

О Т З Ы В

официального оппонента – Бисярина Михаила Александровича –
на диссертацию Михалёвой Елизаветы Вячеславовны
«**Математическое моделирование влияния неоднородной структуры
ионосферы Земли на распространение декаметровых радиоволн**»,
представленную на соискание учёной степени кандидата
физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика»

Диссертационная работа Е.В.Михалёвой посвящена исследованию распространения радиоволн ВЧ-диапазона в околоземном пространстве. Этот диапазон широко используется в различных системах радиосвязи, радиолокации, навигации, мониторинга окружающей среды. Нестандартные ситуации, возникающие при эксплуатации таких систем, являются источником всевозможных задач как академического, так и чисто практического плана. Распространение происходит в ионосфере, неоднородность и анизотропия которой оказывает решающее влияние на качественные и количественные характеристики процесса распространения высокочастотного сигнала. В зависимости от угла излучения сигнал фиксированной частоты может как просочиться сквозь ионосферу, так и отразиться от неё. Известными эффектами пространственного разделения траекторий распространения являются установление дальней радиосвязи и существование зоны молчания. Отражение происходит на различных высотах в зависимости от частоты радиоволны, что позволяет восстанавливать высотные профили электронной концентрации ионосферной плазмы.

Е.В.Михалёвой подробно исследован поддиапазон 3–10 МГц в применении к проблемам вертикального и слабонаклонного зондирования. Немонотонность профилей (проявляющаяся, в частности, в слоистости ионосферы), локальные неоднородности и перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ) приводят к формированию сложных каустических структур в пространстве распространения и их эволюции во времени. Исследование радиополей в таких условиях требует разработки специфических методов, чем и определяется **актуальность** выбранной темы и проведённой работы. В диссертации решена задача аналитического и численного описания характеристик линейно-частотно-модулированных (ЛЧМ) сигналов при наличии в среде распространения сложных каустических структур. Прделанный огромный объём вычислительной работы позволил сформировать богатый справочный материал, иллюстрирующий различные режимы распространения при вертикальном и слабонаклонном зондировании. Стоит отметить, что

хотя в названии диссертации анизотропия ионосферы и не упоминается, влияние магнитного поля Земли также учтено в работе должным образом.

На подготовительном этапе автором обоснован выбор темы, обозначены цели работы и решаемые для этого задачи, сформулированы выносимые на защиту положения. Всё это составляет содержание **Введения**. Оригинальный материал логично распределён по четырём главам.

В **Первой главе** приведены необходимые сведения о структуре ионосферы, об особенностях её слоёв. Проведён обзор методов математического моделирования процессов распространения высокочастотных радиоволн; упомянуты метод нормальных волн, метод параболического уравнения, вариационный подход, волновая теория катастроф и метод канонического оператора Маслова. Переходя непосредственно к своей работе, Е.В.Михалёва подробно излагает метод бихарактеристик и расширенную бихарактеристическую систему, разработанные Дмитрием Сергеевичем Лукиным и позволяющие строить лучевую структуру процесса и определять амплитуду радиоволн. Именно этот подход и развивается в последующих частях диссертации.

Вторая глава посвящена численной реализации методов решения расширенной бихарактеристической системы Лукина. Продемонстрировано эффективное построение лучевой картины, смоделированы ионограммы вертикального и слабонаклонного зондирования, выполнено исследование влияния локальных неоднородностей на параметры ЛЧМ-сигнала. Показано, что в режиме слабонаклонного зондирования сравнение синхронных ионограмм обыкновенной и необыкновенной волн может служить независимым способом оценки величины геомагнитного поля. Содержанием главы полностью обосновывается **первое** выносимое на защиту **положение**.

В **Третьей главе** подробно исследованы эффекты, обусловленные ПИВ. Продемонстрировано формирование каустического острия при перемещении возмущения в горизонтальном и вертикальном направлениях, S-образных участков и “петель времени” на доплеровских кривых. При горизонтальном перемещении неоднородности смещение кривой доплеровского сдвига определяется поляризацией излучения, вид усложняется с ростом частоты, а область влияния возмущения существенно превосходит её характерный размер.

Характер зависимости доплеровского смещения частоты от горизонтальной координаты определяется не наклоном ПИВ, а направлением его движения. Частотный сдвиг ионограмм обыкновенной и необыкновенной волн демонстрирует устойчивое значение независимо от наличия ПИВ.

Содержание **Третьей главы** должным образом обосновывает **второе, третье и четвёртое положения**, выносимые на защиту.

Предметом **Четвёртой главы** являются исследования профилей частоты соударений свободных электронов ионосферной плазмы с нейтральными частицами. Необходимость этого обусловлена тем, что амплитуда радиосигнала уменьшается не только по причине лучевой расходимости (рассчитывается в рамках расширенной бихарактеристической системы Лукина), но и вследствие поглощения электромагнитной энергии в среде распространения. Предложенный и обоснованный оригинальный амплитудный метод обеспечивает восстановление высотного профиля частоты соударений, что и обосновывает **пятое** выносимое на защиту **положение**.

Достоверность полученных результатов обеспечивается корректным использованием апробированных методов математической физики и адекватных физических моделей. В пределах сопоставимости результаты работы не противоречат результатам других специалистов.

Новизна подходов и результатов присутствует во всех главах диссертации. Аналитические методы и численное моделирование позволяют рассчитывать ионограммы вертикального и слабонаклонного зондирования, определять амплитуды и фазы ЛЧМ-сигналов, восстанавливать вертикальный профиль частоты соударений электронов в присутствии сложных каустических структур, формируемых локальными неоднородностями и перемещающимися ионосферными возмущениями.

В качестве **критических замечаний** следует отметить следующее.

1. Формулировка второго выносимого на защиту положения неоднозначна. Следовало бы чётко обозначить, что именно является новым знанием, приобретённым как результат выполненной работы.

2. Само понятие “фаза” впервые появляется в тексте диссертации в §1.4, причём определяется формулой (1.4.1), имеющей, явно, ограниченную применимость (для стационарной среды). Не ясно, каким образом эта естественная характеристика волнового процесса связана с исходной бихарактеристической системой. И как её следует определять в общем случае?

3. В Главе 4 отсутствует чёткое формальное описание методологии: какова последовательность использования существующих моделей профилей частоты соударений электронов с нейтральными частицами и процедуры восстановления этих профилей предложенным амплитудным методом. Поэтому остаётся неясным, как и с чем

производится сравнение результатов восстановления профилей частоты соударений и на основании чего делается вывод о хорошей точности проведённого восстановления.

4. Имеются недостатки в логике изложения и представления материала работы.

4.1. Модель эффективной частоты соударений описана в самом начале §2.2, хотя в ближайших подразделах к ней обращения нет. Было бы логичнее поместить это описание непосредственно перед использованием в подразделе 2.2.4 при моделировании амплитуды отражённого от ионосферы сигнала.

4.2. В разных подразделах используются разные обозначения для одной и той же физической величины, в частности, для расходимости.

4.3. Нуждается в объяснении применение различных формул (2.2.18) и (4.2.22) для вычисления поглощения вдоль лучевой траектории.

4.4. На с.36 диссертации утверждается, что при представлении на графиках кривых, отвечающих разным частотам, последовательность цветов линий соответствует цветам спектра. Между тем, наоборот, красный цвет видимого спектра соответствует меньшей частоте по сравнению с фиолетовым.

4.5. При формулировании начальных условий для бихарактеристической системы используются термины “склонение” и “наклонение”. Однако традиционное значение этих терминов другое: склонение – это угол в горизонтальной плоскости, а наклонение – угол относительно горизонтальной плоскости.

4.6. Формулы (2.2.19) и (4.3.16), выражающие мнимую часть показателя преломления среды как функцию от диэлектрической проницаемости, приведены с существенной опечаткой.

4.7. Не ясна формулировка начальных условий (1.3.8), по-видимому, из-за опечатки.

4.8. Начальные условия (2.3.5) предписаны в точке η , смысл которой не определён.

Указанные недостатки не носят принципиального характера, не влияют на корректность сделанных выводов и не снижают высокую оценку диссертационной работы.

По материалам проведённых исследований опубликовано 13 статей в журналах, включённых в список ВАК или в международные базы Scopus и Web of Science. Результаты докладывались на представительных научных конференциях, а также имеется 14 публикаций в трудах конференций, входящих в Российский индекс научного цитирования. Результаты диссертации использовались при выполнении научно-исследовательских работ, финансировавшихся в рамках грантов Российского научного фонда.

Содержание диссертации отвечает Паспорту научной специальности 1.3.4 «Радиофизика»: в части исследования процессов распространения радиоволн ВЧ-

диапазона – п.2; в части разработки методики диагностики состояния ионосферы – п.5; в части разработки системы слабонаклонного зондирования ионосферы – п.7. Стиль изложения материала вполне соответствует общепринятым нормам языка научных публикаций, оформление диссертации выполнено на весьма высоком уровне.

Автореферат полностью соответствует содержанию диссертации и позволяет достоверно судить о качестве работы в целом.

Диссертационная работа **«Математическое моделирование влияния неоднородной структуры ионосферы Земли на распространение дециметровых радиоволн»** представляет собой законченное исследование, обладающее научной новизной и имеющее теоретическую и практическую ценность. Диссертация удовлетворяет всем требованиям, предъявляемым к кандидатским диссертациям («Положение о порядке присуждения учёных степеней», пп. 9–14), а её автор – **Михалёва Елизавета Вячеславовна** – заслуживает присуждения учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 1.3.4 «Радиофизика».

Официальный оппонент,
доктор физико-математических наук



М.А.Бисярин

Бисярин Михаил Александрович, доктор физико-математических наук.

Диссертация защищена по специальности 01.04.03 «Радиофизика».

Санкт-Петербургский государственный университет, физический факультет, кафедра радиофизики.

Ведущий научный сотрудник

Адрес: 199034 Санкт-Петербург, Университетская наб., 7-9

Тел. : +7-905-2630392

Email: m.bisyarin@spbu.ru



Документ подготовлен
в порядке исполнения
трудовых обязанностей

Текст документа размещен
в открытом доступе
на сайте СПбГУ по адресу
<http://spbu.ru/science/expert.html>