

Отзыв

официального оппонента к.ф.-м.н. Ойнаца Алексея Владимировича на диссертационную работу Котовой Дарьи Сергеевны «**Исследование формирования лучевых траекторий и поглощения коротких радиоволн в ионосфере во время геомагнитных бурь**», представленную на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03- радиофизика

Диссертационная работа Котовой Дарьи Сергеевны посвящена численному моделированию характеристик (лучевых траекторий и поглощения) декаметровых радиоволн в возмущенных условиях. Под возмущением подразумеваются эффекты геомагнитных бурь на ионосферу и нейтральную атмосферу. Экспериментальные исследования влияния геомагнитных возмущений на распространение радиоволн декаметрового диапазона проводятся на протяжении многих десятилетий. В этой связи несомненно, что общие закономерности отклика ионосферы на сильные бури и соответствующие особенности в распространении радиоволн известны. Так в частности известно, что во время геомагнитных бурь может наблюдаться общее понижение электронной концентрации и увеличение высоты максимума F области, может происходить изменение вертикальной структуры ионосферы (из-за дополнительного расслоения), повышаться ионизация в нижележащих D и E областях. Все это может приводить к уменьшению максимальных применимых частот КВ радиосвязи и увеличению поглощения радиоволн (вплоть до полного поглощения – «блэкаута»), к появлению боковых траекторий распространения (вне плоскости большого круга), к усилению многолучевости и, вследствие этого, к дополнительным искажениям амплитуды принимаемого сигнала. В то же время численные теоретические оценки влияния конкретных геомагнитных бурь на характеристики радиоволн затруднены в частности отсутствием доступных глобальных моделей среды распространения, адекватно описывающих указанные возмущения. Поэтому работа Котовой Д.С., в которой при проведении численных расчетов использовалась Глобальная Самосогласованная Модель Термосферы Ионосферы и Протоносферы (ГСМ ТИП), разработанная Западным Отделением ИЗМИРАН, является вполне **актуальной** и вносит заметный вклад в решение задач прогноза и анализа условий распространения радиоволн.

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, включающего 194 наименования, и двух приложений. Работа изложена на 140 страницах и содержит 52 рисунка и 2 таблицы.

В **первой главе** приведен обзор современных моделей ионосферы и существующих методов моделирования характеристик декаметровых радиоволн. Кратко представлены результаты экспериментальных исследований распространения радиоволн в низкоширотной и высокоширотной ионосфере.

Во **второй главе** описан численный алгоритм расчета лучевых траекторий и поглощения коротких радиоволн на основе метода геометрической оптики в трехмерно неоднородной анизотропной среде. Приведены результаты тестирования алгоритма на примере модели параболического слоя. Описана модель ГСМ ТИП, а также способ ее согласования с алгоритмом расчета характеристик радиоволн. Приводится обоснование применения данной модели для описания среды распространения.

В **третьей главе** приведены результаты имитационного моделирования распространения коротких волн в возмущенной ионосфере на примере двух геомагнитных бурь 1-3 мая 2010 г. и 26-29 сентября 2011 г. На первом этапе проведено сравнение параметров модельной среды, рассчитанной с помощью ГСМ ТИП, с данными наблюдений, включая данные вертикального зондирования на ряде станций, данные глобальных карт полного электронного содержания (по данным GPS), а также результатами международной справочной модели IRI-2012. Показано, что в среднем модель ГСМ ТИП адекватно описывает возмущения ионосферы и нейтральной атмосферы и их динамику на разных стадиях развития бури (для спокойных условий, а также для главной и восстановительной фаз бури). Далее приведены результаты расчета лучевых траекторий, дифференциального и интегрального затухания для обыкновенной и необыкновенной волновых мод. Расчеты проводились для нескольких гипотетических передающих станций. При этом углы излучения, азимуты и рабочие частоты выбирались таким образом, чтобы лучевые траектории охватывали возмущения среды, возникшие вследствие бури в высокоширотной и низкоширотной ионосфере. Для бури 26-29 сентября 2011 г. расчеты указанных характеристик приведены также в случае использования в качестве среды распространения эмпирических моделей IRI-2012 и MSIS. Проведено сопоставление характеристик радиоволн, рассчитанных по двум моделям.

Четвертая глава посвящена дальнейшему развитию численного алгоритма, описанного во второй главе. В разделе 4.1 описана модель, позволяющая исследовать дисперсионные искажения сигнала с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) при его распространении в ионосфере. В этой модели излученный ЛЧМ импульс представляется непрерывной последовательностью ограниченного числа волновых пакетов. Предполагается, что все волновые пакеты распространяются независимо друг от друга без искажений. Представлены результаты расчета траекторных характеристик, дифференциального затухания и групповой скорости для различных волновых пакетов в составе ЛЧМ импульса. В разделе 4.2 приводятся результаты моделирования лучевых траекторий и интегрального поглощения в случае многоскачкового распространения (включая кругосветное распространение).

В **приложении А** приводится общая формулировка задачи о распространении плоских гармонических электромагнитных волн в холодной однородной анизотропной плазме. В

приложении Б приводятся базовые соотношения метода геометрической оптики и его применения к задаче о распространении декаметровых волн в ионосфере.

Изложенное в диссертации исследование и полученные результаты, несомненно, обладают необходимой степенью **научной новизны**. Так впервые для моделирования характеристик распространения декаметровых радиоволн была использована глобальная теоретическая модель ГСМ ТИП, которая достаточно адекватно описывает реальные процессы, протекающие в ионосфере во время геомагнитных возмущений, как на высоких, так и на низких широтах. Это позволило комплексно исследовать особенности формирования лучевых траекторий и поглощения радиоволн в указанных областях в периоды возмущений и сопоставить их с результатами, полученными для спокойных условий. К упомянутым особенностям следует отнести, в частности, появление в возмущенные периоды лучевых траекторий, связанных с распространением сигнала в волноводах, образованных в результате дополнительного расслоения F области ионосферы (появление слоя F1 в высокоширотной ионосфере и слоя F3 в экваториальной ионосфере); связанных с динамикой экваториальной аномалии (выход лучевых траекторий из плоскости большого круга); а также увеличение поглощения радиоволн. Оригинальными также являются представленный в диссертации метод исследования и результаты проведенного моделирования дисперсионных искажений широкополосных ЛЧМ сигналов при их распространении в трехмерно-неоднородной анизотропной ионосфере.

Разработанные автором алгоритмы и полученные результаты могут быть полезны как в методическом плане в процессе обучения студентов и аспирантов соответствующих специальностей, так и в научном плане при проведении теоретических исследований распространения радиоволн и интерпретации экспериментальных данных в научных организациях соответствующего профиля.

В целом диссертационная работа изложена достаточно логично и оформлена в соответствии с правилами. Однако она не лишена и некоторых недостатков:

1. Некорректно сформулировано защищаемое положение 3. Последнее предложение в этом положении звучит так: «Также получен луч Педерсена». В таком виде данная фраза оторвана от исходного контекста, и может сложиться впечатление, будто бы автор впервые смог получить указанный луч. Однако совершенно очевидно, что это не так.
2. На странице 36 представлены примеры вертикальных профилей ионосферных параметров, рассчитанных по модели ГСМ ТИП, и результат их интерполяции. Из рисунков видно, что при переходе от «сетки» в модели ГСМ ТИП к «сетке», используемой при расчете лучевых траекторий, точки интерполяции (черные кружки) «не попали» в максимумы профиля (выколотые кружки), рассчитанного по модели ГСМ ТИП. В частности это хорошо видно для вертикального профиля электронной

концентрации. Не получится ли при таком способе интерполяции, что среда, непосредственно используемая при расчете характеристик радиоволн, будет существенно сглаженной по сравнению с изначально рассчитанной по модели ГСМ ТИП (при этом существенно изменятся критические частоты и высоты максимумов слоев вдоль трассы распространения)? Из работы неясно, оценивалась ли погрешность такого способа интерполяции.

3. На странице 43 приведено сравнение ионосферных параметров, рассчитанных по модели ГСМ ТИП, с данными вертикального зондирования на ряде станций во время геомагнитной бури 1-3 мая 2010 года. На рисунках разброс черных и выколотых кружков по вертикали и, наоборот, их скученность по горизонтали сильно затрудняют сравнение и проверку тех выводов, которые сделал автор относительно адекватности модели ГСМ ТИП. По-видимому, для лучшего восприятия стоило бы увеличить масштаб по горизонтальной оси. Кроме того, можно было бы привести не сами значения измеряемых и моделируемых параметров, а их отклонения от невозмущенного уровня. Возможно, стоило также сгладить мелкомасштабные вариации в данных наблюдений, которые, по-видимому, обусловлены наличием перемещающихся ионосферных возмущений. Кроме того, отсутствует сравнение для высоты максимума F2 слоя, которая также может испытывать сильные вариации во время геомагнитных бурь.
4. В заключении в пункте 1 автор пишет: «Новый модуль позволил получать профили электронной концентрации на каждом шаге вдоль рассчитываемых траекторий. Это облегчало интерпретацию полученных результатов». Однако из работы непонятно, как это облегчало интерпретацию результатов.
5. В заключении в пункте 2 автор делает предположение, что «...ионограммы наклонного зондирования могут быть использованы для изучения пространственной протяженности слоя F1 в высокоширотной ионосфере и дополнительного слоя F3 в экваториальной ионосфере...» В то же время автор в своем исследовании не решал двухточечную задачу (задачу пристрелки траекторий) и не проводил синтез ионограмм НЗ. Поэтому из работы непонятно, на каком основании делается указанное предположение.

Кроме указанных недостатков в тексте присутствует ряд грамматических, лексических и стилистических ошибок, некоторые терминологические неточности, а также небрежность в оформлении некоторых рисунков.

Отмеченные недостатки не являются принципиальными, не оказывают существенного влияния на общее положительное впечатление от диссертационной работы и не снижают научную и практическую значимость проведенных исследований. В то же время они имеют

рекомендательный характер в случае проведения дальнейших исследований в данном направлении.

Основные материалы диссертации опубликованы и прошли апробацию на всероссийских и международных конференциях. По теме диссертации опубликованы 4 статьи в журналах, рекомендованных ВАК РФ. По результатам конференций опубликовано 13 докладов и 9 тезисов. Все защищаемые положения и сделанные в заключении выводы являются **обоснованными и отражены** в опубликованных работах.

Автореферат правильно отражает содержание диссертации.

Диссертация соответствует требованиям пункта 9 «Положения о присуждении ученых степеней», утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации №842 от 24 сентября 2013 года, и является научно квалификационной работой, в которой разработан численный алгоритм проведения вычислительных экспериментов по распространению коротких радиоволн в ионосфере Земли во время спокойных условий и в периоды геомагнитных бурь, что имеет значение для развития соответствующей отрасли знаний. Автор диссертации Котова Дарья Сергеевна заслуживает присуждения ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 01.04.03 - радиофизика.

Кандидат физико-математических наук,
старший научный сотрудник

Ойнац А.В.

Лаборатории исследования динамических процессов в ионосфере
ФГБУН ИСЗФ СО РАН

Почтовый адрес: 664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 126а, а/я 291

Телефон: +7 (3952) 42-82-65

E-mail: oinats@iszf.irk.ru

01.04.03 – Радиофизика

2 ноября 2015

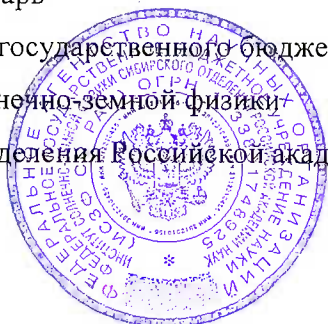
Подпись А.В. Ойнаца удостоверяю:

Ученый секретарь

Федерального государственного бюджетного учреждения науки

Института солнечно-земной физики

Сибирского отделения Российской академии наук



К.ф.-м.н.

Салахутдинова И.И.