

**Отзыв**  
**официального оппонента**  
**Захарова Виктора Ивановича**  
**на диссертационную работу 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»**

Открытие ионизованных слоев верхней атмосферы привело к появлению практики использования УКВ излучения для нужд связи. Создание спутниковых систем сместило центр тяжести связных приложений в область ВЧ и широкополосных частотно и фазоманипулированных сигналов. Однако современное развитие методов дистанционной диагностики параметров ионосферы и моделирование её состояния показывают, что роль чисто ионосферного УКВ-канала радиосвязи в настоящее время оказалась несколько недооцененной для ряда практических приложений. При этом исследование особенностей распространения ВЧ сигналов на радиотрассах различной геометрии и ионосферной пространственно-временной топологии представляет собой не только практически важную, но и значительную с теоретической точки зрения задачу. Её усугубляет наличие флуктуационной структуры ионосферы, которая является характерным состоянием этой среды и причиной рассеяния и различных дифракционных эффектов.

В рассмотренной постановке **тема представленной диссертации Бова Ю.И. является актуальной и важной** как для целей дистанционного зондирования и связи, так и для целого ряда прикладных задач.

Оппонируемая работа посвящена изучению особенностей распространения радиоволн дециметрового и декаметрового диапазонов в ионосфере Земли на основе современных математических методов, развиваемых в диссертации.

В работе разработаны алгоритмы и методы, позволяющие эффективно проводить моделирование пространственно-временных частотно-модулированных сигналов КВ диапазона в анизотропной ионосфере и тем самым решить фундаментальную задачу описания особенностей распространения радиоволн в холодной плазме при наличии каустик и в областях отражения. Развитые автором подходы показали свою работоспособность и могут применяться в задачах радиосвязи, радиолокации, загоризонтного радиозондирования и дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса.

Тема диссертации соответствует заявленной научной специальности.

Диссертация содержит введение, пять глав, заключение и список литературы; изложена на 221 странице и включает 243 рисунка и 4 таблицы. Список цитируемой литературы представлен на 28 страницах и содержит 207 ссылок.

**Во введении** дана общая характеристика работы, сформулированы актуальность темы диссертации, цель диссертации, решаемые в работе задачи и методы исследования; определены научная новизна, практическая значимость и достоверность полученных результатов; представлены основные положения, выносимые на защиту и личный вклад автора; приведены данные о структуре и объеме диссертационной работы и публикациях автора. Кратко изложено содержание диссертации.

**В первой главе** на основе уравнений Максвелла сформулирована постановка известной задачи о распространении радиоволн в неоднородной анизотропной холодной плазме. Рассмотрены основные понятия пространственно-временной геометрической оптики и приведен вывод бихарактеристической системы уравнений. Изложены основные понятия пространственно-временной волновой теории катастроф.

**Во второй главе** проведена оценка влияния ионосферы Земли на работу бортовых радиолокаторов с синтезированной апертурой (РСА). Проведено комплексное исследование влияния ионосферы Земли на параметры радиосигналов. Рассмотрены поворот вектора поляризации (фарадеевское вращение), девиация фазы, отклонение угла прицеливания, отклонение траектории радиосигнала от прямой в диапазоне 430–436 МГц в зависимости от пространственной модели ионосферной плазмы, географических координат, ориентации магнитного поля, наличия крупномасштабных неоднородностей.

Совместные эффекты влияния поворота поляризации электромагнитного поля за счет ионосферы и частичной деполяризации на шероховатой земной поверхности представляет проблему при интерпретации получаемых радиолокационных результатов. В работе на модельных данных показано, что предложенные методы и алгоритмы расчетов указанных параметров позволяют прогнозировать поправки к данным фазовых и поляризационных измерений, что важно, поскольку способствует развитию методик внешней калибровки изображений РСА.

**Третья глава** посвящена математическому моделированию распространения в анизотропной ионосферной плазме как стационарных, так и частотно-модулированных радиоволн декаметрового диапазона. На основе развитых автором методов и алгоритмов проанализированы особенности выхода о- и х-поляризованных волн с из плоскости распространения и образование каустик пространственно-временных геометрооптических лучей. Исследовано распространение радиоволн в межслоевом канале и выявлен эффект запирания излучения в канале для определенных частот или их полосы. В частном случае аналитической модели ионосферы с перемещающимися волнообразным

возмущением изучено доплеровское изменение частоты и показано, что изменение частоты вдоль луча носит осциллирующий характер и в квазиреальных параметрах моделирования может достигать до нескольких Гц, а в вертикальных направлениях при некоторых значениях параметров составляет около 7 Гц.

**В четвертой главе** разработана и реализована методика расчета абсолютных значений напряженности электромагнитного поля с учетом расходимости и отклоняющего поглощения в анизотропной среде распространения, а также каустических образований на примере ночной и дневной высокоширотной модели ионосферы Земли. С этой целью автором в работе исследованы проекции 6-мерного фазового пространства на смешанные координатно-импульсные подпространства при распространении излучения в ионосферной плазме с учетом спорадического слоя и локальной неоднородности, развита методика расчета амплитудных множителей вдоль лучей для разных канонических карт. В принципе глава показывает возможности использования созданных методов и алгоритмов для решения задач определения напряженности поля в среде.

**Пятая глава** посвящена применению теории катастроф к описанию распространения электромагнитного излучения в нестационарном случае. Разработан комплекс программ для описания каустической структуры краевой катастрофы, возникающей при совместной каспидной пространственно-временной фокусировке электромагнитного излучения волны в плазменном слое с сильной частотной дисперсией. Для ряда частных случаев получены выражения для параметров универсальной деформации.

В **заключении** сформулированы основные результаты, полученные в ходе диссертационных исследований.

В целом диссертация **является законченным научным трудом**, хорошо оформленным, результаты которого соответствуют поставленным целям и задачам. Диссертация и автореферат ясно написаны и содержат богатый иллюстративный материал. Интерпретация полученных результатов в целом **достоверна** и не противоречит известным физическим теориям и результатам других авторов. Разные аспекты работы докладывались на многочисленных конференциях и широко опубликованы.

К **научной новизне** работы можно отнести следующие основные результаты:

1. На основе новых методов решения пространственно-временной бихарактеристической системы, выполнено исследование радиофизических особенностей распространения частотно-модулированных сигналов в ионосфере Земли с учетом нестационарности среды распространения, магнитного поля, горизонтальных градиентов и крупномасштабных неоднородностей.

2. С использованием методов решения расширенной бихарактеристической системы Лукина выполнены расчеты амплитуды поля в регулярных и каустических

областях при распространении радиоволн обыкновенной и необыкновенной поляризации в анизотропной ионосферной плазме с учетом поглощения.

3. На примерах пространственного распределения электронной концентрации проведено исследование влияния параметров моделей ионосферной плазмы на вариации фазы радиосигнала и фарадеевское вращение плоскости поляризации при распространении дециметрового излучения в ионосфере Земли в зависимости от времени наблюдения, широты, наличия локальных ионосферных неоднородностей и др.

4. На основе метода канонического оператора В.П. Маслова и волновой теории краевых катастроф разработаны новые аналитические методы моделирования пространственно-временной структуры частотно-модулированных сигналов в плазменном спорадическом слое и локальной неоднородности с сильной частотной дисперсией.

**Теоретическая и практическая значимость работы** состоит в следующем:

1. С теоретической точки зрения методы и алгоритмы, развитые и реализованные в диссертации, позволяют эффективно исследовать особенности распространения стационарных и частотно-модулированных сигналов в ионосферной плазме с учётом внешнего магнитного поля, неоднородностей среды распространения и нестационарности, а также при наличии локальных возмущений.

2. Разработанные в работе алгоритмы могут быть практически использованы для радиозондирования верхней атмосферы Земли, при решении задач коротковолновой радиосвязи и радионавигации, в частности для анализа и краткосрочного прогноза условий распространения и приема ионосферных сигналов, как в спокойных, так и в возмущенных условиях.

В целом диссертация **является законченным научным трудом**, хорошо оформленным, результаты которого соответствуют поставленным целям и задачам. Диссертация и автореферат ясно написаны и содержат богатый иллюстративный материал. Интерпретация полученных результатов в целом **достоверна** и не противоречит известным физическим теориям и результатам других авторов. Разные аспекты работы докладывались на многочисленных конференциях и широко опубликованы.

**Научная новизна и достоверность научных результатов** подтверждается публикациями в рецензируемых научных журналах, обсуждениями на конференциях и семинарах. Все результаты имеют строгое математическое обоснование и не противоречат результатам известных экспериментов и модельных расчётов. Разные аспекты работы докладывались на многих конференциях и широко опубликованы - по теме диссертации **опубликовано 51 научная работа**. Из них **21 статья опубликована в журналах, рекомендованных**

**ВАК** для публикации основных научных результатов. В том числе **15 публикаций** входят в библиографические и реферативные базы данных **Web of Science** и (или) **Scopus**.

**Содержание диссертации соответствует требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям.**

**Автореферат** полностью и в целом адекватно отражает содержание диссертационной работы.

Вместе с тем, к рассмотренной диссертационной работе можно высказать **ряд критических замечаний**.

1. К сожалению, в диссертации не проводилось сопоставление результатов экспериментов и моделирования особенностей распространения УКВ-сигналов в магнитоактивной плазме.

2. В диссертации рассмотрено значительное число сугубо аналитических моделей ионосферы - например, см. стр.60. Не всегда ясно, почему в каждом конкретном случае рассматривается именно выбранная модель. Так, одна неоднородность на уровне максимума в модели на рис. 7а не может описать структуру сколь-нибудь сложного возмущения. Более того, использование моделей для выбранной широты и локального времени явно ставят на повестку дня вопрос о применимости получаемых результатов в других условиях или величин отклонений от рассмотренных эффектов в новых условиях.

3. Оценки доплеровских сдвигов в гл. 3 при моделировании ПИВ зависят от выбранной модели. Вместе с тем нигде в работе актуальность используемой модели не обсуждается. В таких оценках можно рекомендовать привести интервал возможного изменения изучаемых параметров, но и в этом случае адекватность модели нуждается в верификации.

4. В ряде случаев автор не дает полную физическую интерпретацию получаемых результатов. В самом деле, лучевые траектории, формирующие каустическую структуру, отличаются групповым запаздыванием, что можно было бы исследовать в работе. Это может быть существенным при интерпретации экспериментов по дистанционному зондированию.

Перечисленные замечания и недостатки в **целом не снижают общий высокий уровень** диссертации, но показывают её теоретическую актуальность в плане разработки методов анализа и интерпретации параметров радиосигналов при их распространении в неоднородных средах на примере ионосферы.

**Материалы диссертации могут быть полезны** широкому кругу специалистов, занимающихся научно-исследовательской работой в области физики процессов распространения электромагнитного излучения УКВ и ДКМ диапазонов,

различных приложений навигационного, связного характера, при разработке новых методов дистанционной диагностики. Результаты могут быть использованы в ряде научных учреждений, в частности, Институте прикладной геофизики имени академика Е.К. Федорова Росгидромета, Институте космических исследований РАН, ИЗМИРАН, ПГИ Кольского отделения РАН и т.д, коллективы которых занимаются исследованиями в указанных и смежных областях.

Итак, диссертационная работа **Бова Юлии Игоревны «Исследование особенностей распространения радиоволн в ионосферной плазме методами бихарактеристик и волновой теории катастроф»** удовлетворяет требованиям ВАК, предъявляемым к диссертационным работам на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук, а ее автор заслуживает присвоения ей **ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – Радиофизика.**

Официальный оппонент –  
к. ф.-м. н., доцент кафедры физики атмосферы  
Физического факультета МГУ  
им. М.В. Ломоносова  
e-mail : [zvi\\_555@list.ru](mailto:zvi_555@list.ru) или [zakharov.vi@physics.msu.ru](mailto:zakharov.vi@physics.msu.ru)  
тел. +7 915 0022144



Захаров В.И.

Декан Физического факультета МГУ  
им. М.В. Ломоносова, профессор



Сысоев Н.Н.