

УТВЕРЖДАЮ

Директор Института

доктор физико-математических наук


С.Б. Турунтаев

" 05 " _____ 2022 г

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института динамики геосфер имени академика М.А. Садовского Российской академии наук (ИДГ РАН) на диссертацию Скубачевского Антона Александровича

"Численное моделирование движения заряженной частицы в неоднородной электромагнитной волне", представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 — «Физика атмосферы и гидросферы»

Целью представленной работы является исследование взаимодействия электронов с неоднородными электромагнитными волнами на основе численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений. Изучение процессов взаимодействия электромагнитного излучения с компонентами ионосферной плазмы и, в частности, с электронами крайне важно как при развитии и использовании навигационных технологий, радиосвязи, так и в фундаментальных научных исследованиях. При этом ионосфера выступает как среда распространения для электромагнитных волн, так и объект исследований, в том числе, с помощью активных радиофизических методов. Процессы взаимодействия заряженной компоненты ионосферной плазмы с неоднородными электромагнитными волнами сложной конфигурации естественного и искусственного происхождения недостаточно изучены. Численный расчёт точного решения в широком интервале скоростей электрона при взаимодействии с неоднородной электромагнитной волной представляет несомненный научный интерес. В работе построены не только траектории движения электронов, создаваемые ими структуры, но и исследован спектральный состав тормозного и гиромангнитного излучения электрона в присутствии геомагнитного поля для обыкновенной и необыкновенной неоднородной

электромагнитной волны. Подробное исследование поведения электронов в неоднородных электромагнитных полях в присутствии геомагнитного поля, полях делает работу автора актуальной и значимой. Полученные в работе результаты могут быть использованы при изучении микрофизических процессов в ионосфере с участием электромагнитного излучения, при оценке мощности тормозного и гиромангнитного излучения электрона в поле неоднородной электромагнитной волны, а также процессов инжекции электронов из радиационных поясов.

Диссертация состоит из Введения, четырех глав, заключения и списка литературы. Она содержит 122 страницы текста, включая 62 рисунка и 2 таблицы. Список цитируемой литературы содержит 138 наименований. Во Введении сформулирована цель диссертационной работы: исследование взаимодействия электронов ионосферной плазмы с неоднородными электромагнитными волнами на основе численного решения системы нелинейных дифференциальных уравнений с переменными коэффициентами. Введение также содержит обзор современного состояния исследований движения заряженных частиц в электромагнитных волнах. Кратко описаны используемые в работе современные численные методы. Обоснована актуальность и научная новизна работы, сформулированы решаемые задачи и основные положения, выносимые на защиту.

Глава 1 содержит постановку задачи, описание физико-математической модели движения заряженной частицы в полях неоднородных электромагнитных волн, которая лежит в основе разрабатываемых вычислительных методов.

Глава 2 содержит описание численных методов, в частности, Дормана-Принса и частиц ячейке, с помощью которых выполняется моделирование движения заряженной частицы в неоднородной электромагнитной волне. Проведено тестирование полученных этими методами решений конечно-разностных уравнений движения заряженной частицы в плоской электромагнитной волне, в том числе сравнением с аналитическими решениями и решениями, полученными другими авторами.

Глава 3 содержит основные результаты диссертационной работы по исследованию взаимодействия электрона с неоднородной электромагнитной волной. Рассчитаны траектории электрона в поле обыкновенной и необыкновенной неоднородной электромагнитной волны. Найдены зависимости траектории электрона от начальных координаты и скорости частицы, направляющих углов, несущей частоты и величины электрического поля. Найдены условия, при которых движение частицы не выходит за пределы интерференционной ячейки. Исследована зависимость скорости электрона от амплитуды электрического поля, несущей частоты и параметров исходных электромагнитных волн, формирующих неоднородную волну. Установлена возможность

достижения высоких значений скорости при старте из окрестности максимума интерференционной структуры. Исследовано распределение электронов, инжектированных в неоднородную электромагнитную волну. Обнаружено и исследовано явление концентрирования инжектированных электронов в квазистационарные линейные структуры. Выполнены вычислительные эксперименты по инжекции электронов для обыкновенной и необыкновенной волн. Исследована структура спектра излучения электрона в поле неоднородной электромагнитной волны, и продемонстрирована возможность управлять спектром излучения с помощью амплитуды электрического и магнитного полей, несущей частоты и волновых векторов исходных электромагнитных волн, формирующих неоднородную волну. Установлена зависимость мощности излучения на несущей и циклотронной частоте от начальной фазы, направляющих углов и величины магнитного поля.

Глава 4 посвящена сравнению мощности тормозного и гиромангнитного излучения электрона в поле обыкновенной и необыкновенной волны в ионосфере Земли на высоте E- и F-слоев. Найдены условия, при которых мощность тормозного излучения электрона в поле неоднородной обыкновенной электромагнитной волны превосходит мощность гиромангнитного излучения.

В заключении подведены итоги проделанной работы, перечислены основные результаты, полученные в диссертации.

Результаты работы отражены в публикациях с участием автора, доложены на международных и российских конференциях.

Замечания по диссертации:

1. При тестировании методов расчета в Главе 2 более убедительным было бы привести разность между полученным и образцовым (аналитическим) решением.

2. Следует отметить некоторую нечёткость в постановке задачи движения электронов ионосферной плазмы в поле неоднородной электромагнитной волны. Не определен диапазон энергий электронов, для которых справедливо такое рассмотрение и диапазон плотностей плазмы, в котором такое движение не будет искажаться электрон-электронными столкновениями, коллективными процессами или влиянием нейтральной компоненты плазмы.

В связи с последним замечанием представляет интерес и оценка влияния диссипативных процессов, пределы ускорения электронов с учётом потерь энергии не только за счёт тормозного и гиромангнитного излучения, но и других каналов потерь энергии. Разработка этих вопросов была бы интересным и важным продолжением работы, проделанной в представленной диссертации.

Указанные выше замечания не снижают общей положительной оценки диссертационной работы. Диссертационная работа Скубачевского А.А. выполнена на высоком научном уровне и вносит значительный вклад в изучение взаимодействия неоднородных электромагнитных волн с электронами ионосферной плазмы методами численного моделирования.

Автореферат адекватно отражает содержание диссертации. Представленная диссертация соответствует всем требованиям ВАК РФ, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Ее автор, Скубачевский Антон Александрович, несомненно заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – "Физика атмосферы и гидросферы".

Отзыв заслушан и одобрен общеинститутским семинаром ИДГ РАН

Д.ф.-м.н., научный руководитель Института

Ю.И. Зецер

К.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник

А.Т. Ковалев