



МИНИСТЕРСТВО ОБОРОНЫ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
(МИНОБОРОНЫ РОССИИ)

**СЕКЦИЯ
ПО ОБОРОННЫМ ПРОБЛЕМАМ
МИНИСТЕРСТВА ОБОРОНЫ
ПРИ ПРЕЗИДИУМЕ
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

119296, г. Москва, Ленинский пр., 64а
Тел., Факс: 495-938-00-34

«5» 04 2025 г. №10216 / 100

Экз. №

УТВЕРЖДАЮ

Председатель
Секции по оборонным проблемам
Министерства обороны
(при Президиуме РАН)
доктор технических наук,
доцент

А.И. Гладышев

«5» апреля 2025 г.



ОТЗЫВ

на автореферат диссертации Михалевой Елизаветы Вячеславовны на тему: «Математическое моделирование влияния неоднородной структуры ионосферы Земли на распространение декаметровых радиоволн» представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Актуальность темы диссертации

Ионосфера оказывает существенное воздействие на распространение электромагнитных волн. Радиоволны, проходящие через ионосферу, испытывают рефракцию, активно поглощаются и рассеиваются на неоднородностях. Последнее вместе с "замираниями", вызываемыми интерференцией, приводит к флуктуациям радиосигналов в точке приема. Ионосфера является сложной динамической системой, на которую влияют солнечный ветер, процессы в нейтральной атмосфере, магнитосфере и на Солнце. Актуальность исследования ионосферы Земли определяется интенсивным развитием различных (наземных и спутниковых) средств связи и диагностики околоземного космического пространства.

Разработка методов теоретического и численного моделирования распространения электромагнитных сигналов в анизотропной диспергирующей среде (ионосфере) с перемещающимися периодическими и локальными возмущениями различного масштаба являются крайне важной задачей для решения широкого круга задач по диагностике как свойств среды распространения различных сигналов в целях радиосвязи, радиолокации, навигации и т.д., так и по определению их источников и характеристик естественных и искусственных возмущений среды.

В диссертации решается актуальная задача разработки методов обработки линейно частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов для определения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), учитывающих образование сложных каустических структур, возникающих на ионограммах наклонного и слабо наклонного зондирования, что необходимо для восстановления характеристик внутренних гравитационных волн.

ПИВ оказывают существенное влияние на распространение радиоволн декаметрового диапазона 4. Совокупный учет всех явлений, связанных с формированием и распространением ПИВ является сложной и до конца не решенной задачей 5. Поэтому разработка методов исследования характеристик таких ионосферных возмущений является весьма актуальной и, помимо прикладных аспектов, будет способствовать лучшему пониманию физических процессов, происходящих при зарождении и распространении ПИВ.

Новизна основных выводов и результатов диссертации

В диссертации получены следующие новые научные результаты.

1. Методом бихарактеристик исследованы особенности распространения радиоволн декаметрового диапазона в ионосфере Земли, содержащей ПИВ, при слабонаклонном радиозондировании и впервые показано, что:

- на частотах радиосигналов, отражающихся в окрестности максимума Е слоя, а также на частотах, отражающихся в окрестности ПИВ возникает каустика и область трехлучевости, кривые группового времени запаздывания и угла выхода радиосигнала от частоты в обоих случаях имеют одну и ту же качественную зависимость;

- расходимости и амплитуды принятых сигналов (без учета поглощения), для о- и х-волны приблизительно одинаковы и отличаются только сдвигом по частоте, расходимость резко убывает в окрестности каустики и резко нарастает при приближении частоты к частоте просачивания волны;

- ионограмма х-волны сдвинута по частоте относительно ионограммы о-волны приблизительно на одну и ту же величину как для модели с ПИВ, так и для невозмущенной модели;

2. Исследованы доплеровское смещение частоты, время группового запаздывания радиосигнала, зависимости углов выхода лучей от положения центра ПИВ при различных частотах и поляризациях электромагнитной волны, а также амплитудная структура поля на поверхности Земли как без учета, так и с учетом поглощения и показано, что:

- при горизонтальном перемещении неоднородности центр кривой доплеровского сдвига смещается в зависимости от поляризации излучения, вид кривой с ростом частоты переходит от синусоидальной формы к пилообразной, кривая группового запаздывания имеет минимум доплеровского сдвига в области влияния ПИВ, а сама область влияния возмущения существенно превосходит её характерный размер;

- при движении ПИВ в горизонтальном и вертикальном направлении возникает каустика структура типа «каустическое острие» (волновая катастрофа A_3), что отражается на доплеровских кривых в виде S-образных линий;

- при описании задержек сигналов от расстояния, S-образным кривым соответствуют «петли времени», фазы лучей между каустиками образуют сечение особенности «ласточкин хвост» (катастрофа A_4);

- не только поле на каустиках, но и среднее значение амплитуды поля в многолучевой области существенно возрастает;

- каустическое острие развивается с ростом начальной частоты, втягиваясь и лучевую структуру, а S-образные структуры и петли времени перемещаются вдоль поверхности Земли при движении ПИВ;

- образование сложных каустик маскирует истинное положение ПИВ, его размеры и мощность.

3. На основе метода расширенной бихарактеристической системы Лукина впервые создан амплитудный метод восстановления эффективной частоты

соударений электронов в ионосферной плазме по данным об ослаблении и запаздывании частотно-модулированных радиосигналов как при вертикальном, так и при слабонаклонном радиозондировании ионосферы Земли в изотропном приближении, а также в случае магнитоактивной ионосферной плазмы. Разработанная методика обработки экспериментальных данных позволяет получить зависимость эффективной частоты соударений от высоты с хорошей точностью

Достоверность и обоснованность результатов

Достоверность результатов исследования обеспечивается использованием при разработке моделей корректным применением методов исследования; корректностью и непротиворечивостью математических выкладок; результатами численного моделирования; совпадением теоретических выводов с результатами известных экспериментов, использованием признанных методик обработки данных и подтверждается результатами практического использования в научных организациях.

Обоснованность результатов исследования обеспечивается следующим: непротиворечивостью полученных результатов и хорошей согласованностью с известными данными других авторов; необходимым объемом моделирования; достаточно широкой апробацией полученных результатов на международных и всероссийских научно-технических и научно-практических конференциях; глубокой проработкой исследуемой тематики с опубликованием полученных результатов и широкой поддержкой научной общественностью.

Теоретическая и практическая значимость работы.

Методы и алгоритмы, развитые в диссертационной работе, позволяют эффективно моделировать распространение радиоволн, отражающихся от ионосферы Земли между передатчиком и приёмником с учетом неоднородности, анизотропии и нестационарности среды распространения.

Разработанные подходы позволяют рассчитывать ионограммы, амплитуды и фазы радиосигналов, восстанавливать эффективную частоту соударений электронов, что с практической точки зрения актуально для решения задач о диагностике ионосферы Земли, прогнозирования каналов КВ радиосвязи, решения задач радиолокации и радионавигации.

Методология и методы исследования.

В диссертации используются различные методы математического моделирования: метод бихарактеристической системы Гамильтона-Лукина, метод расширенной бихарактеристической системы, метод специальных функций волновых катастроф, метод рекуррентных уравнений, а также современные методы компьютерных символьных вычислений.

Замечания и рекомендации

Результаты диссертации в полной мере опубликованы. Это подтверждает высокий уровень проведенных исследований и их апробацию. В то же время, судя по автореферату, могут быть выделены следующие замечания.

В автореферате недостаточно раскрыта суть созданного амплитудного метода восстановления эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме на основе данных об ослаблении и запаздывании частотно-модулированных радиосигналов при радиозондировании ионосферы Земли.

Указанные замечания не снижают значимости полученных результатов и не влияют на общую положительную оценку диссертационного исследования Е.В. Михалевой.

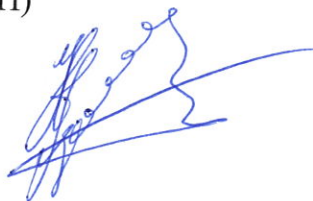
Автореферат диссертации изложен в хорошей логической последовательности и в необходимой степени отражает достигнутые автором результаты и содержание диссертации. Уровень решаемых задач представляется соответствующим требованиям, предъявляемым к диссертациям на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук. Содержание диссертации соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика.

Выводы

1. Диссертация Михалевой Е.В. на тему «Математическое моделирование влияния неоднородной структуры ионосферы Земли на распространение дециметровых радиоволн» выполнена на высоком научно-техническом уровне и соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика.

2. Диссертация представляет собой законченную научно-квалификационную работу, в которой решена актуальная научная задача - разработаны новые методы математического моделирования распространения радиоволн дециметрового диапазона для диагностики перемещающихся ионосферных неоднородностей, а также методы дистанционного мониторинга ионосферы, и удовлетворяет требованиям пункта 9 "Положения о присуждении ученых степеней", утвержденного постановлением правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к кандидатским диссертациям, а ее автор, Михалева Елизавета Вячеславовна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Главный научный сотрудник
Секции по оборонным проблемам
Министерства обороны (при Президиуме РАН)
доктор технических наук, профессор



Ю.В.Помазан

«9» апреля 2025 г.