

УТВЕРЖДАЮ

директор федерального
государственного бюджетного
учреждения «Институт
прикладной геофизики имени
академика Е.К. Федорова»



А.Ю.Репин

» августа 2022 года

ОТЗЫВ ВЕДУЩЕЙ ОРГАНИЗАЦИИ

на диссертационную работу Гончарова Егора Сергеевича
«Трехмерные численные модели Шумановского резонанса для исследования
нижней ионосферы», представленную на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 –
«Физика атмосферы и гидросферы»

Цель работы являлось развитие моделей численного расчета волноводного распространения КНЧ-ОНЧ-НЧ радиоволн в ионосферной плазме, а также методик определения и анализа экспериментальных характеристик КНЧ радиодиапазона применительно к исследованию нижней ионосферы.

Актуальность работы

Современные физические модели нижней ионосферы представляют большой интерес благодаря возможности моделирования характеристик среды при различных гелиогеофизических условиях. Актуальность проведенного исследования состоит в необходимости разработки новых эффективных трехмерных кодов для расчета волноводного распространения электромагнитного излучения, позволяющих использовать неоднородные многокомпонентные физические модели нижней ионосферы. Полученный инструментарий может быть использован для проверки глобальных моделей нижней ионосферы на основе сравнения результатов расчетов с

экспериментальными наблюдениями характеристик Шумановских резонансов.

Содержание работы

Работа состоит из четырех глав, введения, заключения, приложения и списка использованной литературы. Диссертация выполнена на 170 листах, включая 50 рисунков и 4 таблицы.

В первой главе проведен отбор некоторых глобальных моделей нижней ионосферы, основанных на различных принципах построения. Рассмотренные модели используются в диссертационной работе для проведения численных расчетов параметров Шумановских резонансов.

Во второй главе представлены две трехмерные численные модели для расчета характеристик волноводного распространения электромагнитного излучения крайне низкочастотного диапазона: на основе метода конечных элементов (Finite Element Method - FEM), а также на основе метода конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain - FDTD). Верификация предложенных моделей выполнена на основе сравнения результатов численных расчетов с известными аналитическими решениями задачи Шумановских резонансов, а также задачи распространения электромагнитного излучения очень низких частот (ОНЧ) для радиотрасс с различными характеристиками ионосферы и подстилающей поверхности.

Третья глава является основной в диссертационной работе. В ней приводятся результаты численных расчетов параметров Шумановских резонансов с использованием отобранных в первой главе моделей нижней ионосферы. Выполнена количественная оценка влияния электрофизических параметров подстилающей поверхности (с использованием подробной карты проводимости Земли), а также ионной проводимости атмосферы на параметры Шумановских резонансов. В результате численных расчетов получено, что рассмотренные эмпирические модели нижней ионосферы не

воспроизводят характеристики Шумановских резонансов даже при спокойных гелиогеофизических условиях. Рассмотренные глобальные физические модели нижней ионосферы достаточно точно описывают характеристики Шумановских резонансов при спокойных гелиогеофизических условиях, тем не менее, они не позволяют воспроизвести наблюдаемую в эксперименте суточную/сезонную динамику Шумановских резонансов. Модель нижней ионосферы, разработанная в Институте динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН, позволила получить логарифмическую зависимость роста резонансных частот от потока солнечного рентгена, наблюдаемую в эксперименте. Это свидетельствует о важности корректного учета солнечного рентгеновского излучения в ионизационных процессах.

Четвертая глава посвящена оптимизации алгоритма определения параметров Шумановских резонансов из наблюдений горизонтальных компонент магнитного поля в ГФО Михнево Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского РАН. Определены основные суточные/сезонные/межгодовые тренды Шумановских резонансов, отражающие динамику глобальной молниевой активности, а также совпадающие с наблюдениями других обсерваторий Шумановских резонансов. Анализ резонансных параметров в 2018-2020 гг. явно показал наличие сигнатур планетарных волн. Кроме того, для анализа длительной динамики резонансных параметров в работе предложено использование информативного подхода на основе расчета ядерной оценки плотности вероятности.

В приложении подробно описан используемый математический аппарат для метода конечных разностей во временной области (FDTD).

Научная новизна

В диссертационной работе основным направлением является реализация и верификация численных методов для расчета параметров Шумановских

резонансов, позволяющих тестировать различные глобальные модели нижней ионосферы. Выполнена проверка ряда физических моделей нижней ионосферы, а также впервые при помощи численных расчетов получена логарифмическая зависимость изменения резонансной частоты от потока солнечного рентгена.

Для данных наблюдения горизонтальных компонент геомагнитного поля в ГФО Михнево Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского получены оптимальные параметры алгоритма определения характеристик Шумановских резонансов. Выполнен анализ наблюдаемых резонансных параметров за период 2016-2020 гг., позволивший определить основные суточные/сезонные/межгодовые формы резонансной динамики, а также выявить сигнатуры планетарных волн. Для анализа длительных вариаций Шумановских резонансов предложена эффективная методика, основанная на вероятностном подходе.

Практическая значимость

Работа обладает несомненной практической значимостью. Предложенная методика тестирования физических моделей нижней ионосферы на основе сравнения расчетных и наблюдаемых параметров Шумановских резонансов может быть применена для проверки прогностических моделей нижней ионосферы и атмосферы нового поколения. Реализованный электродинамический код на основе метода конечных разностей во временной области (FDTD) может быть также использован для других задач взаимодействия электромагнитных волн с ионосферной плазмой, например, самосогласованных расчетов воздействия электромагнитного излучения на ионосферную плазму (в том числе с учетом нелинейных эффектов). Также, разработанные инструменты для определения и анализа параметров Шумановских резонансов в ГФО Михнево Института динамики геосфер им. академика М.А. Садовского используются для накопления экспериментальных данных Шумановских резонансов, что позволит в

дальнейшем использовать их для решения широкого круга геофизических задач.

В качестве недостатков работы необходимо отметить следующие.

1. Перегруженность работы в силу методологических особенностей при использовании сложных методов математической физики, применимых в геофизике.

2. Необходимо было более подробно расшифровать свойство трехмерности Шумановских резонансов.

3. Было бы целесообразно определить потенциальных потребителей полученных результатов работы (навигация – в диапазоне Шумановских частот, подземная локация объектов и др.).

Указанные замечания не влияют на общую положительную оценку работы в целом.

Общая оценка работы

Общая оценка – высокий уровень, широта подхода, - от уравнений Максвелла, до анализа результатов собственных экспериментов. Исследование проведено на высоком научном уровне и подкреплено экспериментальными наблюдениями. Выносимые на защиту положения являются новыми, а сделанные выводы – научно обоснованными. Достоверность результатов численных расчетов определяется сравнением с известными аналитическими решениями волноводного распространения электромагнитного излучения. Достоверность результатов экспериментальных наблюдений определяется их сравнением с данными из литературы.

Автореферат в полной мере отражает основные результаты диссертации и ее структуру.

Диссертация Е.С. Гончарова – «Трехмерные численные модели Шумановского резонанса для исследования нижней ионосферы» удовлетворяет требованиям «Положения о порядке присуждения ученых степеней» (№842 от 24 сентября 2013 года с последующими изменениями),

предъявляемым к кандидатским диссертациям: она является законченной научной работой, в которой на основании выполненных автором исследований решена важная и актуальная научная задача, а автор работы – Гончаров Егор Сергеевич заслуживает присуждения ему ученой степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.29 – «Физика атмосферы и гидросферы».

Отзыв обсуждён и одобрен ученым советом ФГБУ «ИПГ» 10 августа 2022 года (протокол №3).

Отзыв подготовил доктор физико-математических наук, профессор, главный научный сотрудник Института прикладной геофизики им. академика Е.К. Федорова.

Адрес: 129128, Москва, ул. Ростокинская, 9.

Тел.: +7(903)7008528.

Я, Калинин Юрий Кириллович, даю согласие на включение моих персональных данных в документы, связанные с работой диссертационного совета, и их дальнейшую обработку.

Главный научный сотрудник
Института прикладной геофизики
им. академика Е.К. Федорова,
доктор физ-мат. наук

Ю. Калинин

/Ю.К. Калинин