

ОТЗЫВ

официального оппонента на диссертационную работу Семеновы Надежды Александровны «Моделирование распространения КВ радиоволн в магнитоактивной плазме в задачах исследования характеристик ионосферных возмущений», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика

Ионосфера Земли является естественной плазменной лабораторией. В связи с этим изучение процессов в ней протекающих во время контролируемых искусственных воздействий, в частности мощного КВ радионагрева, являются актуальными и представляют большой интерес для физики плазмы. Одними из наиболее исследуемых эффектов мощного КВ нагрева ионосферы являются искусственное радиоизлучение ионосферы (ИРИ) и искусственное оптическое свечение (ИОС). К настоящему моменту развиты теории описывающие спектр ИРИ и механизм генерации ИОС, однако оставался открытым вопрос объяснения особенностей интенсивности ИРИ в окрестности четвертой гирогармоники и области локализации ИОС при различных наклонах диаграммы направленности нагревного стенда. Для этого необходимо знать особенности распространения волны накачки (ВН) и пробных радиоволн в искусственно возмущенной ионосфере. Не менее важным при этом оказывается необходимость оценки параметров фоновой ионосферы, особенно в присутствии перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ). Решению данных задач с использованием приближения геометрической оптики и посвящена диссертационная работа Семеновы Н.А.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы.

Во введении приведен обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы ее цель и задачи, указаны научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы, приведены основные положения, выносимые на защиту, указан личный вклад автора в полученные результаты.

В первой главе изложена методика расчетов лучевых траекторий в трехмерной неоднородной анизотропной ионосфере в приближении геометрической оптики на основе метода характеристик. Данная глава является методической основой для интерпретации результатов нагревных экспериментов и оценки параметров естественных ПИВ, которые рассматриваются в последующих главах.

Во второй главе на основе разработанных алгоритмов моделирования распространения ВН в возмущенной ионосфере была дана детальная интерпретация ряда экспериментальных результатов, полученных на нагревных стендах HAARP и «Сура». В частности объяснены наблюдаемые особенности спектра ИРИ вблизи 4-й электронной гирогармоники и локализации пятна ИОС на небосводе при различных ориентациях диаграммы направленности нагревного стенда. С точки зрения

оппонента, результаты приведенные в данной главе являются основным достижением диссертации.

Третья глава посвящена сопоставлению результатов по ракурсному рассеянию, полученных во время экспериментов по модификации ионосферы на стенде «Сура» с результатами численного моделирования распространения рассеянной КВ радиоволны. Это позволило оценить параметры и локализацию неоднородностей, отвечающих за наблюдаемый эффект обратного ракурсного рассеяния на трассе Казань–Васильсурск–Казань.

Четвертая глава диссертации посвящена моделированию ДЧХ наклонного и слабонаклонного зондирования в присутствии ПИВ и разработке метода оценки характеристик наблюдаемых ПИВ на основе сопоставления данных модельных и экспериментальных ДЧХ. Работоспособность метода продемонстрирована на данных отдельных экспериментов, для которых оценены характеристики ПИВ, направления, скорости распространения и масштабы.

В заключении сформулированы основные результаты диссертационной работы.

Таким образом, в диссертационной работе с применением метода трассировки КВ радиоволн в рамках единого подхода дается физическая интерпретация ряда важных эффектов, наблюдаемых в экспериментах по активному воздействию на ионосферу на нагревных стендах, а также представлен метод определения характеристик естественных ПИВ. Полученные результаты имеют таким образом как фундаментальное, так и сугубо практическое значение. Диссертационная работа Семеновой Н.А. является завершенным исследованием и имеет несомненную научную новизну.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов, сформулированных в диссертации, обеспечивается применением апробированных теоретических, численных и экспериментальных методов. Результаты диссертации согласуются с имеющимися в литературе теоретическими и экспериментальными данными, опубликованы в ведущих научных журналах по направлению и были неоднократно представлены на крупных научных конференциях.

По содержанию работы имеются следующие замечания.

1. Прочтение работы вызывает ощущение, что автор к сожалению не была знаком с рядом важных работ, посвященных задачам моделирования распространения КВ радиоволн, как в естественно, так и искусственно возмущенной ионосфере.

а) Так ссылаясь на основополагающие работы Д.С. Лукина, где был изложен метод характеристик, автор почему-то забывает про работы зарубежных коллег, например J. Haselgrove, в которых аналогичные решения были опубликованы раньше, по крайней мере в открытой печати.

б) При рассмотрении ПИВ на слабонаклонных и длинных трассах автор тем самым переходит от решения начальной задачи к граничной. Последние исследования показали, что решение таких задач намного эффективнее искать прямым вариационным методом, а не методом пристрелки, как это делает автор. Прямому

вариационному методу посвящена в частности диссертация И.А. Носикова из КФ ИЗМИРАН, результаты которой были широко представлены в журналах и на конференциях. Имело бы смысл обосновать выбор метод пристрелки, используемого в работе, по сравнению с более перспективным прямым вариационным методом.

в) Следует отметить, что траекторные расчеты успешно использовались и ранее для анализа результатов нагревных экспериментов на стенде СУРА. Например в работах Андреевой и Н.G. James рассматривалось распространение ВН в реконструированной по данным спутниковой радиотомографии ионосфере и демонстрировалась возможность ее захвата в канал (каверну). Данный результат имеет прямое отношение к исследованию автора, но к сожалению не был принят во внимание.

2. В Главе 1 достаточно подробно описывается решение задачи трассировки КВ радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере методом характеристик. При этом много внимания уделяется заданию распределения электронной концентрации, но очень вскользь упоминается, как задается магнитное поле, о том, что это модель IGRF мы узнаем вообще из последних глав (кстати без указания конкретной версии, но даны ссылки на два разных ресурса [60] и [130]), про модель эффективной частоты соударения вообще не говорится ни слова, следует ли понимать, что поглощение вообще не рассматривалось? Рассмотрение эффектов поглощения могло бы существенно обогатить анализ нагревных экспериментов, где как показано автором важную роль играет то, какая часть энергии волны накачки доходит до области генерации плазменных волн.

3. Вместо использования в достаточно стандартной задаче трассировки КВ радиоволн хорошо известных и документированных программных реализаций, например кода Jones and Stephenson (ссылки на него также нет в работе), автор предпочитает разработать свою реализацию алгоритмов, это ее право и может только приветствоваться, однако в таком случае следовало бы уделить внимание тестированию разработанных программ, хотя бы для случаев допускающих сравнение с известным аналитическим решением. Это продемонстрировало бы, что разработанный комплекс программ работает корректно. Вероятно это было проделано, но не нашло свое отражение в тексте работы.

4. В работе достаточно подробно описан метод решения начальной задачи, приведены используемые начальные условия, указаны конкретные алгоритмы решения характеристической системы дифференциальных уравнений. Вместе с тем при анализе наклонных трасс автор решает уже граничную задачу (попадание в приемник) и вот методы ее решения описаны в работе существенно хуже. Очевидно, что используется пристрелка, но в какой постановке? Локальная или глобальная минимизация, поиск корня? Какова непосредственная точность пристрелки, вскользь упоминается лишь о нескольких зонах Френеля, без конкретики. Не приводится конкретный алгоритм. Все это вызывает вопросы к модельным ДЧХ, представленным в Главе 4. Например скачки производной ДЧХ, наиболее очевидные на рисунке 4.11,

скорее всего связаны с методикой пристрелки. Эти моменты вообще не обсуждаются в тексте диссертации.

5. Интерпретация эффектов нагрева, в частности интенсивности ИРИ и положения пятна искусственного оптического свечения (Глава 2), являются с точки зрения оппонента основной и самой важной частью работы. Она выглядит убедительно, если предположить, что в распространении волны накачки доминируют рефракционные эффекты и его можно описать в рамках приближения геометрической оптики. Было бы важно сделать оценки (если такое в принципе возможно), как на эту картину накладываются дифракционные эффекты от мелкомасштабных неоднородностей, которые эффективно возбуждаются в нагревных экспериментах.

6. При анализе результатов ракурсного рассеяния в главе 3 автор предполагает неизменность распределения $N(h)$ вдоль трассы. Указывается, что в пользу такого утверждения свидетельствует короткая, около 170 км., длина трассы и похожесть ионограмм ВЗ, полученных на обоих ее концах. Их было бы неплохо привести в работе, в качестве подтверждения. Кроме того, длина используемой трассы по порядку совпадает с характерными масштабами СМПИВ в ионосфере. Как возможное прохождение СМПИВ повлияет на результаты обработки ракурсных эффектов с использованием предложенного автором метода. Является ли предположение о неизменности распределения $N(h)$ существенным ограничением метода. Можно ли тут использовать результаты главы 4, чтобы оценить возможные ошибки? Кроме того это позволило бы сильнее «привязать» главу 4 к основной части работы.

7. Из текста диссертации (глава 4) не до конца понятна методика определения параметров ПИВ, каким образом (алгоритмом) подбираются параметры модели ионосферы наилучшим образом описывающих наблюдаемые экспериментально ДЧХ, что является количественной мерой наилучшего совпадения экспериментальной и модельной ДЧХ, может ли предлагаемый автором метод использоваться для автоматической обработки большого количества ионограмм наклонного зондирования и определения параметров ПИВ, что позволило бы исследовать их суточную и сезонную динамику, что представляет огромный интерес с геофизической точки зрения.

Указанные замечания не умаляют высокой оценки диссертационной работы и не ставят под сомнение достоверность полученных результатов и защищаемых положений. Тематика и содержание диссертации соответствует специальности 1.3.4. Радиофизика. Основные результаты диссертации опубликованы в 16 научных работах, в том числе 7 статьях в рецензируемых научных журналах, рекомендованных ВАК РФ для опубликования основных результатов диссертации. Полученные в диссертации результаты являются новыми, обоснованными и представляют интерес как с теоретической, так и с практической точки зрения. Автореферат правильно и полно отражает содержание диссертации.

Диссертация Семеновой Н.А. «Моделирование распространения КВ радиоволн в магнитоактивной плазме в задачах исследования характеристик ионосферных

возмущений», является завершённой научно-квалификационной работой и удовлетворяет всем требованиям «Положения о присуждении ученых степеней», утверждённого Постановлением Правительства Российской Федерации от 24 сентября 2013 года № 842, предъявляемым к диссертациям, представленным на соискание ученой степени кандидата наук, а ее автор, Семенова Надежда Александровна, заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4. Радиофизика.

Официальный оппонент:

доцент кафедры физики атмосферы
физического факультета МГУ имени М.В. Ломоносова,
кандидат физико-математических наук
(25.00.29 Физика атмосферы и гидросферы)
17 апреля 2026 г.

Падохин Артем Михайлович

Я, Падохин Артем Михайлович, даю согласие на обработку моих персональных данных (приказ Минобрнауки России от 01.07.2015 №662) и на включение моих персональных данных в аттестационные документы соискателя ученой степени кандидата физико-математических наук Семеновой Надежды Александровны.

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный университет имени М.В.Ломоносова», Физический факультет, отделение Геофизики, кафедра физики атмосферы

Почтовый адрес: 119991, Москва, Ленинские горы, дом 1, стр. 2, физический факультет МГУ

Тел.: 7 (910) 4529227

Адрес электронной почты: padokhin@physics.msu.ru

Подпись А.М. Падохина заверяю

и. о. декана физического факультета МГУ,
профессор

В.В. Белокуров

