

УТВЕРЖДАЮ

Первый проректор – проректор по научной
деятельности Федерального
государственного автономного
образовательного учреждения высшего
образования «Казанский (Приволжский)
федеральный университет»,
д.ф-м.н., профессор

Дмитрий Альбертович Таюрский



2025 г.

ОТЗЫВ

ведущей организации на диссертацию Михалёвой Елизаветы Вячеславовны
«Математическое моделирование влияния неоднородной структуры ионосферы
Земли на распространение дециметровых радиоволн», представленную на
соискание учёной степени кандидата физико-математических наук по
специальности 1.3.4 — Радиофизика

Общая характеристика работы

Диссертация состоит из введения, 4 глав и заключения. Полный объём диссертации 176 страниц, включая 127 рисунков и 1 таблицу. Список литературы содержит 121 наименование.

Автореферат полностью отражает содержание диссертации.

Диссертация и автореферат соответствуют пунктам 2, 5 и 7 паспорта научной специальности 1.3.4. – Радиофизика.

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Ионосфера – верхняя часть атмосферы Земли – оказывает существенное воздействие на распространение электромагнитных волн. Ионосфера является сложной динамической системой, на которую влияют солнечный ветер, процессы в нейтральной атмосфере, магнитосфере и на Солнце. Поскольку ионосфера является анизотропной средой, в которой имеют место частотная, пространственная и временная дисперсия, то радиоволны, проходящие через ионосферу, испытывают

рефракцию, активно поглощаются и рассеиваются на неоднородностях. Всё это приводит к значительным флюктуациям параметров радиосигналов в точке приёма. Актуальность исследования ионосферы Земли и особенностей трансионосферного распространения радиоволн определяется интенсивным развитием различных систем связи как наземного, так и космического базирования, а также средств диагностики околоземного космического пространства.

Разработка методов теоретического и численного моделирования распространения электромагнитных сигналов в анизотропной диспергирующей среде 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, 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, в частности, для восстановления характеристик внутренних гравитационных волн.

Моделирование процессов распространения и дифракции электромагнитных волн на основе применения метода бихарактеристик с учетом нестационарности среды распространения и волновой теории катастроф позволяет создавать новые подходы к диагностике тонкой структуры ионосферы Земли. Проведение моделирования также основано на применении методов решения расширенной бихарактеристической системы, описывающей распространение частотно-модулированных сигналов в неоднородной, нестационарной, анизотропной ионосферной плазме, и позволяющий эффективно исследовать каустические структуры и их особенности.

Таким образом актуальность настоящего диссертационного исследования обуславливается необходимостью развития подходов, ранее применяемых для классических исследовательских задач, для анализа влияния ПИВ и перехода к новым методикам расчета характеристик сигналов и решения обратных задач восстановления профилей электронной концентрации и частоты соударений. Ключевые фундаментальные задачи настоящей диссертации состоят в разработке таких новых методик получения характеристик ионосферы при вертикальном и слабонаклонном зондировании ионосферы.

Во введении сформулированы актуальность, цели и задачи работы, научные положения, выносимые на защиту, новизна и достоверность работы, личный вклад

автора, теоретическая и практическая значимость, а также кратко изложено содержание работы.

Первая глава диссертации посвящена постановке задачи и обзору методов моделирования распространения радиоволн в верхней атмосфере Земли. Первый раздел содержит краткое описание структуры верхней атмосферы Земли: ионосферы и магнитосферы. Второй раздел посвящен обзору методов, посвященных математическому моделированию распространения радиоволн. Кратко описаны различные альтернативные лучевому методу подходы: метод нормальных волн, метод параболического уравнения, вариационный подход, а также интегральные подходы и волновая теория катастроф. Третий раздел посвящен бихарактеристическому методу описания распространения радиоволн в ионосфере, активно используемым в диссертационной работе.

Во второй главе в первом разделе рассмотрены перемещающиеся ионосферные неоднородности и их характеристики. Во втором разделе исследованы лучевые, амплитудные и поляризационные характеристики частотно-модулированных радиосигналов, отражённых от ионосферы при вертикальном радиозондировании. Исследована модель электронной концентрации ионосферы Земли, содержащая слои E, F1, F2 и локальную неоднородность с повышенной электронной концентрацией. Рассмотрено распространение как обыкновенной, так и необыкновенной волн. Установлено, что без учета поглощения амплитуда отраженного сигнала убывает с ростом частоты, в то время как с учетом поглощения, наоборот, нарастает. Неоднородности ионосферы, обусловленные слоем E и дополнительной локальной неоднородностью, проявляются на амплитудных зависимостях в виде локальных минимумов. По размеру и интенсивности искажений амплитудных зависимостей можно судить о величине неоднородности.

В третьем разделе методом бихарактеристик исследованы особенности распространения радиоволн декаметрового диапазона (~2-8 МГц) в ионосфере Земли, содержащей слои E, F1 и F2 при слабо наклонном радиозондировании. Изучена невозмущенная модель электронной концентрации и возмущенная модель, содержащая ПИВ-гладкую ионосферную неоднородность. Рассмотрено распространение как обыкновенной, так и необыкновенной волны в магнитоактивной плазме. Выполнено численное моделирование ионограмм слабонаклонного зондирования ЛЧМ сигналами и показано, что ионограмма необыкновенной волны оказывается сдвинута по частоте относительно ионограммы обыкновенной волны приблизительно на одну и ту же величину как для невозмущенной, так и для возмущенной модели. Показано, что на частотах радиосигналов, отражающихся в окрестности максимума E слоя, а также на частотах, отражающихся в окрестности ПИВ, возникает каустика и область трехлучевости. Установлено, что зависимости

группового времени запаздывания сигнала от частоты и угла выхода радиосигнала от частоты в обоих случаях имеют одну и ту же качественную зависимость. Показано, что расходимости лучевых потоков и амплитуды принятых сигналов (без учета поглощения, обусловленного частотой соударений электронов в плазме) 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.

В третьей главе на основе бихарактеристической системы выполнено математическое моделирование распространения декаметровых радиоволн на слабонаклонных трассах из источника в приемник при наличии ПИВ. Рассмотрено перемещение неоднородности как в горизонтальном направлении, так и в вертикальном направлении (снизу вверх). Исследованы доплеровское смещение частоты, время группового запаздывания радиосигнала, а также зависимости углов выхода лучей от положения центра ПИВ при различных частотах и поляризациях электромагнитной волны. Показано, что при горизонтальном перемещении неоднородности от приёмника к передатчику 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. Установлено, что при движении ПИВ в верхнем ионосферном слое в горизонтальном направлении возникает каустическая структура типа «каустическое остриё» (катастрофа А3), что отражается на доплеровских кривых в виде S-образных линий. Исследована фазовая структура в трехлучевой области между каустиками и показано, что фазы лучей образуют сечение особенности «ласточкин хвост» (катастрофа А4).

Методом расширенной бихарактеристической системы с привлечением результатов волновой теории катастроф рассчитана амплитудная структура поля на поверхности Земли как без учета, так и с учетом поглощения и показано, что не только поле на каустиках, но и среднее значение амплитуды поля в многолучевой области существенно возрастает. Рассмотрены равномерная и неравномерная асимптотики.

Показано, что при вертикальном перемещении также возникает трехлучевая область, характеризующаяся повышенными значениями доплеровского смещения и группового запаздывания. Исследовано влияние частоты на образование катастроф А3 и показано, что каустическое остриё развивается с ростом начальной частоты, стягиваясь в лучевую структуру. Исследовано влияние положения центра ПИВ на образование катастроф А3 и показано, что S-образные структуры и петли времени перемещаются вдоль поверхности Земли при движении ПИВ.

В четвёртой главе создан амплитудный метод восстановления эффективной частоты соударений электронов в ионосферной плазме на основе данных об ослаблении и запаздывании частотно-модулированных радиосигналов при вертикальном и наклонном радиозондировании ионосферы Земли. На основе метода расширенной бихарактеристической системы выполнено численное моделирование как в случае однослойной, так и двухслойной модели ионосферы. Рассмотрено изотропное приближение, а также случай магнитоактивной ионосферной плазмы. Для реконструкции эффективной частоты соударений электронов в ионосфере Земли на основе амплитудных данных об ослаблении ЧМ радиосигнала получена рекуррентная система решения интегрального уравнения Вольтерра. В работе выполнен численный эксперимент, сопоставлены результаты моделирования лучевых траекторий и амплитудных характеристик для волн О- и Х-поляризации и показано, что для обыкновенной волны, а также в изотропном случае, получено хорошее совпадение исходных значений эффективной частоты соударений и расчётных значений.

Таким образом, разработанная методика обработки экспериментальных данных позволяет получить зависимость эффективной частоты соударений от высоты с хорошей точностью.

В заключении сформулированы научные результаты, полученные в диссертации.

Новизна научных результатов

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.

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 каустическая структура типа «каустическое остриё» (волновая катастрофа А3), что отражается на доплеровских кривых в виде S-образных линий; при описании зависимости задержек сигналов от расстояния, S-образным кривым соответствуют «петли времени», фазы лучей между каустиками образуют сечение особенности «ласточкин хвост» (катастрофа А4); среднее значение амплитуды поля в многолучевой области существенно возрастает; каустическое остриё развивается с ростом начальной частоты, втягиваясь в 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.

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.

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.

Конкретные рекомендации по использованию результатов и выводов, представленных в работе

Представленные в диссертации новые научные результаты, а также предложенные методы и подходы чрезвычайно важны в том числе и с практической точки зрения. Использование этих результатов позволит более эффективное построение КВ каналов связи. Кроме этого, предложенные в работе подходы позволят получать более точные данные о частоте соударений электронов для E и F слоёв при зондировании ионосферы ЛЧМ сигналами, что, в свою очередь, позволит уточнить существующие модели ионосферы.

Замечания по диссертационной работе

1. Стр. 34. Из рисунка – 2.2.1 и формул 2.2.1-2.2.3 следует, что в модельном профиле электронной концентрации локальное возмущение наложено в максимуме слоя F1. Однако не приведено никаких физических соображений, почему было выбрано именно такое местоположение для ионосферной неоднородности.
2. Стр. 36. В формулы 2.2.8 входит параметр H_0 – величина напряженности магнитного поля Земли. В работе сказано, что «($H_0 = 0.465$ Э)», однако нет никаких указаний, откуда взялось это значение. Это значение получено на основании какой-либо модели? Какой модели? Либо это среднее значение напряженности магнитного поля Земли для какой-то местности, но тогда необходимо указать географические координаты этого места.
3. В диссертационной работе активно используется термин – эффективная диэлектрическая проницаемость (стр. 23, 24, 26, 35, 46, 66, 79, 92, 112, 130, 131, 145, 159), который предполагает использование модели эффективной гетерогенной среды. Модель эффективной среды применима, если характерные размеры включений и расстояний между ними в матричной гетеросистеме (или компонентов сред в статистической гетеросистеме) малы по сравнению с длиной волны. В общем случае для нахождения эффективной диэлектрической проницаемости необходимо провести усреднение по объёму, зная при этом распределение мелкомасштабных неоднородностей в этом объеме. Очевидно, что в работе используется относительная диэлектрическая проницаемость (см., например, выражения 2.2.6, 2.2.10, 3.2.6, 4.3.8).
4. Необходимо сказать, что диссертационная работа и автореферат диссертации в целом хорошо и аккуратно оформлены. Однако согласно ГОСТ Р 7.0.11-2011 «Диссертация и автореферат диссертации. Структура и правила оформления» подрисуночные подписи следует оформлять следующим образом: «Рисунок 1 – Подрисуночная подпись», соответственно, в тексте ссылки на рисунки выполняются так: «на рисунке 1...».

Указанные замечания не снижают научную ценность исследования и не влияют на положительную оценку диссертационной работы в целом.

Заключение

Диссертационная работа Михалёвой Е.В. «Математическое моделирование влияния неоднородной структуры ионосферы Земли на распространение декаметровых радиоволн», представленная на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук, является законченной научно-квалификационной работой. В работе содержится решение актуальной научной задачи, связанной с разработкой новых методик получения характеристик ионосферы при вертикальном и слабонаклонным зондировании.

В соответствии с пунктом 9 Положения о присуждении ученых степеней, утвержденного постановлением Правительства РФ № 842 от 24.09.2013 г., диссертационная работа является научно-квалификационной работой, в которой изложены новые научно обоснованные решения, позволяющие моделировать распространение частотно-модулированных сигналов в неоднородной, нестационарной, анизотропной ионосферной плазме, а также эффективно исследовать каустические структуры и их особенности.

В соответствии с пунктом 10 диссертация написана автором самостоятельно, обладает внутренним единством, содержит новые научные результаты и положения, выносимые на публичную защиту, и свидетельствует о личном вкладе автора диссертации в науку.

В соответствии с пунктами 11 и 13 основные научные результаты исследований опубликованы в 27 трудах, в том числе 10 в научных статьях, опубликованных в журналах, входящих в международные системы цитирования Web of Science и Scopus, 7 – в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ, 10 – в трудах Всероссийских конференций, 5 – в трудах Международных конференций.

Отзыв подготовлен кандидатом физико-математических наук, заведующим кафедрой радиоэлектроники Института физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет» Насыровым Игорем Альбертовичем.

Отзыв рассмотрен и одобрен на заседании объединённого семинара кафедр радиоэлектроники, радиофизики и радиоастрономии Института физики федерального государственного автономного образовательного учреждения высшего образования «Казанский (Приволжский) федеральный университет», протокол № 1 от 3 апреля 2025 г.

Заведующий кафедрой
радиоэлектроники Института физики
Казанского федерального университета
кандидат физ.-мат. наук, доцент



Насыров Игорь Альбертович

Подпись Насырова И.А. заверяю

**Ведущий специалист
- по персоналу**



Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Казанский (Приволжский) федеральный
университет»

Адрес: 420008, г. Казань, ул. Кремлевская, 18.

Телефоны: +7 (843) 233-71-09 - справочная;

+7 (843) 233-74-00 - приемная ректора.

Электронная почта: public.mail@kpfu.ru

Сайт: <https://kpfu.ru>