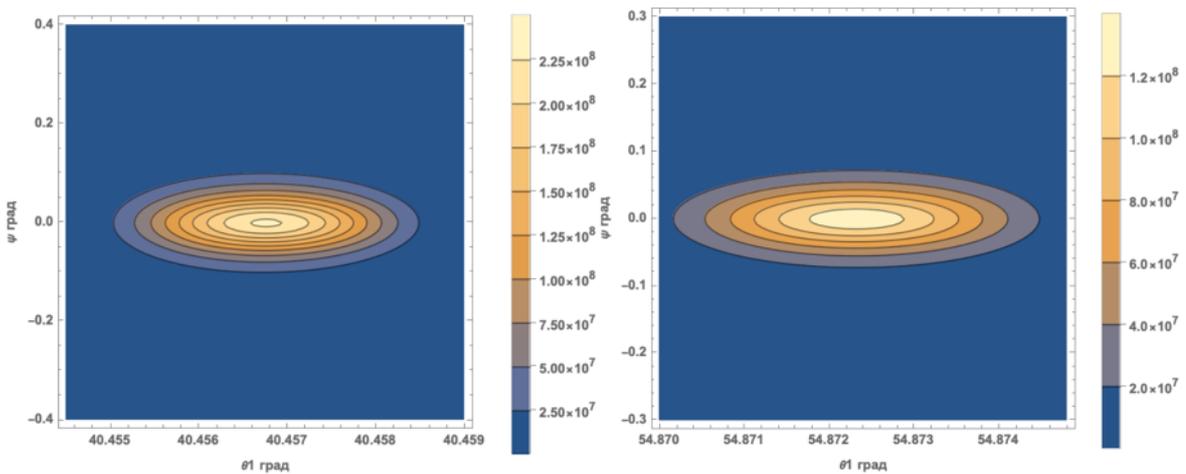


Рисунок 87 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 400$  мкм с параметрами (№1)

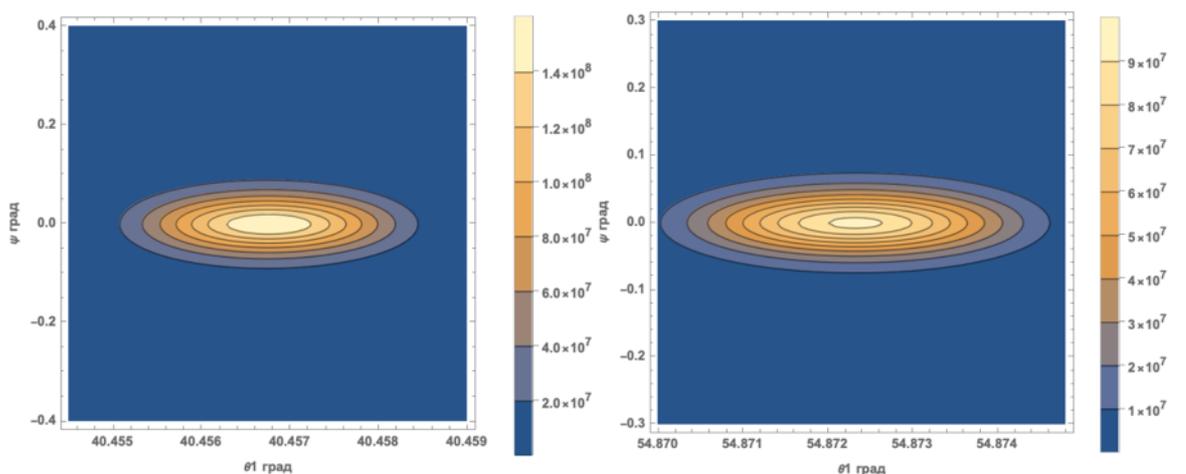


Рисунок 88 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 450$  мкм с параметрами (№1)

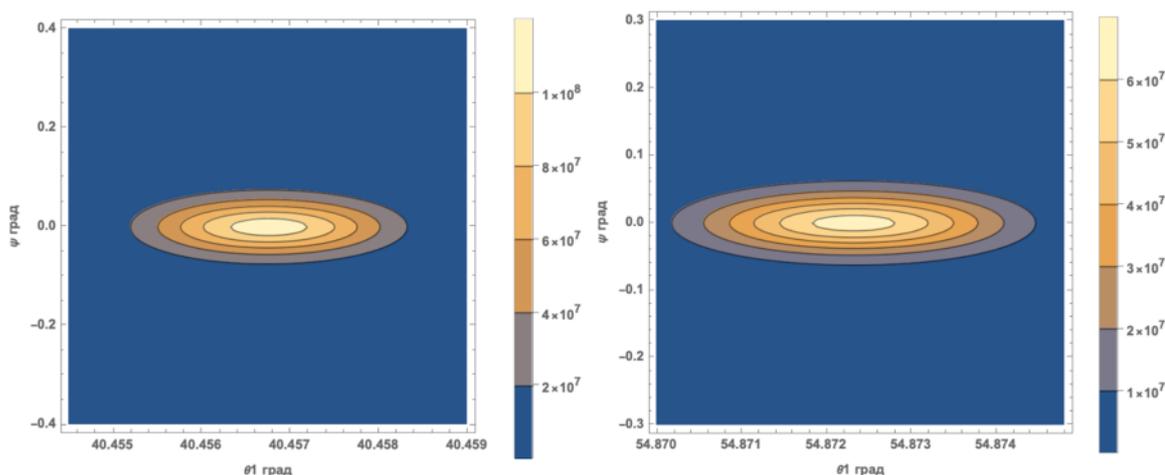


Рисунок 89 – Контурный график для перпендикулярной компоненты углового распределения ИВЧ для  $\lambda = 0.7$  мкм,  $b = 500$  мкм с параметрами (№1)

Как можно видеть для представленных распределений при сравнении контурных графиков в геометрии №1 и №2, в распределениях присутствует направленность, связанная с геометрией мишени (углом раствора призмы), которая явно заметно до прицельных параметров  $\approx 200$  мкм, в дальнейшем можно подробнее исследовать данную зависимость при различных длинах волн и прицельных, чтобы определить характер анизотропии распределения без привязки к конкретным параметрам. В остальном же результаты моделирования ожидаемы и следующим большим шагом будет определение и непосредственное сравнение их с будущим экспериментом, для понимания каким образом работать с таким типом геометрии.

## **Заключение**

В данной работе проведено исследование дифракционного излучения Вавилова-Черенкова (ДИВЧ), генерируемого заряженной частицей движущейся равномерно вблизи диэлектрической призмы конечных размеров. Был рассмотрен процесс генерации поляризационного излучения в общем, и на примере других видов поляризационного излучения. Рассмотрены некоторые особенности генерации ДИВЧ, на примере генерации при пролете вблизи диэлектрической призмы.

Рассмотрим кратко результаты данного исследования:

Показано, что используемое в данной работе выражение, полученное на основании теории поляризационных токов, для спектрально-углового распределения интенсивности ДИВЧ имеет ряд ограничений, возникших как при использовании допущений, так и геометрических. Также обнаружено ограничение, связанное с точностью промежуточных расчетов на современных компьютерах, возникшее из-за осциллирующего характера зависимости.

Проведено сравнение спектральной зависимости ДИВЧ для разных параметров прицельного параметра, результаты хорошо согласуются.

Получены компоненты спектрально-углового распределения ДИВЧ и ДИ, проведено сравнение с уже полученным выражением для полной интенсивности ДИВЧ и ДИ, результаты моделирования полностью совпадают.

По результатам эксперимента, выполненного на микротроне ТПУ, проведено сравнение экспериментальных данных интенсивностей ДИВЧ при параллельном и наклонном пролете электронов вблизи диэлектрической призмы с представленной моделью и с теоретическими результатами, полученными в упомянутой работе. Расположение максимумов ДИВЧ в эксперименте отличаются как от теоретических данных, полученных в этой работе, так и полученных в упомянутой работе. Теоретические данные хорошо согласуются между собой.

В экспериментах на микротроне ТПУ и на ускорителе КЕК заряженная частица пролетает параллельно большему катету, в данной модели это не так, частица пролетает вблизи гипотенузы, что влечет за собой трудности с непосредственным моделированием данных экспериментов. В работе было показано, что генерация ДИВЧ зависит от стороны диэлектрической призмы, вблизи которой пролетает частица и от угла раствора, в отличие от ДИ, на которое влияют «дальние» стороны. Это свойство и угол раствора  $\varphi = 45^\circ$  в эксперименте на микротроне ТПУ позволили использовать «удвоенную» призму для того, чтобы геометрии стали идентичными. Были получены хорошо согласующиеся результаты что говорит о правильности данного вывода.

При рассмотрении эксперимента на ускорителе КЕК, можно сказать что его геометрия не позволяет сделать аналогичную замену и быть полностью уверенным в достоверности результатов, поэтому были использованы две геометрии мишени, с начальными параметрами, подобранными в соответствии с используемым методом.

Были проведены множественные моделирования контурных графиков распределения ДИВЧ для эксперимента КЕК, для нескольких длин волн и прицельных параметрах при использовании, обсуждаемых ранее геометрий, которые будет возможность сравнить с экспериментов после его окончания.

### **3 Социальная ответственность**

В современных условиях одним из основных направлений коренного улучшения всей профилактической работы по снижению производственного травматизма и профессиональной заболеваемости является повсеместное внедрение комплексной системы управления охраной труда, то есть путем объединения разрозненных мероприятий в единую систему целенаправленных действий на всех уровнях и стадиях производственного процесса.

Профилактическая работа основывается на непрерывном и эффективном контроле и оценке действий по улучшению, совершенствованию и развитию системы управления охраной труда.

Охрана труда – это система законодательных актов, социально-экономических, организационных, технических, гигиенических и лечебно-профилактических мероприятий и средств, обеспечивающих безопасность, сохранение здоровья и работоспособности человека во время труда.

### **3.1 Правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности**

#### **3.1.1 Правовые нормы трудового кодекса**

Весь персонал обязан знать и строго соблюдать правила техники безопасности. Обучение персонала технике безопасности и производственной санитарии состоит из вводного инструктажа и инструктажа на рабочем месте ответственным лицом.

Проверка знаний правил техники безопасности проводится квалификационной комиссией после обучения на рабочем месте. Проверяемому, присваивается соответствующая его знаниям и опыту работы квалификационная группа по технике безопасности и выдается специальная удостоверение.

Лица, обслуживающие электроустановки не должны иметь отклонений и болезней, мешающих производственной работе. Состояние здоровья устанавливается медицинским освидетельствованием.

#### **3.1.2 Организация рабочего места исследователя**

Основным местом работы является рабочий стол с персональным компьютером, для того чтобы максимизировать эффективность работы и минимизировать вредные и опасные факторы воздействия следует учитывать особенности вида труда, такие как планировка рабочего места труда.

Рациональная планировка рабочего места предусматривает четкий порядок и постоянство размещения предметов, средств труда и документации. То, что требуется для выполнения работ чаще, должно располагаться в зоне легкой досягаемости рабочего пространства. Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости изображены на рисунке 90.

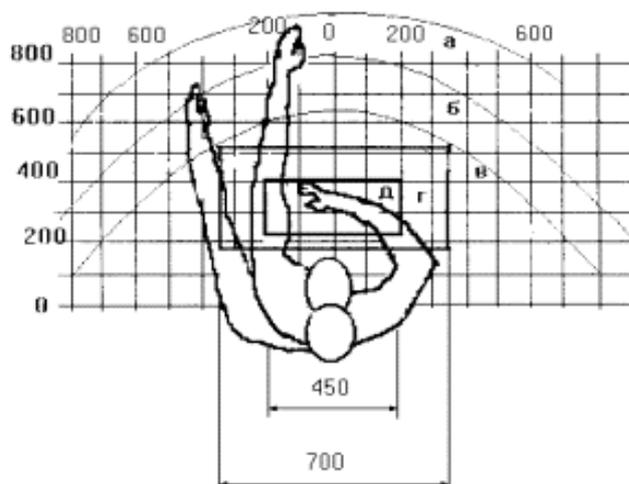


Рисунок 90 – Зоны досягаемости рук в горизонтальной плоскости, где а – зона максимальной досягаемости рук, б – зона досягаемости пальцев при вытянутой руке, в – зона легкой досягаемости, г – оптимальная зона для грубой ручной работы, д – оптимальная зона для тонкой ручной работы

При проектировании письменного стола должны быть учтены следующие требования [22]:

- высота рабочей поверхности стола рекомендуется в пределах 680-800 мм;
- высота рабочей поверхности, на которую устанавливается клавиатура, должна быть 650 мм;
- рабочий стол должен быть шириной не менее 700 мм и длиной не менее 1400 мм;
- должно иметься 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.

На рисунке 91 показана примерная схема организации рабочего места.

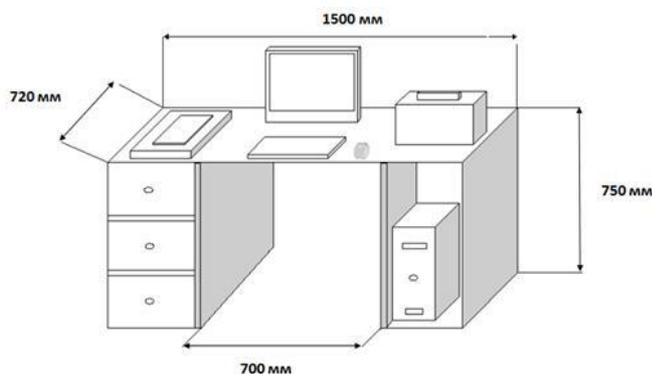


Рисунок 91 – Схема организации рабочего места

Рабочее кресло должно быть подъёмно-поворотным и регулируемым по высоте и углам наклона сиденья и спинки, а также расстоянию спинки до переднего края сиденья. Рекомендуется высота сиденья над уровнем пола 420-550 мм. Конструкция рабочего кресла должна обеспечивать: ширину и глубину поверхности сиденья не менее 400 мм; поверхность сиденья с заглаблённым передним краем [22].

Монитор должен быть расположен на уровне глаз оператора на расстоянии 500-600 мм. Согласно нормам, угол наблюдения в горизонтальной плоскости должен быть не более 45° к нормали экрана. Лучше если угол обзора будет составлять 30°. Кроме того, должна быть возможность выбирать уровень контрастности и яркости изображения на экране [22].

Должна предусматриваться возможность регулирования экрана [22]:

- по высоте +3 см;
- по наклону от 10 до 20 градусов относительно вертикали;
- в левом и правом направлениях.

Клавиатуру следует располагать на поверхности стола на расстоянии 100-300 мм от края. Нормальным положением клавиатуры является её размещение на уровне локтя оператора с углом наклона к горизонтальной плоскости 15°. Более удобно работать с клавишами, имеющими вогнутую поверхность, четырёхугольную форму с закруглёнными углами.

Конструкция клавиши должна обеспечивать оператору ощущение щелчка. Цвет клавиш должен контрастировать с цветом панели [22].

## 3.2 Производственная безопасность

### 3.2.1 Анализ опасных и вредных производственных факторов

Полностью безопасных и безвредных производств не существует. Задача охраны труда — свести к минимуму вероятность поражения или заболевания работающего с одновременным обеспечением комфорта при максимальной производительности труда. Реальные производственные условия характеризуются, как правило, наличием некоторых опасных и вредных производственных факторов.

Опасным производственным фактором согласно [23] называется такой производственный фактор, воздействие которого в определенных условиях приводит к травме или другому внезапному, резкому ухудшению здоровья.

Вредным производственным фактором называется такой фактор, воздействие которого на работающего в определенных условиях приводит к заболеванию или снижению трудоспособности.

Таблица 3 – Основные элементы производственного процесса, формирующие опасные и вредные факторы

Этапы выполнения работы	Факторы ГОСТ 12.0.003-2015 ССБТ		Нормативные документы
	Вредные	Опасные	
Работа с компьютером	Электромагнитное излучение	-	СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы. «Гигиенические требования к ПЭВМ и организация работы» (с изменениями на 21.06.2016) ППБ 01-03. Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
	-	Электрический ток	ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность
	-	Пожарная опасность	ППБ 01-03. Правила противопожарного режима в Российской Федерации. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования

Производственные условия на рабочем месте характеризуются наличием опасных и вредных факторов, которые классифицируются по группам элементов: физические, химические, биологические, психофизиологические.

Работа выполнялась с использованием современной вычислительной техники, что позволило достичь высокой эффективности процесса и уменьшения временных затрат на его проведение.

На студента, который работает на компьютере, воздействуют следующие факторы

- физические: температура и влажность воздуха, шум, статическое электричество, электромагнитное поле низкой частоты, освещённость, психофизиологические.
- психофизиологические опасные и вредные производственные факторы: физические перегрузки (статические, динамические) и нервно-психические перегрузки (умственное перенапряжение, монотонность труда, эмоциональные перегрузки).

### **3.2.2 Обоснование мероприятий по защите исследователя от действия вредных факторов**

Основные параметры, характеризующие условия труда – это микроклимат, шум, вибрация, электромагнитное поле, излучение, освещённость.

Микроклимат – комплекс физических факторов внутренней среды помещений, оказывающий влияние на тепловой обмен организма и здоровье человека.

Воздух рабочей зоны (микроклимат) производственных помещений определяют следующие параметры: температура, относительная влажность, скорость движения воздуха. Оптимальные и допустимые значения характеристик микроклимата и приведены в таблицах 4 и 5.

Таблица 4 – Оптимальные параметры микроклимата

Период года	Температура, °С	Относительная влажность, %	Скорость движений воздуха, м/с
Холодный	22-24	40-60	0,1
Тёплый	23-25	40-60	0,1

Таблица 5 – Допустимые параметры микроклимата

Период года	Температура, °С		Относительная Влажность, %	Скорость движения воздуха, м/с	
	Диапазон ниже допустимого	Диапазон выше допустимого		Для диапазона ниже допустимого	Для диапазона выше допустимого
Холодный	20,0-21,9	24,1-25,0	15-75	0,1	0,1
Тёплый	21,0-22,9	25,1-28,0	15-75	0,1	0,2

Температура – степень нагретости воздуха в рабочем помещении. По закону при восьмичасовом рабочем дне температура воздуха в офисном помещении должна составлять 23-25°С в теплое время года и 22-24°С в холодное (при относительной влажности 40-60%). Отклонение от нормы разрешено лишь на 1-2°С. Допустимое колебание температуры во время рабочего дня – не больше 3- 4°С [24].

К мероприятиям по оздоровлению воздушной среды в производственном помещении относятся: правильная организация вентиляции и кондиционирования воздуха, отопление помещений. Вентиляция может осуществляться естественным и механическим путём. При объеме помещения до 20 м<sup>3</sup> в него должно подаваться, не менее 30 м<sup>3</sup>/ч наружного воздуха на одного человека. В случае объема помещения более 40 м<sup>3</sup> на одного человека допускается естественная циркуляции, но с учетом отсутствия выделения вредных веществ.

В лаборатории осуществляется естественная вентиляция. Воздух поступает и удаляется через щели, окна, двери. Основной недостаток такой вентиляции в том, что подача приточного воздуха идет в помещения без предварительной очистки и подогрева.

Шум и вибрация ухудшают условия труда, оказывают вредное воздействие на организм человека, а именно, на органы слуха и на весь организм через центральную нервную систему. В результате этого

ослабляется внимание, ухудшается память, снижается реакция, увеличивается число ошибок при работе. Шум может создаваться работающим оборудованием, установками кондиционирования воздуха, осветительными приборами дневного света, а также проникать извне.

В работе [24] приведены следующие значения уровня шума в помещениях офисов, проектных и научно-исследовательских организаций:

- допустимый уровень – 45 дБ;
- максимальный уровень – 60 дБ;
- оптимальный уровень – 50 дБ.

При выполнении работы на ЭВМ уровень шума в рабочем помещении не должен превышать 50 дБ.

Экран и системные блоки производят электромагнитное излучение. Основная его часть происходит от системного блока и видеокабеля. Согласно [22] напряженность электромагнитного поля на расстоянии 50 см вокруг экрана по электрической составляющей должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 25 В/м;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 2,5 В/м.

Плотность магнитного потока должна быть не более:

- в диапазоне частот 5 Гц-2 кГц – 250 нТл;
- в диапазоне частот 2 кГц-400 кГц – 25 нТл.

Существуют следующие способы защиты от ЭМП:

- увеличение расстояния от источника (экран должен находиться на расстоянии не менее 50 см от пользователя);
- применение приэкранных фильтров, специальных экранов и других;
- средств индивидуальной защиты.

Утомляемость органов зрения может быть связана как с недостаточной освещенностью, так и с чрезмерной освещенностью, а также с неправильным направлением света. В производственном помещении применяется общее равномерное освещение с помощью люминесцентных

ламп. Согласно требованиям [24] освещенность рабочих поверхностей должна быть не менее 200 лк.

### **3.2.3 Психофизиологические факторы**

По характеру действия психофизиологические факторы подразделяются на физические и нервно-психические перегрузки человека. Физические перегрузки, связаны с тяжестью трудового процесса, подразделяются на статические и динамические, а нервно-психические, связанные с напряженностью трудового процесса, подразделяется на умственное перенапряжение, перенапряжение анализаторов, монотонность труда, эмоциональные перегрузки.

Рассмотрим подробнее нервно-психические перегрузки, так как они являются основным фактором при выполнении данной работы. Нервно-психические перегрузки подразделяют на:

- умственное перенапряжение, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- перенапряжение анализаторов, в том числе вызванное информационной нагрузкой;
- монотонность труда, проводящая у монотонии;
- эмоциональные перегрузки.

Нервно-психические перегрузки организма работающего, связанные с напряженностью трудового процесса, в целях оценки условий труда, разработки и принятия мероприятий по их улучшению характеризуются такими показателями, как:

- длительность сосредоточенного наблюдения;
- активное наблюдение за ходом производственного процесса;
- число производственных объектов одновременного наблюдения;
- плотность сигналов (световых, звуковых) и сообщений в единицу времени;
- нагрузка на слуховой анализатор;

- нагрузка на голосовой аппарат;
- работа с оптическими приборами.

Все гигиенические нормативы обоснованы с учетом 8-часовой рабочей смены. При большей длительности смены, но не более 40 часов в неделю, в каждом конкретном случае возможность работы должна быть согласована с территориальным управлением Роспотребнадзора с учетом показателей здоровья работников (по данным периодических медосмотров и др.), наличия жалоб на условия труда и обязательного соблюдения гигиенических нормативов [31].

Следует отметить, что превышение гигиенических нормативов в процессе труда работников приводит к увеличению несчастных случаев на производстве, профессиональных заболеваний, производственно-обусловленных заболеваний, утрате работоспособности и профессиональной трудоспособности значительного количества работающих.

Снижение уровня работоспособности, потери времени из-за заболеваемости и травматизма, увеличение затрат времени на отдых, рост брака и снижение качества продукции, появление избыточной текучести кадров, обусловленной неудовлетворительным состоянием условий труда, вот далеко неполный перечень последствий неблагоприятной производственной среды, ведущих к снижению эффективности деятельности.

### **3.2.4 Электробезопасность**

Электробезопасность – система организационных и технических мероприятий и средств, обеспечивающих защиту людей от вредного и опасного воздействия электрического тока, электрической дуги, электромагнитного поля и статического электричества.

Влияние электрического тока на организм человека носит разносторонний характер, и может привести как к легкому, так и к тяжелому исходу.

Электрический ток, проходя через тело человека, оказывает тепловое, химическое и биологическое воздействие. Тепловое (термическое) действие проявляется в виде ожогов участка кожи, перегрева различных органов, а также возникающих в результате перегрева разрывов кровеносных сосудов и нервных волокон.

Химическое (электролитическое) действие ведет к электролизу крови и других содержащихся в организме человека растворов, что приводит к изменению их физико-химических составов, а значит, и к нарушению нормального функционирования организма.

Биологическое действие проявляется в опасном возбуждении живых клеток и тканей организма, в результате чего они могут погибнуть.

Действие тока может привести к электрической травме.

Таким образом, действие тока на организм человека может быть местным и общим. Общее (рефлекторное) поражение – электрический удар, представляет для человека наибольшую опасность: нарушается работа центральной нервной и сердечно-сосудистой систем, что приводит к фибрилляции и параличу сердца, а также к остановке дыхания.

Степень опасности и исход поражения электрическим током зависят от ряда причин. Основными из них являются: величина тока, проходящего через организм; путь прохождения тока; продолжительность действия тока; частота тока и сопротивление человека в момент соприкосновения с токоведущими частями, которые, в свою очередь, зависят от состояния окружающей среды (температура, влажность воздуха и т.д.).

Безопасной для человека является величина переменного тока – 10мА, постоянного – 50 мА, безопасное напряжение 12 В.

Оператор ЭВМ работает с электроприборами: компьютером (дисплей, системный блок и т.д.) и периферийными устройствами.

Существует опасность электропоражения в следующих случаях:

- при непосредственном прикосновении к токоведущим частям во время ремонта;

- при прикосновении к нетоковедущим частям, оказавшимся под напряжением (в случае нарушения изоляции токоведущих частей);
- при прикосновении с полом, стенами, оказавшимися под напряжением;
- при коротком замыкании в высоковольтных блоках: блоке питания и блоке дисплейной развёртки.

Степень опасного и вредного воздействия на человека электрического тока зависит от:

- параметров электрического тока, протекающего через тело человека (величины напряжения, частоты, природы тока, приложенного к телу);
- пути тока через тело человека (рука-рука, рука-нога, нога-нога, шея-ноги и др.);
- продолжительность воздействия тока через тело человека;
- условий внешней среды (влажности и температуры);
- состояния организма человека (толщины и влажности кожного покрова, состояния здоровья и возраста).

Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов установлены для путей тока от одной руки к другой и от руки к ногам.

Напряжения прикосновения и токи, протекающие через тело человека при нормальном (неаварийном) режиме электроустановки, не должны превышать значений, указанных в таблице 6.

Таблица 6 – Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов.

Род тока	U, В	I, mA
	Не более	
Переменный, 50 Гц	2,0	0,3
Переменный, 400 Гц	3,0	0,4
Постоянный	8,0	1,0

Для контроля предельно допустимых значений напряжений прикосновения и токов измеряют напряжения и токи в местах, где может произойти замыкание электрической цепи через тело человека [25].

Мероприятия по обеспечению электробезопасности электроустановок:

- отключение напряжения с токоведущих частей, на которых или вблизи которых будет проводиться работа, и принятие мер по обеспечению невозможности подачи напряжения к месту работы;
- вывешивание плакатов, указывающих место работы;
- заземление корпусов всех установок через нулевой провод;
- покрытие металлических поверхностей инструментов надежной изоляцией;
- недоступность токоведущих частей аппаратуры (заключение в корпуса электропоражающих элементов, заключение в корпус токоведущих частей);
- применение средств защиты.

К средствам индивидуальной защиты от поражения электрическим током относятся:

- оградительные устройства, которые могут быть стационарными и переносимыми. Ограждения могут быть сблокированы с устройствами, отключающими рабочее напряжение при снятии;
- изолирующие устройства и покрытия;
- устройства защитного заземления, зануления и защитного отключения;
- устройства дистанционного управления;
- предохранительные устройства и др.

Помещение, в котором проводится работа, относится к группе помещений без повышенной опасности: сухое (влажность воздуха не превышает 75%), не жаркое (температура не превышает 28°C), с токонепроводящими полами, без токопроводящей пыли и химически активной среды. Все провода, подводящие напряжение к электрооборудованию, электроизолированы и находятся в заземленной металлической оплетке. Рубильник распределительного щитка имеет пластмассовый кожух. Также имеются отключающие автоматы. Выполнен контур защитного заземления из стальной полосы сечением 30 мм<sup>2</sup> по

периметру помещения. Все электрические приборы в лаборатории заземлены.

Для предотвращения появления статического электричества и защиты от его влияния в помещении необходимо использовать нейтрализаторы и увлажнители, а полы должны иметь антистатическое покрытие. Конструкция пола в помещении обеспечивает сток и отвод статического электричества. Покрытие пола выполнено из гладких, прочных, обладающих антистатическими свойствами материалов.

### **3.3 Экологическая безопасность**

При проведении исследовательской работы на всех ее этапах использовался персональный компьютер. В виду того, что персональный компьютер является высокотехнологичным продуктом и содержит в себе редкоземельные материалы, которая требует особого отношения в процессе утилизации. Вторичная переработка считается экологически чистой, поскольку она предотвращает попадание в атмосферу опасных отходов, в том числе тяжелых металлов и канцерогенов, на свалку или водные пути. В то время как электроника составляет небольшую часть от общего количества отходов, они гораздо более опасны.

Согласно [31] отработавшее электротехническое и электронное оборудование разделяют на две основные категории

- отработавшее электротехническое и электронное оборудование, которое может быть повторно использовано;
- отработавшее электротехническое и электронное оборудование, которое может быть переработано для целей получения вторичных материальных и энергетических ресурсов.

Приоритетом разборки является обеспечение возможности повторного использования отработавшего электротехнического и электронного оборудования (ОЭЭО) для первоначальных и иных целей после дополнительной обработки [31].

При отсутствии возможности повторного использования ОЭЭО подлежит другим способам утилизации, при этом сжигание должно рассматриваться как наименее предпочтительный вариант утилизации.

Разборку ОЭЭО рекомендуется проводить в условиях, предотвращающих негативное воздействие на окружающую среду (например, проведение разборки на специально подготовленных крытых площадках или в теплых помещениях, обладающих изолирующим покрытием) [31].

В процессе переработки телевизоры, мониторы, мобильные телефоны и компьютеры обычно тестируются на повторное использование и ремонтируются. В случае поломки они могут быть разобраны на детали, которые все еще имеют высокую стоимость, если рабочая сила достаточно дешевая. Другие электронные отходы измельчаются и проверяются вручную для отделения токсичных батарей и конденсаторов, содержащих ядовитые металлы. Оставшиеся кусочки дополнительно измельчают и пропускают под магнитом для удаления черных металлов. Вихревые токи выбрасывают цветные металлы, которые сортируются по плотности с помощью центрифуги или виброплиты. Драгоценные металлы можно растворить в кислоте, отсортировать и выплавить в слитки. Остальные стеклянные и пластиковые фракции разделяются по плотности и продаются на станции переработки. Телевизоры и мониторы должны быть разобраны вручную для удаления либо токсичного свинца в ЭЛТ, либо ртути на плоских экранах.

### **3.4 Безопасность в чрезвычайных ситуациях**

Чрезвычайная ситуация – совокупность условий и обстоятельств, создающих опасную для жизнедеятельности человека обстановку на конкретном объекте, территории (акватории), возникших в результате совершившейся аварии или катастрофы, опасного природного явления. Наиболее распространенным типом чрезвычайной ситуации является

возникновения пожароопасной ситуации вследствие короткого замыкания или неосторожного обращения с огнем.

Согласно [30], в зависимости от характеристики используемых в производстве веществ и их количества, по пожарной и взрывной опасности помещения подразделяются на категории А, Б, В, Г, Д. Помещение по степени пожаровзрывоопасности относится к категории В, так как содержит твердые сгорающие вещества.

Возможные причины загорания:

- работа с открытой электроаппаратурой;
- неисправность токоведущих частей установок;
- короткие замыкания в блоке питания;
- несоблюдение правил пожарной безопасности;
- наличие горючих компонентов: документы, двери, столы, изоляция кабелей и т.п.

Мероприятия по пожарной профилактике разделяются 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.

К режимным мероприятиям относятся, установление правил организации работ, и соблюдение противопожарных мер. Для предупреждения возникновения пожара от коротких замыканий, перегрузок и т. д. необходимо соблюдение следующих правил пожарной безопасности [30]:

- исключение образования горючей среды (герметизация оборудования, контроль воздушной среды, рабочая и аварийная вентиляция);
- применение при строительстве и отделке зданий негорюемых или трудно сгораемых материалов;
- правильная эксплуатация оборудования (правильное включение оборудования в сеть электрического питания, контроль нагрева оборудования);
- правильное содержание зданий и территорий (исключение образования источника воспламенения - предупреждение самовозгорания веществ, ограничение огневых работ);
- обучение производственного персонала правилам противопожарной безопасности;
- издание инструкций, плакатов, наличие плана эвакуации;
- соблюдение противопожарных правил, норм при проектировании зданий, при устройстве электропроводов и оборудования, отопления, вентиляции, освещения;
- правильное размещение оборудования;
- своевременный профилактический осмотр, ремонт и испытание оборудования.

В помещении с электрооборудованием, во избежание поражения электрическим током, целесообразно использовать углекислотные или порошковые огнетушители. Данные огнетушители предназначены для тушения загораний различных веществ и материалов, электроустановок под напряжением до 1000 В, горючих жидкостей. Химические и пенные огнетушители не допустимы.

Огнетушители следует располагать на защищаемом объекте в соответствии с требованиями [30] таким образом, чтобы они были защищены от воздействия прямых солнечных лучей, тепловых потоков, механических воздействий и других неблагоприятных факторов (вибрация, агрессивная среда, повышенная влажность и т. д.). Они должны быть хорошо видны и

легкодоступны в случае пожара. Предпочтительно размещать огнетушители вблизи мест наиболее вероятного возникновения пожара, вдоль путей прохода, а также около выхода из помещения. Огнетушители не должны препятствовать эвакуации людей во время пожара.

Согласно требованиям пожарной безопасности, на этаже находится 2 огнетушителя ОП-3 – огнетушители переносные порошковые, лестничные пролеты оборудованы гидрантами, имеется кнопка пожарной сигнализации.

При возникновении пожара необходимо:

- сообщить руководству (дежурному);
- позвонить в пожарно-спасательную службу или МЧС;
- принять меры по ликвидации аварии в соответствии с инструкцией.

## **Выводы**

При подготовке данного раздела были рассмотрены основные правовые и организационные вопросы обеспечения безопасности, даны рекомендации по организации правильного места проведения работ при использовании персонального компьютера.

Важным моментом в рассмотренной работе является минимизации вероятностей получения травм или заболевания работающего в процессе выполнения трудовых обязанностей и максимизация эффективности труда, все это относится к производственной безопасности. Был проведен анализ опасных и вредных производственных факторов, приведено обоснование мероприятий по защите рабочего от действия вредных факторов, проанализировано влияние психофизиологических факторов на выполнение работ, также рассмотрены основные требования электробезопасности при работе с оборудованием.

Используя оборудование для выполнения работ, происходит его неизбежное устаревание. В соответствующем разделе был кратко рассмотрен процесс обращения с устаревшим\неисправным оборудованием.

Рассмотренный материал позволяет минимизировать опасные и вредные факторы при проведении работ и максимизировать эффективность выполнения данной квалификационной работы.

#### **4 Финансовый менеджмент, ресурсоэффективность и ресурсосбережение**

##### **Введение**

В настоящее время перспективность научного исследования определяется не столько масштабом открытия, оценить которое на первых этапах жизненного цикла высокотехнологического и ресурсоэффективного продукта бывает достаточно трудно, сколько коммерческой ценностью разработки. Оценка коммерческой ценности (потенциала) разработки является необходимым условием при поиске источников финансирования для проведения научного исследования и коммерциализации его результатов. Это важно для разработчиков, которые должны представлять состояние и перспективы проводимых научных исследований.

Целью данного раздела является определение перспективности и успешности научно-исследовательского проекта; разработка механизма управления и сопровождения конкретных проектных решений на этапе реализации; оценка коммерческого потенциала разработки; планирование научно-исследовательской работы; расчет бюджета научно-исследовательской работы, определение ресурсной, финансовой, бюджетной эффективности исследования.

Целью данной ВКР является исследование возможности внедрения существенно нового метода невозмущающей диагностики мишеней на основе дифракционного излучения Вавилова-Черенкова. Исследование проводилось на основе теоретического моделирования процесса генерации излучения при сравнении с проведенными экспериментами и последующей подготовке к будущим экспериментам.

## **4.1 Оценка коммерческого потенциала и перспективности проведения исследований с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения**

### **4.1.1 Потенциальные потребители результатов исследования**

Результатом исследования являются полученные данные о свойствах мишени, таких как угол раствора призмы, диэлектрическая проницаемость мишени, ориентация относительно плоскости мишени вдоль которого пролетают частицы.

Сегментировать рынок услуг можно по следующим критериям: невозмущающий контроль, исследовательская работа.

Таблица 7 – Карта сегментирования рынка услуг

		Организации	
		Промышленность	Исследовательские центры
Область применения	Невозмущающий контроль		
	Исследовательские работы		

Из карты сегментирования услуг видно, что целевым рынком данного исследования будут исследовательские центры направленные

### **4.1.2 Анализ конкурентных технических решений**

Был проведен анализ конкурентных разработок, применяемых и существующих на данный момент. Детальный анализ необходимо проводить систематические из-за динамического характера рынка. Такой анализ помогает вносить коррективы в научное исследование, чтобы обладать большей конкурентоспособностью. Так же необходимо оценить сильные и слабые стороны разработок конкурентов.

Для этой цели может быть использована вся имеющаяся информация о конкурентных разработках:

- технические характеристики разработки;
- конкурентоспособность разработки;

- уровень завершенности научного исследования (наличие макета, прототипа и т.п.);
- бюджет разработки;
- уровень проникновения на рынок;
- финансовое положение конкурентов, тенденции его изменения и т.д.

Анализ конкурентных технических решений с позиции ресурсоэффективности и ресурсосбережения позволяет провести оценку сравнительной эффективности научной разработки и определить направления для ее будущего повышения.

Целесообразно проводить данный анализ с помощью оценочной карты, приведенной в таблице 4. В этой таблице сравнивается техническая ресурсоэффективность и экономическая эффективность разработки метода диагностики электронных пучков с помощью когерентного переходного излучения с другими конкурентными методами:

Бф – Диагностика мишеней с помощью ДИВЧ;

Бк1 – Диагностика мишеней с помощью резонансного дифракционного излучения;

Бк2 – Диагностика мишеней с помощью переходного излучения;

Бк3 – Диагностика мишеней с разрушающими методами;

Таблица 8 – Оценочная карта для сравнения конкурентных технических решений (разработок)

Критерии оценки	Вес критерия	Баллы (маж 5)				Конкурентоспособность			
		Б <sub>ф</sub>	Б <sub>к1</sub>	Б <sub>к2</sub>	Б <sub>к3</sub>	К <sub>ф</sub>	К <sub>к1</sub>	К <sub>к2</sub>	К <sub>к3</sub>
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Технические критерии оценки ресурсоэффективности									
1. Информативность применяемой методики	0,15	4	4	3	5	0,60	0,60	0,45	0,75
2. Точность полученных данных	0,15	3	5	4	5	0,45	0,75	0,60	0,75
3. Влияние пучка на объект	0,10	5	3	4	1	0,50	0,30	0,40	0,10
4. Требования к регистрирующим устройствам	0,15	4	3	3	2	0,60	0,45	0,45	0,30
5. Возможность непрерывной обработки данных	0,10	5	3	4	1	0,50	0,30	0,40	0,10
6. Длительность измерений	0,20	5	3	2	3	1,0	0,60	0,40	0,60
7. Стоимость внедрения	0,15	3	2	2	5	0,45	0,30	0,30	0,75
Итого:	1	29	25	22	22	4,05	3,30	3,00	3,35

Из таблицы видно, что методы диагностики разрушающим контролем и рентгеновским излучением наиболее близки по своей конкурентоспособности к развивающемуся на данный момент методу диагностики с помощью дифракционного излучения Вавилова-Черенкова, но для получения рентгеновского излучения необходимо использование ондуляторов или поворотных магнитов, установка которых часто невозможна по техническим причинам. Так же часто используется разрушающие методы контроля, такой метод контроля один из наиболее точных, но этот метод не применим для некоторых уникальных объектов, в процессе которых он будет разрушен, так как изготовить образец повторно иногда невозможно, либо обойдется крайне дорого.

#### 4.1.3 SWOT-анализ

SWOT – Strengths (сильные стороны), Weaknesses (слабые стороны), Opportunities (возможности) и Threats (угрозы) – представляет собой

комплексный анализ научно-исследовательского проекта. SWOT-анализ применяют для исследования внешней и внутренней среды проекта.

Сильные стороны – это факторы, характеризующие конкурентоспособную сторону научно-исследовательского проекта. Сильные стороны свидетельствуют о том, что у проекта есть отличительное преимущество или особые ресурсы, являющиеся особенными с точки зрения конкуренции. Другими словами, сильные стороны – это ресурсы или возможности, которыми располагает руководство проекта и которые могут быть эффективно использованы для достижения поставленных целей.

Слабые стороны – это недостаток, упущение или ограниченность научно-исследовательского проекта, которые препятствуют достижению его целей. Это то, что плохо получается в рамках проекта или где он располагает недостаточными возможностями или ресурсами по сравнению с конкурентами.

Возможности включают в себя любую предпочтительную ситуацию в настоящем или будущем, возникающую в условиях окружающей среды проекта, например, тенденцию, изменение или предполагаемую потребность, которая поддерживает спрос на результаты проекта и позволяет руководству проекта улучшить свою конкурентную позицию.

Угроза представляет собой любую нежелательную ситуацию, тенденцию или изменение в условиях окружающей среды проекта, которые имеют разрушительный или угрожающий характер для его конкурентоспособности в настоящем или будущем. В качестве угрозы может выступать барьер, ограничение или что-либо еще, что может повлечь за собой проблемы, разрушения, вред или ущерб, наносимый проекту.

SWOT-анализ данного научно-исследовательского проекта представлен в таблице 9.

Таблица 9 – SWOT-анализ

	<p><b>Сильные стороны:</b>  С1: Хорошее соответствие эксперимента с теоретическими результатами</p> <p>С2: Невысокая стоимость реализации</p> <p>С3: Простота вычислений</p>	<p><b>Слабые стороны:</b>  СЛ1: Исследование возможностей только производится</p> <p>СЛ2: Влияние погрешности на результаты измерения</p>
<p><b>Возможности:</b>  В1: Расширение границ использования данного метода</p> <p>В2: Диагностика размеров и ориентации пучка</p>	<p>Улучшение метода измерения для уменьшения влияния погрешности.  Проведение экспериментов для проверки возможностей метода</p>	<p>Модернизация схемы измерений, дополнительная проработка экспериментов для определения потенциала</p>
<p><b>Угрозы:</b>  У1: Появление новых методов диагностики</p> <p>У2: Отсутствие финансирования</p>	<p>Написание и публикация статей о полученных результатах.  Усовершенствования данного метода.</p>	<p>Получение финансирования от заинтересованных сторон.</p>

## 4.2 Планирование научно-исследовательских работ

### 4.2.1 Структура работ в рамках научного исследования

Научно-исследовательские работы и опытно-конструкторские разработки разбиваются на этапы в соответствии с ГОСТ 15.101-98, (для НИР) ГОСТ Р 15.201-2000 (для ОКР). В зависимости от характера и сложности НИОКР ГОСТ допускает разделение этапов на отдельные виды работ.

Для выполнения научных исследований формируется рабочая группа, в состав которой могут входить научные сотрудники и преподаватели, инженеры, техники и лаборанты, численность групп может варьироваться от 3 до 15 человек. В рамках данной работы была сформирована рабочая группа, в состав которой вошли:

- руководитель;
- инженер.

В данном разделе составлен перечень этапов и работ по выполнению НИР, проведено распределение исполнителей по видам работ. Порядок этапов и работ при выполнении НИР приведен в таблице 10.

Таблица 10 – Перечень этапов, работ и распределение исполнителей

Основные этапы	№ Работ	Содержание работы	Исполнитель
Разработка технического задания на НИР	1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель
Выбор направления исследования	2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер
	3	Выбор направления исследования	Руководитель
	4	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель
	5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель
Теоретические исследования	6	Изучение документации, поиск литературы	Инженер
	7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	Инженер
Проведение расчетов	8	Получение необходимых данных	Инженер
	9	Создание графических зависимостей	Инженер
	10	Анализ и описание результатов	Инженер
Оформление отчета по НИР	11	Проверка полученных результатов	Руководитель
	12	Составление пояснительной записки	Инженер

#### 4.2.2 Определение трудоемкости выполнения работ и разработка графика проведения

Следующим этапом является определение трудоемкости выполнения научного исследования. Трудоемкость выполнения работ оценивается экспертным путем в человеко-днях и носит вероятностный характер, т.к. зависит от множества трудно учитываемых факторов. Для определения, ожидаемого (среднего) значения трудоемкости работ используется следующая формула:

$$t_{ожi} = \frac{3 t_{min i} + 2 t_{max i}}{5}$$

где  $t_{ожi}$  - ожидаемая трудоемкость выполнения  $i$ -ой работы, (чел.-дн.);  $t_{min i}$  - минимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (оптимистическая оценка: в предположении наиболее благоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.);  $t_{max i}$  - максимально возможная трудоемкость выполнения заданной  $i$ -ой работы (пессимистическая оценка: в предположении наиболее неблагоприятного стечения обстоятельств), (чел.-дн.). Вычисление трудоемкости проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$t_{ожi} = \frac{3 \cdot 1 + 2 \cdot 3}{5} = 1.8.$$

Исходя из ожидаемой трудоемкости работ, определяется продолжительность каждой работы в рабочих днях  $T_p$ , учитывающая параллельность выполнения работ несколькими исполнителями. Такое вычисление необходимо для обоснованного расчета заработной платы, так как удельный вес зарплаты в общей сметной стоимости научных исследований составляет около 65 %.

$$T_{pi} = \frac{t_{ожi}}{Ч_i}$$

где  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, (раб. дн.);  $t_{ожi}$  – ожидаемая трудоемкость выполнения одной работы, (чел.-дн.);  $Ч_i$  – численность исполнителей, выполняющих одновременно одну и ту же работу на данном

этапе, (чел.). В ходе данной работы количество человек, выполнявших каждую из работ на каждом из этапов, равняется одному.

Вычисление продолжительности каждой работы проводится следующим образом с использованием вышеприведенной формулы:

$$T_{pi} = \frac{1.8}{1}$$

Дальнейшие расчеты продолжительности каждой работы проводятся подобным образом с использованием данных из таблицы 6.

#### 4.2.3 Разработка графика проведения научного исследования

Был разработан календарный план работ. В ходе данной работы был построен ленточный графика проведения работ в форме диаграмм Ганта. Диаграмма Ганта – горизонтальный ленточный график, на котором работы по теме представляются протяженными во времени отрезками, характеризующимися датами начала и окончания выполнения данных работ.

Для удобства построения календарного план-графика, длительность этапов в рабочих днях переводится в календарные дни и рассчитывается по следующей формуле:

$$T_{ki} = T_{pi} * k$$

где  $T_{ki}$  – продолжительность выполнения одной работы, (кален. дн.);  $T_{pi}$  – продолжительность одной работы, (раб. дн.);  $k$  – коэффициент календарности, предназначен для перевода рабочего времени в календарное.

Расчёт коэффициента календарности производится по следующей формуле:

$$k = \frac{T_{ki}}{T_{ki} - T_{вд} - T_{пд}} = 1.22$$

где,  $T_{ki}$  – количество календарных дней в году ( $T_{кг} = 366$  дн.);  $T_{вд}$  – количество выходных дней в году ( $T_{вд} = 52$ );  $T_{пд}$  – количество праздничных дней в году, ( $T_{пд} = 14$ ).

Расчетные данные сведены в таблице 11, на основании которой был построен календарный план-график.

Таблица 11 – Временные показатели проведения научного исследования

№	Вид работ	Исполнитель	$t_{min i}$	$t_{max i}$	$t_{ож i}$	$\Psi_i$	$T_{pi}$ раб.дн	$T_k$ кал.дн
1	Составление и утверждение технического задания	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
2	Подбор и изучение материалов по теме	Инженер	5	7	5.8	1	5.8	7.1
3	Выбор направления исследований	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
4	Разработка общей методики проведения исследований	Руководитель	2	4	2.8	1	2.8	3.4
5	Календарное планирование работ по теме	Руководитель	1	2	1.4	1	1.4	2
6	Изучение документации, поиск литературы	Инженер	2	6	3.6	1	3.6	4.4
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	Инженер	5	7	5.8	1	5.8	7.1
8	Получение необходимых данных	Инженер	10	24	15.6	1	15.6	19
9	Создание графических зависимостей	Инженер	9	20	13.4	1	13.4	16.4
10	Анализ и описание результатов	Инженер	7	10	8.2	1	8.2	10
11	Проверка полученных результатов	Руководитель	1	3	1.8	1	1.8	2.2
12	Составление пояснительной записки	Инженер	4	8	5.6	1	5.6	6.83
Итого:			51	105	72.6	2	72.6	88.6

На основании полученных данных был построен план-график в виде диаграммы Ганта. График строится с разбивкой по месяцам и декадам (10 дней) за период времени дипломирования. При этом работы на графике следует выделить различной штриховкой в зависимости от исполнителей, ответственных за ту или иную работу. Календарный план-график выполнения данной дипломной работы представлен ниже.

Таблица 12 – Календарный план-график проведения исследовательских работ по теме

№ работ	Вид работ	Исполнители	Тki кал. дн.	Продолжительность выполнения работ												
				Февраль			Март			Апрель			Май			
				1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	
1	Составление и утверждение технического задания	Рук.	2.2		■											
2	Подбор и изучение материалов по теме	И.	7.1		▨	▨										
3	Выбор направления исследования	Рук.	2.2			■										
4	Разработка общей методики проведения исследований	Рук.	3.4			■										
5	Календарное планирование работ по теме	Рук.	2				■									
6	Изучение документации, поиск литературы	И	4.4				▨									
7	Поиск статей в журналах по выбранной тематике	И	7.1					▨	▨							
8	Получение необходимых данных	И	19						▨	▨	▨	▨				
9	Создание графических зависимостей	И	16.4									▨	▨	▨	▨	
10	Анализ и описание результатов	И	10											▨	▨	
11	Проверка полученных результатов	Рук.	2.2												■	
12	Составление пояснительной записки	И	6.83													▨

Итого:

- Руководитель: календарных дней – 9.6, рабочих дней – 7.8
- Инженер: календарных дней – 79, рабочих дней – 64.8

### 4.3 Бюджет научно-технического исследования

При планировании бюджета НТИ должно быть обеспечено полное и достоверное отражение всех видов расходов, связанных с его выполнением. В процессе формирования бюджета НТИ используется следующая группировка затрат по статьям:

- материальные затраты НТИ;
- затраты на специальное оборудования для исследования
- основная заработная плата исполнителей темы;
- дополнительная заработная плата исполнителей темы;
- отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления);
- накладные расходы.

#### 4.3.1 Расчет материальных затрат НТИ

Затраты на программное обеспечение. Стоимость годовой лицензии Wolfram Mathematica 11 составляет \$159. Курс доллара на момент покупки лицензии составляет приблизительно 70 руб. Таким образом стоимость покупки лицензии в рублях составляет:

$$C = 159 * 70 = 11130 \text{ руб.}$$

Остальные материальные затраты, необходимые для данной разработки, заносятся в таблицу 13.

Таблица 13 – Материальные затраты связанные с исследованием

Наименование материалов	Цена за ед., руб.	Кол-во, ед.	Сумма, руб.
Комплекс канцелярских принадлежностей	350	1	350
Годовая лицензия Wolfram Mathematica 11	11130	1	11130
<b>Итого:</b>			11480

### 4.3.2 Расчет амортизации специального оборудования

Расчет сводится к определению амортизационных отчислений, так как оборудование было приобретено до начала выполнения данной работы и эксплуатировалось ранее, поэтому при расчете затрат на оборудовании учитываем только рабочие дни по данной теме.

Стоимость ноутбука составляет 70000 руб.

Расчет амортизации проводится следующим образом:

Норма амортизации: рассчитывается по формуле:

$$H_A = \frac{1}{n} = \frac{1}{5} = 0.2$$

где  $n$  – срок полезного использования в количестве лет, срок службы ноутбука – 5 лет.

Амортизация оборудования рассчитывается по формуле:

$$A = \frac{H_A I}{12} m = \frac{0.2 * 70000}{12} 3 = 3500 \text{ руб.}$$

где  $I$  – итоговая сумма, тыс. руб.;  $m$  – время использования, мес.

Таблица 14 — Затраты на амортизацию

№ п/п	Наименование оборудования	Кол-во ед.	Срок полезного использования, лет	Время использования, мес.	$H_A$ , %	Цена оборудования, руб.	Амортизация
1	2	3	4	5	6	7	8
1	Персональный компьютер	1	5	3	0.2	70000	3500
<b>Итого:</b>							<b>3500 руб.</b>

### 4.3.3 Основная заработная плата исполнителей темы

В данном разделе рассчитывается заработная плата инженера и руководителя, помимо этого необходимо рассчитать расходы по заработной плате, определяемые трудоемкостью проекта и действующей системой оклада.

Статья включает основную заработную плату работников, непосредственно занятых выполнением НИИ, (включая премии, доплаты) и дополнительную заработную плату:

$$Z_{\text{осн}} = Z_{\text{дн}} * T_p$$

где  $Z_{\text{осн}}$  – основная заработная плата, руб.;  $Z_{\text{дн}}$  – средневзвешенная заработная плата, руб.;  $T_p$  – продолжительность работ, выполняемых работниками, раб.дн.

Среднедневная заработная плата рассчитывается по формуле:

Для шестидневной рабочей недели (рабочая неделя руководителя):

$$Z_{\text{дн}} = \frac{Z_{\text{м}} * M}{F_d} = \frac{61235.2 * 10.3}{252} = 2502.9 \text{ руб.}$$

где  $Z_{\text{м}}$  – месячный должностной оклад работника, руб.;  $F_d$  – действительный годовой фонд рабочего времени научно-технического персонала, раб. дней;  $M$  – количество месяцев работы без отпуска в течение года, при отпуске в 56 раб. дней –  $M = 10.3$  месяца, 6-дневная рабочая неделя.

Должностной оклад руководителя за месяц:

$$Z_{\text{м}} = Z_{\text{мс}}(1 + k_{\text{пр}} + k_d)k_p = 31402.6 * (1 + 0.3 + 0.2) * 1.3 = 61235.2 \text{ руб.}$$

где  $Z_{\text{мс}}$  – заработная плата, согласно тарифной ставке, руб.;  $k_{\text{пр}}$  – премиальный коэффициент, равен 0.3;  $k_d$  – коэффициент доплат и надбавок, равен 0.2;  $k_p$  – районный коэффициент, равен 1.3 (для г. Томска).

Таблица 15 – Баланс рабочего времени исполнителей

Показатели рабочего времени	Руководитель	Инженер
Календарное число дней	366	365
Количество нерабочих дней		
• выходные дни	52	52
• праздничные дни	14	14
Потери рабочего времени		
• отпуск	48	48
• невыходы по болезни	0	0
Действительный годовой фонд рабочего времени	252	252

Таблица 16 – Расчет основной заработной платы исполнителей

Исполнители	З <sub>мс</sub> , руб	k <sub>пр</sub>	k <sub>д</sub>	k <sub>р</sub>	З <sub>м</sub> , руб	З <sub>дн</sub> , руб	T <sub>р</sub> , раб.дн.	З <sub>осн</sub> , руб
Руководитель	31402	0.3	0.2	1.3	61235	2502.9	7.8	19530
Инженер	12664	0.3	0.2	1.3	24695	1009.4	64.8	65409
Итого:	84939							

#### 4.3.4 Дополнительная заработная плата исполнителей темы

Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы учитывают величину предусмотренных Трудовым кодексом РФ доплат за отклонение от нормальных условий труда, а также выплат, связанных с обеспечением гарантий и компенсаций (при исполнении государственных и общественных обязанностей, при совмещении работы с обучением, при предоставлении ежегодного оплачиваемого отпуска и т.д.).

Расчет дополнительной заработной платы ведется по следующей формуле:

$$Z_{\text{доп}} = k_{\text{доп}} * Z_{\text{осн}}$$

где  $k_{\text{доп}}$  – коэффициент дополнительной заработной платы (на стадии проектирования принимается равным 0,15).

#### 4.3.5 Отчисления во внебюджетные фонды (страховые отчисления)

В данной статье расходов отражаются обязательные отчисления по установленным законодательством Российской Федерации нормам органам государственного социального страхования (ФСС), пенсионного фонда (ПФ) и медицинского страхования (ФФОМС) от затрат на оплату труда работников.

где  $k_{\text{внеб}}$  – коэффициент отчислений на уплату во внебюджетные фонды (пенсионный фонд, фонд ОМС и социальное страхование). Общая ставка взносов составляет в 2020 году – 30% (ст. 425, 426 НК РФ).

#### 4.3.6 Накладные расходы

Накладные расходы включают в себя следующие расходы: печать ксерокопирование материалов исследования, оплата услуг связи, расходы на содержание аппарата управления и общехозяйственных служб.

Сумма затрат, рассчитанных выше, приведена в таблице ниже и используются для расчета накладных расходов.

Таблица 17 – Группировка затрат по статьям

Статьи							
1	2	3	4	5	6	7	8
Амортизация	Сырье, материалы	Основная заработная плата	Дополнительная заработная плата	Отчисления на социальные нужды	Итого без накладных расходов	Накладные расходы	Бюджет затрат НИР
3500	11480	84939	12740,85	29303,95	141963,805	28392,761	170356,566

Величина накладных расходов определяется по формуле:

$$Z_{\text{накл}} = (\text{сумма статей 1 – 5 в табл. 13}) * k_{\text{пр}}$$

где  $k_{\text{пр}}$  – коэффициент, учитывающий накладные расходы. Величина коэффициента принимается равной 0.2.

#### 4.3.7 Определение ресурсной (ресурсосберегающей), финансовой, бюджетной, социальной и экономической эффективности исследования

Определение эффективности происходит на основе расчета интегрального показателя эффективности научного исследования. Его нахождение связано с определением двух средневзвешенных величин: финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получают в ходе оценки бюджета затрат трех (или более) вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принимается за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

В качестве аналогов данной НИР рассмотрены аналогичные НИР, где проводились теоретические моделирования:

- 1) Диагностика с помощью резонансного дифракционного излучения
- 2) Диагностика с помощью переходного излучения

На основании полученных данных по отдельным статьям затрат составляется калькуляция плановой себестоимости НИ «Дифракционное излучение Вавилова-Черенкова релятивистских электронов» по форме, приведенной в таблице 18. В таблице также представлено определение бюджета затрат трех конкурирующих научно-исследовательских проектов.

Таблица 18 – Группировка затрат по статьям

№	Наименование статьи	Сумма, руб.		
		Текущий Проект	Исп.1	Исп.2
1	Материальные затраты НИР	11480	161	10110
2	Затраты на специальное оборудование	3500	10291	18675
3	Затраты по основной заработной плате исполнителей темы	84939	125845	47764
4	Затраты по дополнительной заработной плате исполнителей темы	12740.85	18877	2854
5	Отчисления во внебюджетные фонды	29303.96	37754	13718
6	Накладные расходы	28392.76	13385	30392
Бюджет затрат НИР		170356.57	206313	123513

Для определения эффективности исследования рассчитан интегральный показатель эффективности научного исследования путем определения интегральных показателей финансовой эффективности и ресурсоэффективности.

Интегральный показатель финансовой эффективности научного исследования получен в процессе оценки бюджета затрат трех вариантов исполнения научного исследования. Для этого наибольший интегральный показатель реализации технической задачи принят за базу расчета (как знаменатель), с которым соотносятся финансовые значения по всем вариантам исполнения.

Интегральный финансовый показатель разработки рассчитывается как:

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i} = \frac{\Phi_{pi}}{\Phi_{\text{max}}}$$

где  $I_{\text{финр}}^{\text{исп.}i}$  – интегральный финансовый показатель разработки,  $\Phi_{pi}$  – стоимость  $i$ -го варианта исполнения,  $\Phi_{\text{max}}$  – максимальная стоимость исполнения.

$$\Phi_{\text{тек.пр.}} = 170356,57 \text{ руб.}, \Phi_{\text{исп.1}} = 206313 \text{ руб.}, \Phi_{\text{исп.2}} = 85513 \text{ руб.}$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{тек.пр.}} = \frac{\Phi_{\text{тек.пр.}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{170356,57}{206313} = 0.83$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.1}} = \frac{\Phi_{\text{исп.1}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{206313}{206313} = 1$$

$$I_{\text{финр}}^{\text{исп.2}} = \frac{\Phi_{\text{исп.2}}}{\Phi_{\text{max}}} = \frac{123513}{206313} = 0.6$$

В результате расчета консолидированных финансовых показателей по трем вариантам разработки вариант 3 (исп.2) с перевесом считается более приемлемым с точки зрения финансовой эффективности.

Интегральный показатель ресурсоэффективности вариантов выполнения НИР ( $I_{pi}$ ) определен путем сравнительной оценки их характеристик, распределенных с учетом весового коэффициента каждого параметра (таблица 19).

Таблица 19 – Сравнительная оценка характеристик вариантов НИР

Объект исследования Критерии	Весовой коэффициент параметра	Текущий проект	Исп.1	Исп.2
1. Информативность применяемого метода	0.20	4	4	4
2. Возможность непрерывной обработки данных эксперимента	0.15	5	4	3
3. Влияние на измеряемый объект	0.25	5	3	3
4. Требования к устройствам регистрации	0.20	3	3	3
5. Точность получаемых данных	0.20	4	4	4
Итого	1	4.2	3.55	3.4

Расчет интегрального показателя для разрабатываемого проекта:

$$I_{p\text{тек.}} = 0.2 * 4 + 0.5 * 5 + 0.25 * 5 + 0.2 * 3 + 0.2 * 4 = 4.2$$

$$I_{p1} = 3.55$$

$$I_{p2} = 3.4$$

Интегральный показатель эффективности вариантов исполнения разработки вычисляется на основании показателя ресурсоэффективности и интегрального финансового показателя по формуле:

$$I_{\text{исп.}i} = \frac{I_{p\text{-исп.}i}}{I_{\text{финр.}i}}$$

$$I_{\text{тек.ис.}} = \frac{4.2}{0.732} = 5.74$$

$$I_{\text{исп.1}} = \frac{3.55}{1} = 3.55$$

$$I_{\text{исп.2}} = \frac{3.4}{0.6} = 5.67$$

Далее интегральные показатели эффективности каждого варианта НИР сравнивались с интегральными показателями эффективности других вариантов с целью определения сравнительной эффективности проекта (таблица 20).

Таблица 20 – Сравнительная эффективность разработки

№ п/п	Показатели	Текущий проект	Исп.1	Исп.2
1	Интегральный финансовый показатель разработки	0.73	1	0.6
2	Интегральный показатель ресурсоэффективности разработки	4.2	3.55	3.4
3	Интегральный показатель эффективности	5.74	3.55	5.67
4	Сравнительная эффективность вариантов исполнения	1	0.62	0.98

Сравнение среднего интегрального показателя сопоставляемых вариантов позволило сделать вывод о том, что наиболее финансово- и ресурсоэффективным является текущий проект. Текущий проект является более эффективным по сравнению с конкурентами. Но стоит заметить, что низкая стоимость разработки варианта 2, в связи своей более низкой стоимости разработки.

## **Выводы по разделу**

В результате выполнения целей раздела можно сделать следующие выводы:

1. Результатом анализа конкурентных технических решений является сравнение данного исследования с одним из вариантов других исследований позволяющих добиться аналогичных результатов при заданных условиях, как наиболее подходящего и оптимального по сравнению с другими.

2. В ходе планирования для руководителя и студента был разработан график реализации этапа работ, который позволяет оценивать и планировать рабочее время исполнителей. Главными тезисами этой работы являются: общее количество дней для выполнения работ составляет 89 дней; общее количество дней, в течение которых работал студент, составляет 79 дней; общее количество дней, в течение которых работал руководитель, составляет 10 дней.

3. Для оценки затрат на реализацию проекта рассчитан бюджет исследования, который составляет 170356,566 руб.

4. Результат оценки эффективности исследования показывает следующие выводы:

- значение интегрального финансового показателя исследования составляет 0.83, что является показателем того, что исследование является финансово выгодной по сравнению с аналогами;
- значение интегрального показателя ресурсоэффективности исследования составляет 4.2, по сравнению с 3.55 и 3.4 для рассматриваемых аналогов;
- значение интегрального показателя эффективности исследования составляет 5.74, и является наиболее высоким, что означает, что техническое решение, рассматриваемое в исследовании, является наиболее эффективным вариантом исполнения.

## Список используемых источников

1. И.Е. Тамм, И.М. Франк. Когерентное излучение быстрого электрона в среде // 1937. – Т. 14. – 107 с.
2. G. Toraldo di Francia. On the Theory of some Cherenkov Effects // IL Nuovo Cimento. – 1960. – Vol. 16, no. 1. – 61-77 pp.
3. G.N. Afanasiev. Vavilov-Cherenkov and Synchrotron Radiation. Foundations and Applications. – Springer Netherlands, 2004.
4. В.П. Зрелов. Излучение Вавилова-Черенкова и его применение в физике высоких энергий. – Москва: Атомиздат, 1968. – Т. 1, 2.
5. Б.М. Болотовский, Г.В. Воскресенский. Дифракционное излучение // УФН. – 1966. – Т. 88, №2. – 209-251 с.
6. Ю.Н. Днестровский, Д.П. Излучение модулированного пучка заряженных частиц при пролете через круглое отверстие в плоском экране // ДАН СССР. – 1959. – Т. 124, № 4. – 729-795 с.
7. В.Л. Гинзбург, И.М. Франк. Излучение равномерно движущегося электрона, возникающего при его переходе из одной среды в другой // ЖЭТФ. – 1946. – Т. 16, № 1. – 15-28 с.
8. М.Л. Тер-Микаелян. Влияние среды на электромагнитные процессы при высоких энергиях. – Ереван: Изд-во АН Армянской ССР, 1969.
9. В.Л. Гинзбург. Излучение равномерно движущихся источников (эффект Вавилова-Черенкова, переходное излучение и некоторые другие явления) // УФН. – 1969. – Т. 166, № 10. – 1033-1042 с.
10. P.A. Serenkov. Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light // Phys. Rev. – 1937. – Aug. – Vol. 52. – Pp. 378-379.
11. P.A. Serenkov. Visible radiation produced by electrons moving in a medium with velocities exceeding that of light // Phys. Rev. – 1937. – Aug. – Vol. 52. – Pp. 378-379.
12. Болотовский Б.М. Теория эффекта Вавилова-Черенкова // УФН. – 1957. – Т. 62. вып. 3. – 201-246 с.

13. Г.А. Науменков, А.П. Потылицын. Обнаружение дифракционного излучения в диэлектрической мишени в условиях генерации излучения Вавилова-Черенкова // Письма в ЖЭТФ. – 2011. – Т. 94, № 4. – 280-283 с.
14. Д.В. Карловец. К теории поляризационного излучения в средах с резкими границами // ЖЭТФ. – 2011. – Т. 140, № 1. – 36-55 с.
15. Direct observation of incoherent Cherenkov diffraction radiation on the visible range. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi, V.V. Bleko, M. Billing and oth. // Physical review letters. – 2018. – Т. 121. – pp. 1-6.
16. Ученые доказали, что излучение Вавилова-Черенкова можно использовать в диагностике электронных пучков «на расстоянии» [Электронный ресурс] : Том. политехн. ун-т. — Томск, 2002-2020. — Режим доступа: <https://news.tpu.ru/press/view/?id=87>, свободный. — Загл. с экрана (дата обращения: 20.04.2020).
17. М.В. Шевелев, А.С. Коньков. Особенности генерации излучения Вавилова-Черенкова при пролете заряженной частицы вблизи диэлектрической мишени // ЖЭТФ. – 2014. – Т. 145, № 4. – 579-590 с.
18. В.Л. Гинзбург, В.Л. Франк И.М. Излучение электрона и атома, движущихся по оси канала в плотной среде // ДАН СССР. – 1947. – Т. 56, № 7. – 699-702 с.
19. Direct observation of incoherent Cherenkov diffraction radiation on the visible range. R. Kieffer, L. Bartnik, M. Bergamaschi, V.V. Bleko, M. Billing and oth. // Physical review letters. – 2018. – Т. 121. – pp. 1-6.
20. Квазичеренковский механизм излучения релятивистских электронов, пролетающих вблизи многослойной призматической мишени / Г.А. Науменков, А.П. Потылицын, М.В. Шевелев, Д.А. Шкитов, К.Е. Попов, А.В. Вуколов. // Письма в ЖЭТФ. – 2020. – Т. 111, № 5. – 295-299 с.
21. А.С. Коньков. Характеристики поляризационного излучения заряженных частиц и магнитных моментов // дис..канд. техн. наук // Томск. – 2015. – 41-59 с.

22. СанПиН 2.2.2/2.4.1340-03 Гигиенические требования к персональным электронно-вычислительным машинам и организации работы
23. ГОСТ 12.0.002-2014. Система стандартов безопасности труда. Термины и определения.
24. ГОСТ 12.0.003-2015. ССБТ Опасные и вредные факторы. Классификация. – М.: ИПК: Изд-во стандартов, 2017 г.
25. Строительные нормы и правила СНиП 23-05-95 "Естественное и искусственное освещение" (утв. постановлением Минстроя РФ от 2 августа 1995 г. N 18-78)4. ГОСТ 12.1.030-81, Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Защитное заземление, зануление.
26. НПБ 105-03. Определение категорий помещений и зданий по взрывопожарной и пожарной опасности. 1 авг. 2003 г.
27. ГОСТ 12.4.009-83, Система стандартов безопасности труда. Пожарная техника для защиты объектов. Основные виды. Размещение и обслуживание.
28. Федеральный закон «Об основах охраны труда» от 17.07.1999 г. №181-ФЗ (с изменениями от 20 мая 2002 г., 10 января 2003 г., 9 мая, 26 декабря 2005 г.).
29. ППБ 01-03, Правила пожарной безопасности в Российской Федерации.
30. ГОСТ 12.1.004-91 ССБТ. Пожарная безопасность. Общие требования
31. ГОСТ Р 55102-2012 Ресурсосбережение. Обращение с отходами. Руководство по безопасному сбору, хранению, транспортированию и разборке отработавшего электротехнического и электронного оборудования, за исключением ртутисодержащих устройств и приборов.
32. Трудовой кодекс РФ. Глава 15. Рабочее время. Общие положения

**Приложение А**  
**(справочное)**

Раздел 1  
**Vavilov-Cherenkov diffraction radiation**

Студент:

Группа	ФИО	Подпись	Дата
0AM84	Сергеев Михаил Владимирович		

Консультант школы отделения (НОЦ) \_\_\_\_\_ (аббревиатура школы, отделения (НОЦ)) \_\_\_\_\_ :

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Профессор ИШФВП	Потылицын А.П.	д.ф. - м.н.		

Консультант – лингвист отделения (НОЦ) школы ШБИП:

Должность	ФИО	Ученая степень, звание	Подпись	Дата
Специалист по УМР	Смирнова У.А.			

## **Abstract**

Vavilov-Cherenkov radiation was discovered in 1934, after it was considered in detail in many theoretical and experimental works, and it is also widespread in many sectors related to nuclear physics and radioactivity.

Later, the existence of Vavilov-Cherenkov radiation when a charge passes near the target was proved. However, it was considered that the intensity of such radiation is too low to register. In 2018, an experiment was conducted and it was proved that incoherent Vavilov-Cherenkov optical radiation has sufficient intensity for its use, when it flies near the target. This fact was the beginning of further theoretical and experimental research in this area.

In this paper, the study of Vavilov-Cherenkov diffraction radiation was conducted, which is generated when a charged particle passes near a dielectric target at a particle energy from 6 MeV to 5 GeV. The simulation was performed in the Wolfram Mathematica program.

In the researched mechanism of radiation generation, there is no direct interaction of particles with the target, which opens up prospects for undisturbed diagnostics of beams on modern accelerators

## **Summary**

The final qualifying work includes 123 pages, 91 figures, 20 tables, 32 sources.

Keywords: Vavilov-Cherenkov radiation, Vavilov-Cherenkov diffraction radiation, diffraction radiation, undisturbed diagnostics, dielectric prism, modeling, Wolfram Mathematica.

The object of research is Vavilov-Cherenkov diffraction radiation (VCDR).

The purpose of this work is determining the optimal geometry and parameters of dielectric targets for the use of the VCDR.; getting and using the intensity components of the VCDR and diffraction radiation (DR) field.; conducting simulations for experiments on TPU and KEK accelerators.

During the research, the characteristics of Vavilov-Cherenkov diffraction radiation and diffraction radiation were modeled using the Wolfram Mathematica and Microsoft Excel programs.

Degree of integration: experiments were conducted in the researched subject. Currently, theoretical studies and preparation for future experiments are being conducted.

Practical application: undisturbed diagnostics of charged particle beams. Determination of the dielectric constants of the target material.

The economic significance of the work at the moment is improvement the determination of the characteristics of beams and targets, and reducing the operating time of the equipment.

## Introduction

In this study, the basic concepts of polarization radiation, in particular Vavilov-Cherenkov radiation and some of its properties were considered. Vavilov-Cherenkov radiation is generated when charged particles fly at a constant speed through an optically transparent medium, where the particle velocity is greater than the phase velocity of light in this substance.

Vavilov-Cherenkov radiation is used in detecting installations. Cherenkov radiation does not depend on the chemical composition of the medium, and, therefore, its study can determine both the energy and speed, and the direction of movement of elementary particles from accelerators, as well as cosmic rays. In particular, Cherenkov radiation detectors are used for monitoring the tightness of nuclear installations.

In this work, we study the Vavilov-Cherenkov diffraction radiation, which is generated when a beam of charged particles passes near a dielectric target, in contrast to the Vavilov-Cherenkov radiation itself.

Previously, it was thought that the Vavilov-Cherenkov radiation generated during the passage of particles near the dielectric is too small to be taken into account in experiments. In recent years, it has been shown experimentally and theoretically that the radiation power is sufficient to obtain information about the characteristics of the beam itself and the target. When charged particles pass in close proximity to the target, the particle fields polarize the medium in the region of  $\approx \gamma\beta\lambda$ . In this case, the radiation is generated without direct interaction of the particles with the medium. This property is interesting because it allows us to use Vavilov-Cherenkov radiation as one of the methods of non-disturbing diagnostics.

## **1. Vavilov-Cherenkov diffraction radiation**

### **1.1 Generation of polarizing radiation**

Polarizing radiation is electromagnetic radiation generated when a medium is polarized by a field of charged particles. Polarizing radiation means Vavilov-Cherenkov radiation (VCDR), Smith-Purcell radiation (SPR), diffraction radiation (DR), transient radiation (TR), and others. All these types of radiation have a single principle of generation. When particles move, the electron shells of the target material atoms are excited when they are deformed by the field of a moving charged particle. Dynamic polarization of electron shells is the cause of radiation generation, such as movement near the target as DR and SPR, or in the target material – VCDR, TR. An exact solution of this type of problem can be obtained by solving the Maxwell equation for the field of moving charge, ignoring the change in the energy and direction of movement of the particle, taking into account the charges and changes in the current density in the target material.

The first one considered earlier was the detection of VCR from secondary electrons under the influence of gamma radiation when studying the luminescence of liquids [1]. In 1953, it was first recorded that an electron beam passes near a surface with periodically changing electrodynamic characteristics – a diffraction grating [2]. The use of SPR is currently considered quite widely, for generating terahertz radiation, spectroscopy, unperturbed diagnostics, applications in the field of medicine, and others. [3, 4]. the DR, which was obtained theoretically by Frank I.M. back in the forties, after the discovery of SPR, it was studied in detail on non-relativistic beams of charged particles in the centimeter wavelength range, which led to the emergence of a new sphere of ultrahigh-frequency electronics, the development of which does not stop until now [5, 6]. TR Theory began its development since the first article was written by Ginzburg V.L. and Frank I.M. in 1945, in which they theoretically predicted this type of radiation [7]. From their work, it follows that radiation by particles is possible due to a change in the phase velocity of propagation of electromagnetic waves in a substance, and not only with the acceleration of the charge, as previously thought. Only twenty years later, TR

was experimentally recorded, due to its low radiation intensity, when passing through the interface of media [8, 9]. An important factor is that, despite the common nature of these physical phenomena, the methods used for solving problems are different when considering the problems of VCR, SPR, DR and TR.

## 1.2 Vavilov-Cherenkov radiation

In 1934, in the laboratory under the direction of S.I. Vavilov, research was conducted by P.A. Cherenkov. When studying the luminescence of liquids under the influence of electromagnetic radiation, a glow of unknown nature was detected, which was later called VCR [10].

Further, it was determined that the light is caused by electrons formed from the interaction of gamma-rays of radium, moving at speeds exceeding the phase speed of light in the medium. Electrons are dislodged from the shells of the medium's atoms. In the following experiments, it was determined that the brightness does not depend much on the chemical properties and nature, the radiation is polarized in the direction of the electric vector in the direction of particle movement. An important point was that there was no impurity and temperature quenching (attenuation of the light), in contrast to luminescence [10].

Later, in 1958, Cherenkov was awarded the Nobel prize in physics for his discovery, and Frank I. M. and Tamm I. E. for their theoretical explanation of the phenomenon [11].

During the passage of a charged particle moving in a medium with a refractive index  $n$ , with a constant velocity  $v$ , emits electromagnetic waves in a continuous spectrum and in a narrow cone. Radiation is generated if the particle velocity  $v$  is greater than the phase speed of light  $v_{\phi} = c/n$ , in this medium  $v > c/n$ . The angle  $\theta$  constituting the wave vector of radiated waves  $k$  is formed with the velocity  $v$ , with the direction of motion of the particles, obey the equation:

$$\cos \theta = c/v * n$$

In 1957, in [12], a study was conducted in which the VCR is generated without direct interaction of electrons with the target material. When electrons pass near the target, the particle fields polarize the target in the  $\approx \gamma\beta\lambda$  region. Under these conditions, the VCR is generated without the interaction of electrons with the target.

### 1.3 Vavilov-Cherenkov diffraction radiation

DR in the relativistic case, propagates in the direction of particle movement and is concentrated in a small area of angles, in contrast to the VCR, which is known to be generated at large angles from the direction of particle movement, makes it easy to separate these types of radiation.

The study of VCR in the optical range from high-energy electrons is the subject of a large number of theoretical and applied works. The negative side of this method of measuring the parameters of the beam or target is that when a particle passes through the target, it is scattered, sometimes this can be ignored, but not always. The model of generation of VCDR and DR, in which a charged particle flies in close proximity to a target that has some spectral dispersion and conductivity, was considered in articles [13, 14]. The undoubted advantage of this type of radiation is the absence of ionization losses in the target material. In the case of electron beams with a Lorentz factor greater than 10, the interaction region increases significantly, and its characteristic size can take macroscopic values  $\approx \gamma\lambda$ . This fact, in comparison with beams with  $\gamma < 10$ , including non-relativistic ones, allows us to consider radiation generated without direct interaction of the beam with the target. Until recently, it was believed that such a type of study as VCDR, due to its weak intensity, was not necessary to take into account, let alone research based on it.

In a recent paper [15], a group of scientists, including those from TPU, conducted an experiment in which incoherent VCDR was observed from a positron beam with an energy of 5.3 GeV. The beam in this experiment passes in close proximity, at a distance of about 0.8 mm, from the emitter. The shape of the dielectric target (emitter) was chosen in such a way that the Cherenkov radiation was directed to a detector consisting of an optical system equipped with an optical amplification camera, such an optical system allows you to study two-dimensional angular distributions. Beam diagnostics using this method allows correcting the beam characteristics online [16].

Using the work [17], which solved the problem of VCR for a substance with sharp boundaries, we consider the VCR from a dielectric prism of finite dimensions. It is worth mentioning that a similar problem was considered by Ginzburg V.L. and Frank I.M. in 1947 [18]. At that time, we studied the radiation that occurs when a charged particle moves uniformly inside a cylindrical channel with a permittivity of  $\varepsilon_1$  filled with a substance with  $\varepsilon_2$  in this problem, the important point is small losses on the VCR, while the main ones are ionization losses. Similar problems when using complex geometries require special approaches related to setting boundary conditions for their solution. The author applied the method of polarizing currents when considering the problem of the VCR generated when a charged particle with a Lorentz-factor  $\gamma$  moves in a vacuum at a distance  $b$  at an angle  $\psi$  to a prismatic target with a solution angle  $\varphi$  and the opposite side  $a$  with a given permittivity  $\varepsilon$ . Thus, the spectral-angular distribution of forward polarization radiation was obtained, which includes both DR and VCR. The found expression allows us to build the necessary distributions.

## 2. Vavilov-Cherenkov diffraction radiation from a dielectric prism

### 2.1 Spectral-angular distribution of the density of DR and VCDR

The formula from the article [17] is obtained in an unusual form for such problems. Radiation is usually considered with reference to the direction of movement of the charge, in this case, the observation angles are deferred from the Cartesian coordinate system. In this regard, we will replace the coordinates with the one associated with the direction of movement of the particle,  $\theta' = \theta - \alpha$ , where  $\alpha$  is the angle at which the particle moves relative to the z axis.

Similarly, expression (1) takes into account the rotation of the target relative to the particle beam, which, taking into account the above, gives the following expression for  $\alpha$ :

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi - \psi$$

The expression of the spectral-angular density of polarizing radiation obtained in [17] presented below includes both diffraction radiation and Vavilov-Cherenkov radiation:

$$\begin{aligned} \frac{d^2W}{d\omega d\Omega} &= \frac{e^2 \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha)}{4\pi^2 \lambda c} \frac{|\varepsilon - 1|^2}{|P|^2} \left| \frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon} \right|^2 \\ &* \left| 1 - \frac{P * \text{Exp} \left[ i \frac{\omega}{\beta c} \Sigma a \text{Cot}[\phi] \right] + \Sigma \text{Cot}[\phi] \text{Exp} \left[ -i \frac{\omega}{\beta c} a P \right]}{P + \Sigma \text{Cot}[\phi]} \right|^2 \\ &* \left\{ \frac{\varepsilon}{\left| \varepsilon \cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right|^2} \left| \cos \alpha \left( \gamma^{-1} \sin(\theta' - \alpha) - iK \cos \varphi \right. \right. \right. \\ &* \left. \left. \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) + \sin \alpha \left( iK \sin(\theta' - \alpha) + \gamma^{-1} \cos \varphi \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right) \right. \\ &\left. - \gamma \beta \sin(\theta' - \alpha) \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \sin^2 \varphi \right|^2 \\ &+ \left| \frac{\sqrt{\varepsilon}}{\cos(\theta' - \alpha) + \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)}} \right|^2 \left( \gamma \sin \varphi \right)^2 \left( \sin^2(\theta' - \alpha) + \left| \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} \right| \right) \\ &* \left[ 1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + 2\beta \gamma^{-2} \sin \alpha \sin(\theta' - \alpha) \cos \varphi - \gamma^{-2} \sin^2 \alpha (K^2 - \gamma^{-2}) \right] \\ &\quad \text{Exp} \left[ -2 \frac{\omega}{\gamma \beta c} (h + a \text{Cot} \phi) K \cos \alpha \right] \\ &* \frac{K^2 (1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + \beta^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin^2(\theta' - \alpha) \sin^2 \varphi] + 2\beta \sin \alpha \cos \varphi \sin(\theta' - \alpha))}{K^2 (1 - \beta^2 \cos^2(\theta' - \alpha) + \beta^2 \sin^2 \alpha [1 - \sin^2(\theta' - \alpha) \sin^2 \varphi] + 2\beta \sin \alpha \cos \varphi \sin(\theta' - \alpha))} \end{aligned}$$

$$P = \cos(\alpha) - \beta \sqrt{\varepsilon - \sin^2(\theta' - \alpha)} + i\gamma^{-1} K \sin(\alpha)$$

$$\Sigma = \sin(\alpha) + \beta \cos(\varphi) \sin(\theta' - \alpha) - i\gamma^{-1} K \cos(\alpha)$$

$$K = \sqrt{1 + (\gamma\beta \sin(\theta' - \alpha)\sin(\varphi))^2}$$

$$h = \frac{b}{\cos(\alpha)}$$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \phi - \psi,$$

where  $\beta = v/c$  is the ratio of the speed of the charged particle to the speed of light,  $\theta'$  is the polar angle in the new coordinate system shown in figure 1, rotated relative to  $\theta$  by an angle  $\alpha$ ,  $\omega = 2\pi c/\lambda$  is the angular frequency of radiation, and  $\gamma$  is the Lorentz factor of the charged particle.

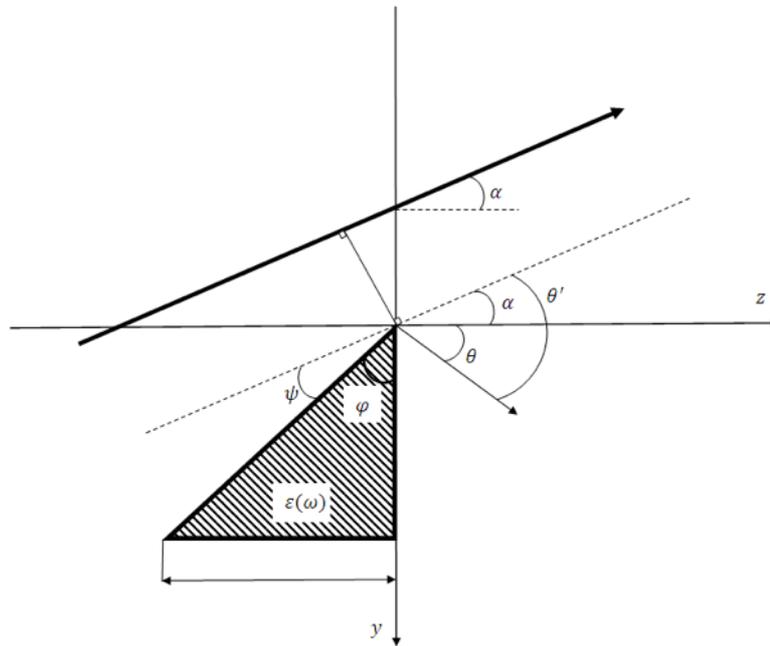


Figure 1 – Diagram illustrating the designations used in formula (1) and the motion of a charged particle relative to a dielectric prism

Before using formula (1), it is necessary to consider the formula for the limits of applicability, especially for this formula in the presence of a strong exponential dependence.

All calculations and simulations used the Wolfram Mathematica package, and Microsoft Office was used for data consolidation and report preparation.

## 2.2 Checking the limits of applicability

In the process of obtaining the spectral-angular distribution, some approximations were made that impose certain restrictions on the possible values of the specified ones first, the expression was obtained for the flight angles  $\alpha < \alpha_{cr}$ , where  $\alpha_{cr}$  is the critical angle, an increase in which will cause the charged particle to cross the target, while causing additional DR and VCR, the generation of which is not taken into account by this formula.

$$\alpha_{cr} = \text{Arcsin}\left(\frac{b}{a/\sin(\phi)}\right) + \pi/2 - \phi$$

Second, restrictions on the geometry of the target, in order to maintain its triangular shape, it is necessary that the angle  $\phi$  is in the range from 0 to  $\pi/2$ .

Third, this problem was solved using Fresnel coefficients in the case of an infinite plane interface. this approximation is valid only in the case when the ratio  $a/tg(\phi)$  significantly exceeds the radiation wavelength  $\lambda$ .

Consider the behavior of the angular distribution of the VCR from the angle of the prism  $\phi$ , by the intensity value at the peak of the VCR distribution, for this, consider the different angles of the prism and compare the intensity value in units  $e^2/\pi c^2$ , for simplicity, the result is shown in figure 2.

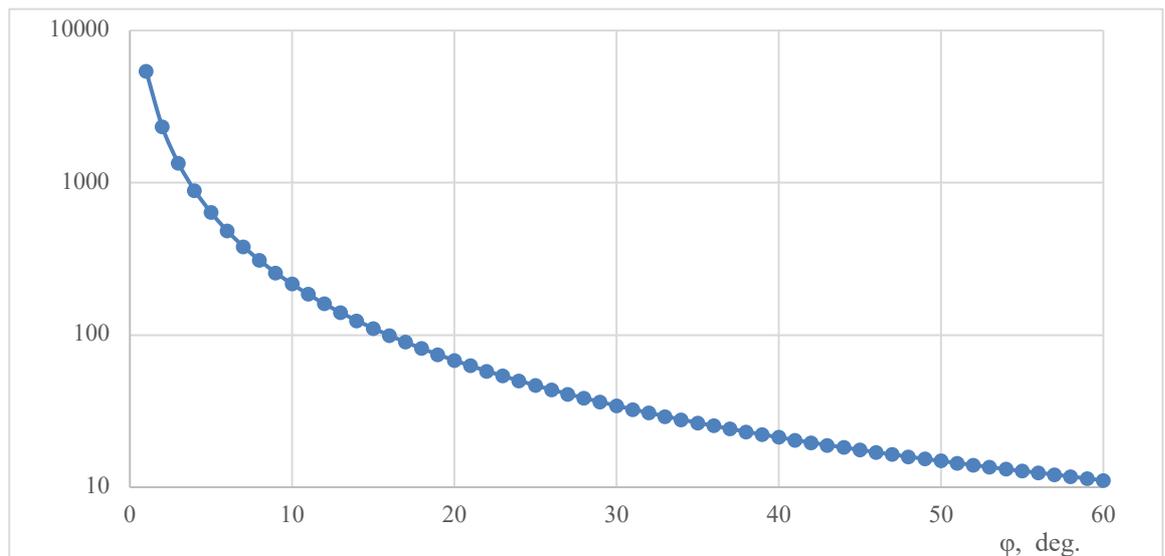


Figure 2 – Dependence of the peak VCR intensity on the angle of the prism

As you can see, as the angle decreases, the intensity increases significantly, especially at  $\varphi < 20^\circ$ . In order not to increase the size of the prism much, we will use  $\varphi = 5^\circ$  to further check the applicability limits.

Next, we will consider how the Wolfram Mathematica package will behave when modeling for different values of the radiation wavelength  $\lambda$  and the aiming parameter  $b$  (Fig. 3-8) with the prism side  $\alpha = 45$  mm and the Lorentz factor  $\gamma = 12$ .

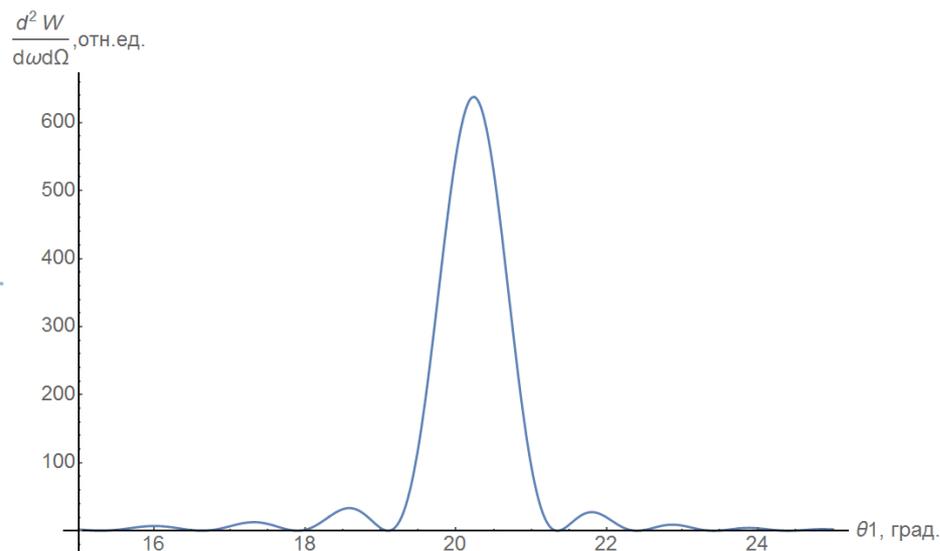


Figure 3 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 4$  mm,  $b = 15$  mm

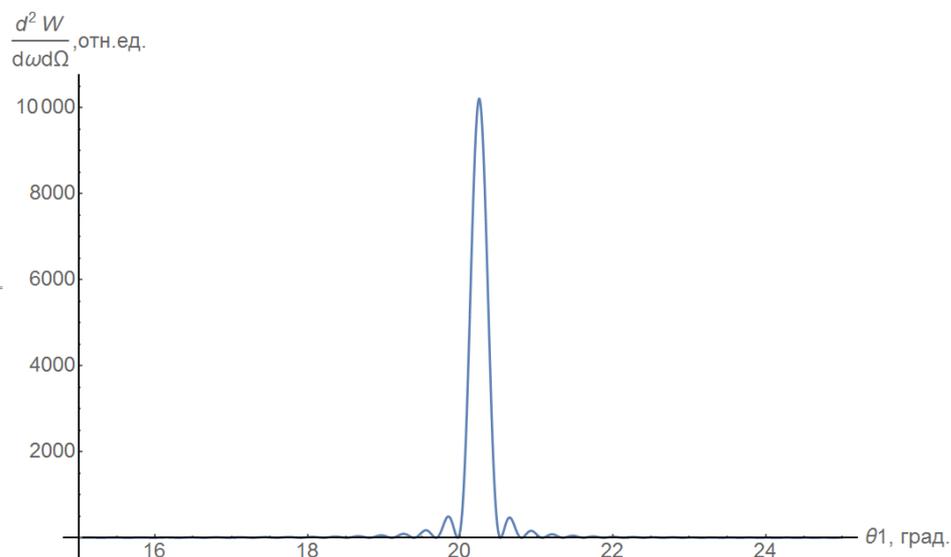


Figure 4 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 1$  mm,  $b = 3.75$  mm

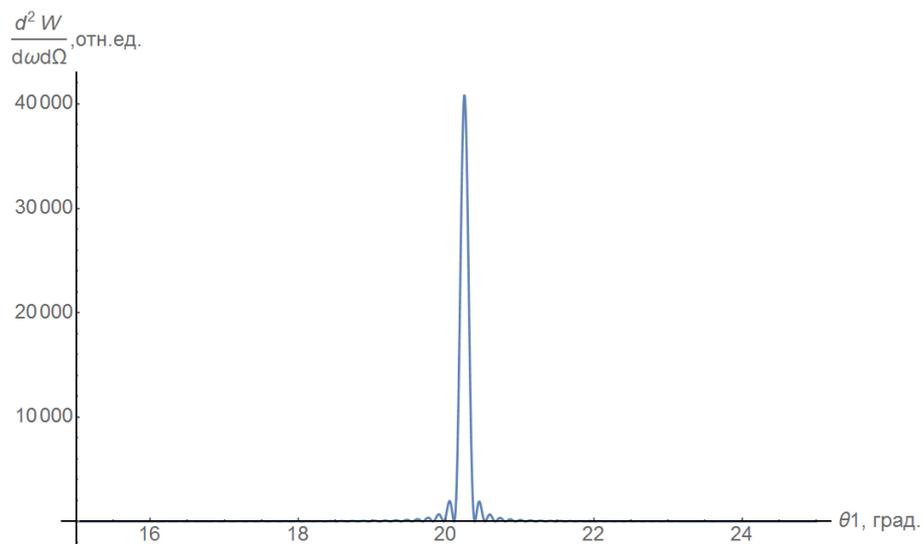


Figure 5 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 0.5$  mm,  $b = 1.875$  mm

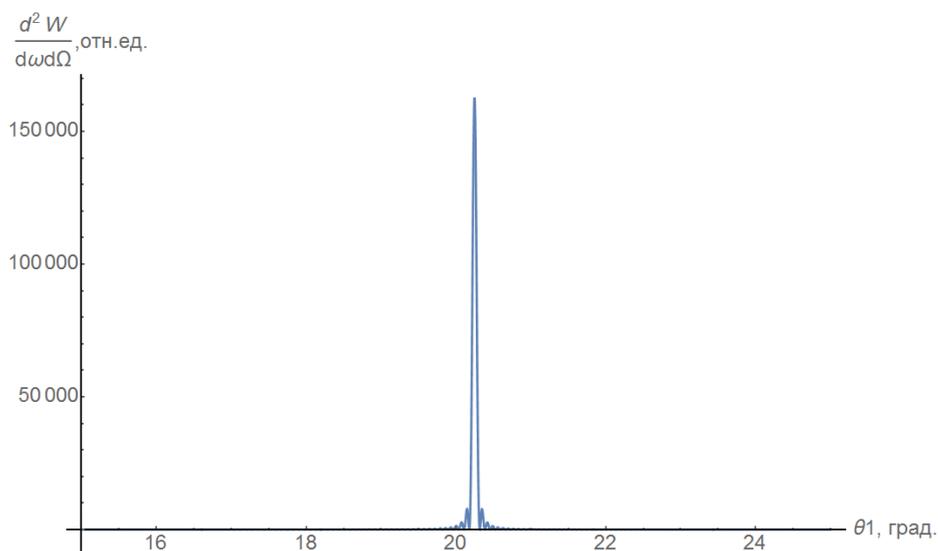


Figure 6 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 0.25$  mm,  $b = 0.9375$  mm

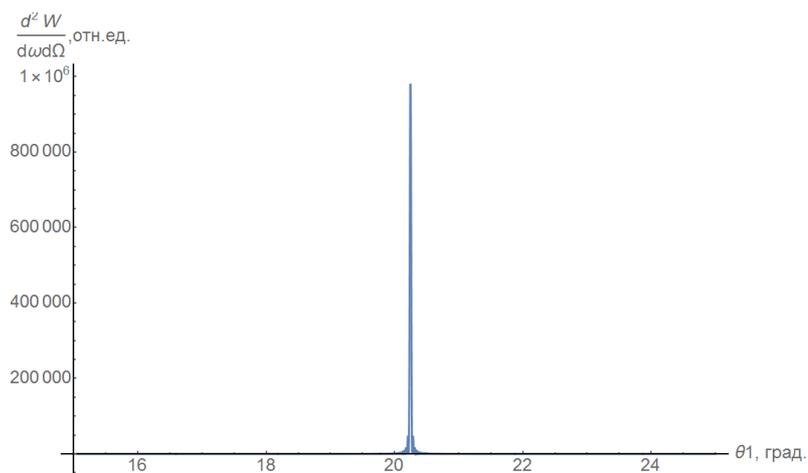


Figure 3 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 0.10$  mm,  $b = 0.375$  mm

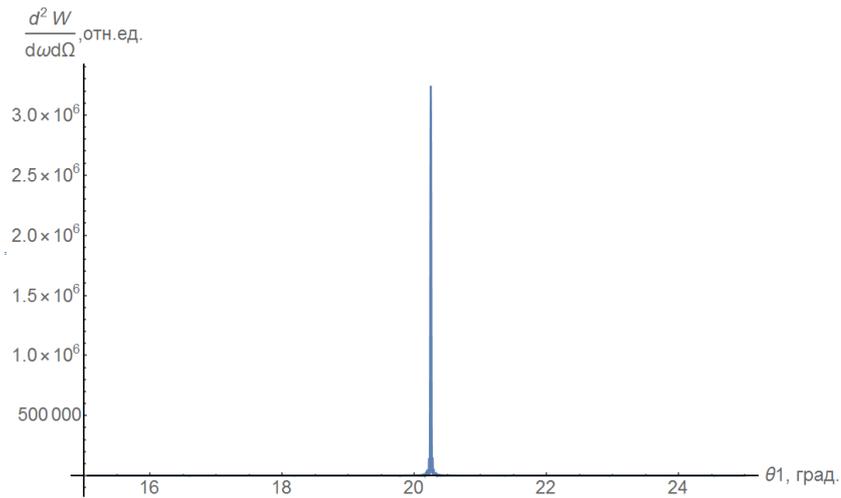


Figure 3 – The intensity of the VCR at  $\lambda = 0.0637$  mm,  $b = 0.239$  mm

Figure 8 shows the minimum values of  $\lambda$  and  $b$  possible for calculation at  $\alpha = 45$  mm, with further reduction an error occurs calculates in the Wolfram Mathematica package, therefore, for these values:

$$\frac{\alpha}{\lambda_{min}} \approx 706.4$$

In further simulations with different values, it was noticed that the reason for this "behavior" in modeling is the restriction imposed on the calculation tool used – the Wolfram Mathematica package.

In this case, the reason was the restriction on the value of intermediate calculations, namely, the exponent argument (2) takes values greater than -720, which corresponds to  $\sim 10^{-313}$ , such a small value disappears when further multiplication with other elements of the formula (1), which leads to obtaining adequate values.

$$\text{Exp}\left[-2 \frac{\omega}{\gamma \beta c} (h + a \text{Cot } \phi) K \cos \alpha\right] \quad (2)$$

Using the calculated value in the future, it is possible to estimate the size of the prism, the aiming parameter for the used values of the Lorentz factor, the wavelength, etc.