

## ОТЗЫВ

**официального оппонента на диссертацию Бова Юлии Игоревны  
«Исследование особенностей распространения радиоволн в ионосферной  
плазме методами бихарактеристик и волновой теории катастроф»,  
представленную на соискание ученой степени кандидата физико-  
математических наук по специальности 1.3.4 – «Радиофизика»**

Работа Бова Ю. И. посвящена изучению особенностей распространения радиоволн декаметрового и дециметрового диапазонов в ионосферной плазме с учетом искусственных и естественных неоднородностей и является преимущественно теоретическим исследованием.

Моделирование ионосферного распространения декаметровых волн является одним из эффективных способов изучения влияния среды на характеристики сигналов беспроводной связи и локации. В последнее время основной интерес связан с распространением широкополосных волновых пакетов, создающих ряд важных преимуществ радиосистемам. При этом среда рассматривается как функция нескольких основополагающих переменных, таких как местоположение радиотрассы, солнечная активность, геомагнитная активность, сезон года и время суток. В этой связи в моделировании распространения волновых пакетов в ионосфере наиболее активно развиваются два подхода, основанных на физической и канальной концепции. В физической модели задача распространения базируется на уравнениях электродинамики, а основной характеристикой среды является профиль электронной концентрации, содержащий E и F слои ионосферы. При этом неотклоняющее поглощение учитывается заданием D слоя. Ее решение связывают с анализом лучевых траекторий и траекторных характеристик сигнала: групповой путь (или абсолютное время распространения сигнала по данной траектории), угол входа и угол выхода луча в вертикальной плоскости, угол прихода луча в горизонтальной

плоскости, дальность скачка луча вдоль земной поверхности, а также флуктуации указанных параметров.

Несмотря на имеющиеся достижения имеют место проблемы исследования тонких эффектов распространения радиоволн в неоднородных средах, к которым относится анализ характеристик поля на огибающих лучевых семействах – каустиках. В этой связи для исследований стали использовать волновую теорию катастроф, построенную на основе теории дифференцируемых отображений и методе канонического оператора В.П. Маслова. Такой подход служит развитию теории распространения коротковолнового излучения в неоднородных средах с частотной дисперсией, а также обобщению геометрической теории дифракции. Таким образом, развитие и применение методов волновой теории катастроф для построения равномерных асимптотических решений задач рассеяния, дифракции и распространения электромагнитных волн в ионосферной плазме и анализ их особенностей **актуально** на данном этапе развития теории и практики. Успешному продвижению вперед способствует современное развитие вычислительной техники.

В настоящей работе развиты математические методы исследования распространения радиоволн коротковолнового диапазона в ионосфере Земли на основе лучевых бихарактеристических методов, теории катастроф и канонического оператора Маслова; создано для их реализации программное обеспечение; получены данные об особенностях распространения частотно-модулированных сигналов с учетом тонких эффектов, в том числе, с учетом искусственных и естественных неоднородностей.

В **первой главе** рассмотрены основные аспекты проблемы распространения ЧМ сигналов в плазме, относящиеся к теме диссертации. Дано описание постановки задачи, приведен вывод основных уравнений электродинамики для неоднородных, анизотропных сред.

**Вторая глава** посвящена анализу влияния ионосферы Земли на параметры радиосигналов (поворот вектора поляризации, фазовый сдвиг,

отклонение угла прицеливания, отклонение траектории радиосигнала от прямой) в Р-диапазоне в зависимости от пространственной модели ионосферной плазмы, географических координат, ориентации магнитного поля, наличия крупномасштабных и мелкомасштабных неоднородностей, а также рассмотрены различные модели неоднородной ионосферы: плоская, сферическая, ночная и дневная, возмущённая и невозмущённая, – с целью проведения сопоставительного анализа качества прогнозируемых результатов.

В **третьей главе** выполнено математическое моделирование распространения ЧМ излучения в анизотропной ионосферной плазме методом бихарактеристик без учета и с учетом горизонтальных градиентов, выбрана модель двухслойной ионосферной плазмы.

В **четвертой главе** проведено исследование особенностей амплитудно-фазовых структур радиосигналов в ионосферной плазме методами расширенной бихарактеристической системы Д.С. Лукина и методом канонического оператора В.П. Маслова. Впервые исследованы проекции 6-мерного фазового пространства на смешанные координатно-импульсные подпространства в случае распространения излучения в ионосферной плазме с учетом спорадического слоя и локальной неоднородности.

В **пятой главе** рассмотрено применение теории краевых катастроф к описанию распространения электромагнитного излучения в нестационарном случае. Разработан метод локальной асимптотики, описывающий дифракционные фокусировки электромагнитных полей в случае, когда семейство первичных и вторичных лучей образуют фокусировки каспидного типа. Выполнено математическое моделирование коэффициентов универсальной деформации, функционального модуля и фазы бегущей волны. Получены явные выражения для параметров универсальной деформации.

В **заключении** представлены полученные в диссертации результаты.

Следует отметить, что развитые в диссертации методы теории краевых катастроф и пространственно-временной геометрической теории дифракции, позволяют моделировать пространственно-временные структуры частотно-

модулированных сигналов в плазменном слое с сильной частотной дисперсией. Выполненные на основе новых методов решения расширенной бихарактеристической системы Д.С. Лукина расчеты амплитуды поля в регулярных и каустических областях при распространении радиоволн с о- и х-поляризации в анизотропной ионосферной плазме, с учетом поглощения среды распространения, получены автором впервые. Вышеперечисленные результаты определяют научную **новизну** данной работы.

Полученные теоретические результаты и модельные расчеты хорошо согласуются с выводами работ других авторов, многократно докладывались и обсуждались на всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и семинарах, что свидетельствует об их **обоснованности**. **Достоверность** сделанных в работе выводов обуславливается тем, что они получены на основе современных лучевых методов (в частности метода бихарактеристик), методов волновой теории катастроф, метода канонического оператора В.П. Маслова, а также современных методов численного моделирования.

Основные научные результаты, вошедшие в основу защищаемых положений диссертации, опубликованы в 51 научной работе. Из них 21 статья опубликована в журналах, рекомендованных ВАК, 15 статей в изданиях, входящих в базы данных Web of Science и (или) Scopus.

Автореферат диссертации достаточно полно раскрывает ее содержание.

К работе имеется ряд **замечаний**:

1. В работе нет пояснений о характере исследуемых трасс: область анализируемых широт, сезонные условия.

2. Автор, рассматривая особенности распространения частотно модулированных сигналов, приводит анализ частного случая, а именно сигналов с линейно-частотной модуляцией (ЛЧМ).

3. В работе не приводится анализ искажений фазовой структуры ЛЧМ сигнала.

4. В ряде рисунков, в частности 4.14 (а)(б), 4.16 (а)(б) и др., по горизонтальным осям не указаны единицы измерения, которые также не

отражены в подрисуночных надписях и основном тексте диссертации, что затрудняет восприятие.

Перечисленные замечания **не влияют на общую положительную оценку диссертации.**

Таким образом, диссертация представляет собой законченное исследование, **удовлетворяющее требованиям ВАК**, предъявляемым к кандидатским диссертациям по специальности 1.3.4 – «Радиофизика», а ее автор Бова Юлия Игоревна заслуживает присуждения ученой степени **кандидата физико-математических наук.**

Официальный оппонент:

Проректор по научной работе

ФГБОУ ВО «ПГТУ»,

доктор физико-математических наук,

член-корреспондент РАН

Иванов Д.В.



**ЗАВЕРЯЮ**  
Начальник отдела  
по работе с персоналом  
ФГБОУ ВО «ПГТУ»

*А. Макарова С.А.*  
*27.09.2021*

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Поволжский государственный технологический университет» (ФГБОУ ВО «ПГТУ»)

424000, Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, пл. Ленина, дом 3

Тел.: (8362) 45-52-40, E-mail: IvanovDV@volgatech.net