

## ОТЗЫВ ОФИЦИАЛЬНОГО ОППОНЕНТА

Крюковского Андрея Сергеевича

на диссертационную работу

### «МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН В МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ»

Семёновой Надежды Александровны,  
представленную на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук  
по специальности 1.3.4. – «Радиофизика»

Рецензируемая диссертация посвящена применению лучевых методов для уточнения интерпретации результатов экспериментов по наблюдению и генерации ионосферных возмущений. Перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ), а также ионосферные неоднородности, создаваемые искусственно и приводящие к генерации искусственного радиоизлучения и оптического свечения, в настоящее время активно изучаются как с чисто научной точки зрения, так и для решения разнообразных прикладных задач, в частности, для повышения надёжности и точности спутниковой радиосвязи и позиционирования. Поэтому создание пакетов программ, пригодных для анализа и моделирования распространения радиоволн в возмущённой среде, а также при обработке экспериментальных данных по нагреву ионосферной плазмы является **актуальной**.

**Первую главу** диссертации автор посвятила методу геометрической оптики. Изложена методика расчётов лучевых траекторий в магнитоактивной ионосферной плазме. Приведены формулы для вычисления лучевых траекторий в плоскостной среде в декартовой системе координат, а также в трёхмерной сферической системе координат. На основе данных пакета IRI2016 предложена модель электронной концентрации, дополненная системой неоднородностей, и приведены примеры численного

моделирования распространения радиоволн декаметрового диапазона в ионосфере Земли. Исследовано изменение поляризации волны вдоль луча в случае горизонтально-однородной ионосферы, что представляет несомненный интерес.

**Вторая глава** посвящена более подробному моделированию распространения радиоволн в ионосфере. Дана интерпретация результатов лучевого исследования неоднородной структуры ионосферы, искусственного радио- и оптического излучения из возмущённой области ионосферы, применительно к результатам экспериментов по воздействию мощного коротковолнового (КВ) радиоизлучения на ионосферу, полученных на стендах «Сура» и HAARP. Результаты расчётов позволили объяснить наблюдаемые в экспериментах особенности спектра искусственного радиоизлучения ионосферы вблизи четвёртой гирогармоники, а также положение пятна искусственного оптического свечения. Проанализирована возможность захвата электромагнитной волны в крупномасштабную неоднородность в возмущённой области ионосферы в зависимости от параметров неоднородности и её расположения.

**В третьей главе** сопоставлены данные экспериментов по ракурсному рассеянию волн, выполненные на стенде «Сура», с результатами расчётов лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов. Рассчитанное время распространения сигнала возвратно-наклонного зондирования совпадало с экспериментально наблюдаемым временем задержки.

Работа ионозонда осуществлялись в двух режимах. В первом случае были определены положение и размеры области над стендом «Сура», характерные масштабы искусственных декаметровых неоднородностей и их динамические характеристики в зависимости от высоты генерации и времени суток. Во втором случае были определены зависимости характерных поперечных геомагнитному полю размеров искусственных рассеивающих

неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние волн данного диапазона, и положения области рассеяния от частоты зондирующих сигналов.

**В четвертой главе** исследованы характеристики перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), полученные при моделировании КВ распространения на коротких трассах и трассе большой дальности. В качестве исходных данных использовались дистанционно-частотная характеристика (ДЧХ) наклонного зондирования.

В случае коротких трасс возмущение профиля электронной концентрации при прохождении ПИВ моделировалось гармонической функцией. Получена оценка азимута направления перемещения ПИВ и величины скорости в этом направлении.

Для длинной трассы моделирование возмущения профиля электронной концентрации ионосферы при прохождении ПИВ задавалось в виде периодической структуры с определенным числом периодов, которая моделировалась гармонической функцией, экспоненциально ограниченной по высоте. Выполнено исследование влияния параметров модели неоднородностей на форму  $z$ -следа на графике ДЧХ, определяющих градиент, наклон фронта неоднородности и взаимную ориентацию трассы и ПИВ.

На основе подбора параметров модели по наилучшему совпадению результатов моделирования с экспериментально зарегистрированными ДЧХ наклонного зондирования ионосферы сделаны выводы о размерах, расположении в пространстве, направлении перемещения и скорости движения ПИВ.

**Основными новыми научными результатами диссертации являются:**

1. Показано, что обнаруженный в эксперименте эффект уменьшения интенсивности искусственного радиоизлучения (ИРИ) при частотах волны накачки (ВН) ниже четвертой гармоники электронной циклотронной частоты связан с уменьшением высоты отражения при больших углах падения и разницей дисперсионных свойств плазменных волн. Показано, что снижение интенсивности ИРИ при наклоне центрального луча диаграммы направленности (ДН) связано со свойствами поляризации ВН при различных углах наклона ДН стенда по отношению к направлению магнитного поля.

2. Установлено, что возрастание интенсивности ИРИ определяется распространением отражённой ВН вдоль геомагнитного поля и усилением её взаимодействия с ионосферой на нисходящем участке траектории.

3. Установлено, что смещение пятна свечения искусственного оптического свечения (ИОС) связано с увеличением высоты области плазменного резонанса и высыпанием электронов вдоль геомагнитного поля на высоты, где имеет место генерация оптического свечения в красной линии атомарного кислорода.

4. Показано, что наблюдение пятна ИОС в магнитном зените связано с фокусировкой ВН на крупномасштабных неоднородностях.

5. Установлено местоположение области и характеристики рассеивающих неоднородностей, ответственных за обратное ракурсное рассеяние радиоволн при различных частотах зондирующих сигналов. Развита методика определения положения неоднородностей.

6. Определены параметры ПИВ, наблюдаемых в эксперименте.

**Достоверность и обоснованность** научных результатов диссертации основана на применении корректных математических методов, привлечением современных моделей и проверкой на экспериментальных данных.

Результаты диссертации не входят в противоречие с результатами, опубликованными ранее.

**По тексту диссертационной работы можно сделать следующие замечания:**

1). В работе используется неудачная запись системы лучевых уравнений (бихарактеристической системы, формулы (1.1)–(1.2)), что приводит к необходимости вводить дополнительное уравнение (1.6) для вычисления задержки сигнала. Поскольку автор при построении лучевых траекторий рассматривала стационарные среды, параметром интегрирования можно было бы сразу выбрать групповое время.

2) К сожалению, автор не рассматривает изменение амплитуды волны как за счёт расходимости лучевого потока, так и в результате поглощения. Правильный учёт этих величин мог бы существенно сказаться на интерпретации результатов.

3) На стр. 23 автор пишет: «Из рисунка 1.2б видно, что при малых углах падения волны на ионосферу лучи достигают области плазменного резонанса ..., причём высота отражения в этих условиях не зависит от угла падения». Но из этого рисунка видно, что зависит.

4) Во второй главе диссертации автор применяет лучевые методы для исследования ВН, излучения, модифицирующего ионосферу. Строго говоря лучевые методы здесь напрямую неприменимы, и следует решать самосогласованную задачу, поскольку в ходе нагрева меняется эффективная диэлектрическая проницаемость среды. К сожалению, в работе это не сделано.

5) На рис. 2.5 «тонкими линиями на восходящих и нисходящих участках траекторий ВН в плоскости магнитного меридиана изображены участки квазипродольного распространения волны» (условие (2.1)), а «жирными линиями показаны участки квазипоперечного распространения» (условие (2.2)) (стр. 43). Но где же промежуточная зона?

б) Существенным объектом исследования могли бы стать каустические фокусировки, которые автор, ссылаясь на рис. 2.14 а, называет «узлами» и «пучностями». Для этого было бы целесообразно рассматривать в работе не отдельные лучи, а лучевые семейства.

7) Названия некоторых разделов: «Об уменьшении...», «О смещении...», «О влиянии...» нельзя признать удачными.

Указанные недостатки не снижают научной ценности работы. Особо следует отметить тесную связь результатов математического моделирования с экспериментами и аккуратность в оформлении работы.

Автореферат соответствует тексту диссертации и корректно описывает полученные результаты.

Согласно паспорту специальности 1.3.4 (Радиофизика) результаты работы относятся к направлению исследований: «2. Изучение линейных и нелинейных процессов излучения, распространения, дифракции, рассеяния, взаимодействия и трансформации волн в естественных и искусственных средах.»

Рецензируемая диссертация является научно-квалификационной работой, в которой содержится решение научной задачи, имеющей значение для развития соответствующей отрасли знаний (радиофизики).

Работа прошла апробацию на российских и международных конференциях. По материалам диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 7, включённых в список ВАК.

Отмеченное выше позволяет утверждать, что диссертационная работа Семёновой Надежды Александровны «Моделирование распространения КВ радиоволн в магнитоактивной плазме в задачах исследования характеристик ионосферных возмущений», соответствует всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям (пункты 9-14 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением

Правительства РФ от 24 сентября 2013 г. № 842, а её автор заслуживает присуждения ей учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. – «Радиофизика».

**Официальный оппонент:**

Заведующий кафедрой информационных технологий и естественнонаучных дисциплин автономной некоммерческой организации высшего образования «Российский новый университет» (АНО ВО «РосНОУ»), Лауреат Государственной премии СССР, доктор физико-математических наук (специальность 01.04.03 Радиофизика), профессор



Крюковский Андрей Сергеевич

«29» 04 2026 г.

Адрес: 105005, г. Москва, ул. Радио, д. 22

Телефон: +7-903-245-51-37

E-mail: kryukovsky56@yandex.ru



*Крюковский А.С.*

*Бехтина В.В.*