

На правах рукописи

Гончаров Егор Сергеевич

**Трёхмерные численные модели
Шумановского резонанса
для исследования нижней ионосферы**

Специальность 25.00.29 —
«Физика атмосферы и гидросферы»

Автореферат
диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

Москва — 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук, г. Москва.

Научный руководитель: **Ляхов Андрей Николаевич**,
кандидат технических наук

Официальные оппоненты: **Нагорский Петр Михайлович**,
доктор физико-математических наук,
профессор, ФГБУН Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук, главный научный сотрудник

Пилипенко Вячеслав Анатольевич, доктор физико-математических наук, профессор, ФГБУН Институт физики Земли им. О. Ю. Шмидта Российской академии наук, заведующий лабораторией

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт прикладной геофизики им. академика Е. К. Федорова

Защита состоится 22 сентября 2022 г. в 11 часов на заседании диссертационного совета Д 002.050.01 при ФГБУН Институте динамики геосфер имени академика М. А. Садовского Российской академии наук по адресу: 119334, г. Москва, Ленинский пр. 38, корп. 1.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ИДГ РАН и на сайте <http://idg.chph.ras.ru>

Автореферат разослан _____ 2022 года.

Учёный секретарь
диссертационного совета
Д 002.050.01,
канд. физ.-мат. наук

С. З. Беккер

Общая характеристика работы

Актуальность темы

Нижняя ионосфера, или так называемый слой **D**, располагается на высотах 40–100 км, охватывая области верхней стратосферы и мезосферы. Главное отличие этой ионосферной области заключается в наличии сложного ионного состава и динамики, полностью определяемой процессами переноса в атмосфере. Взаимодействие нижней ионосферы со средней атмосферой приводит к необходимости учета глобальной динамики атмосферы при проведении моделирования ионосферной области **D**. С точки зрения фундаментальных исследований столкновительной плазмы, нижняя ионосфера представляет большой интерес, являясь природной лабораторией для изучения слабо ионизованной многокомпонентной неоднородной плазмы.

Нижняя ионосфера также является средой распространения радиоволн широкого диапазона, от крайне низких частот (КНЧ) до высоких частот (ВЧ). Основной ионосферной характеристикой, необходимой для рассмотрения радиофизических задач, является отношение электронной концентрации к эффективной частоте соударений электронов с нейтральными частицами, которое сильно варьируется, даже при спокойных гелиогеофизических условиях. Это приводит к возможности использования мониторинга распространения радиоволн для исследования геофизических процессов в верхних геосферах, в частности, в нижней ионосфере. Для этого необходимо использовать источники радиоизлучения с известными характеристиками. Одним из вариантов является использование сети станций очень низких частот (ОНЧ) и низких частот (НЧ). Недостатки такого подхода:

- большие энергозатраты, необходимые для непрерывного функционирования передатчика;
- плохо известные параметры излучения (мощность, фаза, режим функционирования) при использовании сторонних передатчиков;
- ограниченный набор радиотрасс.

Более удобным инструментом для мониторинга нижней ионосферы является использование КНЧ радиоволн. Интерес к КНЧ диапазону возник еще в 50-х годах прошлого века. Распространение электромагнитных волн КНЧ диапазона происходит специфическим образом. Благодаря тому, что длина волны соизмерима с радиусом Земли, в КНЧ диапазоне могут наблюдаться глобальные резонансы, когда частота колебаний совпадает с собственной частотой резонатора, образованного сферической полостью между Землей и ионосферой.

Широкое изучение феномена глобальных электромагнитных резонансов началось с теоретических работ Шумана, в которых он представил полость Земля-ионосфера в виде простого полого сферического электромагнитного резонатора с идеально проводящими границами и представил аналитическое решение для расчета резонансных частот:

$$F_n = \frac{c}{2\pi R_e} \sqrt{n(n+1)}, \quad (1)$$

где c — скорость света в вакууме, $R_e = 6370$ км — радиус Земли, n — номер резонанса. В качестве основного источника электромагнитного излучения в КНЧ диапазоне предполагалась глобальная молниевая активность. Вертикальный молниевый разряд рассматривался в виде большой антенны, излучающей электромагнитную энергию в частотном диапазоне ниже 100 кГц. Несмотря на то, что излучение в нижней части спектра (<100 Гц) является незначительным, затухание электромагнитных волн, распространяющихся в волноводе Земля-ионосфера не превышает 0.5 дБ/Мм, что позволяет им распространяться на значительные расстояния и усиливаться на резонансных частотах за счет интерференции.

Экспериментальное подтверждение существования так называемых Шумановских резонансов было получено позднее, при этом, наблюдаемые резонансные частоты отличались от теоретически предсказанных аналитической моделью Шумана, что связано с несколькими аспектами. Упрощенная аналитическая модель не учитывает конечную проводимость средней атмосферы, влияние геомагнитного поля Земли, а также зависимость резонансных параметров от расстояния источник-приемник. При этом потери при распространении электромагнитной КНЧ волны в средней атмо-

сфере приводят к уширению резонансных пиков, и наблюдаемые резонансные добротности находятся в диапазоне 4–6, в зависимости от резонансной частоты.

Для моделирования наблюдаемых глобальных резонансов был разработан ряд аналитических подходов, позволяющих учитывать упрощенные модели проводимости нижней ионосферы: двухслойную, многослойные, а также более сложные модели. При этом стоит отметить, что несмотря на то, что упрощенные модели ионосферы позволяют достаточно хорошо воспроизвести усредненные параметры Шумановских резонансов, они представляют собой лишь эквивалентную радиоионосферу для КНЧ радиоволн, поэтому не в состоянии описать реально наблюдаемую резонансную динамику. За последние годы был разработан ряд двух- и трехмерных численных моделей для расчета параметров Шумановских резонансов, например, на основе метода электропередачи (Transmission Line Modeling), а также метода конечных разностей во временной области (Finite Difference Time Domain). Такие модели потенциально пригодны для расчетов Шумановских резонансов с учетом сложной трехмерно-неоднородной проводимости ионосферы.

Большой интерес к КНЧ радиодиапазону изначально был обоснован возможностью беспроводной связи на дальние расстояния. Возможность КНЧ радиоволн проникать глубоко под воду делает возможным их использование в качестве инструмента связи с подводными лодками на большой глубине. Опытные установки, работающие в этом диапазоне были созданы в США (например, проект SANGUIN) и в СССР (проект ЗЕВС) на частотах 70–80 Гц. Однако низкая скорость передачи информации, чрезвычайно высокие требования к энергопотреблению, а также конструкционные сложности проектирования передающей антенной системы привели к снижению интереса изучения КНЧ радиосвязи. Активное изучение КНЧ радиоволн возобновилось в 1990-х, когда была продемонстрирована связь параметров Шумановских резонансов с изменениями климата. На сегодняшний день исследования Шумановских резонансов включают в себя следующие направления:

- исследование распределения глобальной молниевой активности;

- определение параметров электромагнитных импульсов (ЭМИ) мощных молний (англ. Q-bursts);
- использование наблюдений Шумановских резонансов в качестве климатического «термометра»);
- связь Шумановских резонансов с сейсмической активностью;
- создание прогностических моделей динамики Шумановских резонансов;
- исследование морфологии нижней ионосферы Земли при различных гелиогеофизических условиях.

В теории Шумановских резонансов до сих пор остается много до конца не решенных вопросов, таких, как:

- зависимость резонансов от положения терминатора;
- влияние 11-летнего солнечного цикла;
- влияние солнечных вспышек и мощных протонных событий;
- механизм проникновения КНЧ радиоволн в верхние атмосферные слои;
- влияние мощного космического гамма-излучения;
- исследование поглощения КНЧ радиоволн в полярной шапке;
- отклик резонансов на антропогенные возмущения нижней ионосферы: высокоэнергетические события, воздействие мощных радиоволн, выброс химически активных веществ и др.

Большинство нерешенных вопросов связано с наименее затрагиваемой задачей в теории Шумановских резонансов — изучение морфологии и динамики мезосферы и нижней ионосферы (40–100 км) по характеристикам распространения радиоволн КНЧ диапазона. Так как именно область нижней ионосферы определяет параметры распространения радиоволн КНЧ диапазона, то, научившись решать соответствующую некорректную обратную задачу, мы сможем использовать данные наблюдений КНЧ для определения параметров нижней ионосферы. Основной проблемой является необходимость использования эффективной трехмерной численной модели, позволяющей выполнять расчеты Шумановских резонансов с учетом многокомпонентной неоднородной анизотропной ионосфер-

ной плазмы. Как уже было отмечено, на сегодняшний день существует ряд численных методов, подходящих для решения такой задачи, однако в большинстве представленных численных расчетов используются только упрощенные модели проводимости средней атмосферы. Определение ионосферных параметров с использованием данных наблюдений в КНЧ диапазоне имеет ряд преимуществ. Во-первых, источником электромагнитного излучения является природный феномен — глобальная молниевая активность, что делает возможным непрерывные длительные измерения характеристик распространения радиоволн без энергозатрат на обеспечение стабильного излучения. Во-вторых, распространение радиоволны КНЧ диапазона происходит во всем волноводе Земля-ионосфера, поэтому для данного радиодиапазона не применимо понятие радиотрассы, как в случае с ОНЧ-НЧ радиопередатчиками. Это позволяет выполнять регистрацию радиоволн в любой точке земного шара, а также выявлять глобальные ионосферные изменения ионосферы независимо от локального времени в точке наблюдения. Однако, как правило, ионосферные возмущения меньше влияют на параметры Шумановских резонансов, чем вариации глобальной молниевой активности, что приводит к необходимости высокоточных экспериментальных измерений. Вышеизложенные задачи приводят к необходимости использования новейших численных электродинамических моделей для расчета параметров волноводного распространения радиоволн, разработки унифицированной методики для определения экспериментальных резонансных характеристик Шумановских резонансов, а также использование новых методик для анализа КНЧ наблюдений на различных временных масштабах.

Цели и задачи работы

Общая цель работ — 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. Для достижения сформулированной цели решались следующие задачи:

1. разработка трехмерных расчетных кодов для численного моделирования параметров Шумановских резонансов, позволяющих учитывать неоднородные анизотропные многокомпонентные модели нижней ионосферы;
2. разработка оптимальных параметров для методики определения характеристик КНЧ радиоволн по данным наблюдения магнитного поля в ГФО Михнево ИДГ РАН и реализация программного модуля для автоматизированного расчета характеристик Шумановских резонансов;
3. применение вероятностного анализа динамики Шумановских резонансов на основе расчета нестационарной плотности вероятности наблюдаемых параметров;
4. проверка некоторых глобальных моделей нижней ионосферы при помощи численного расчета Шумановских резонансов в различных гелиогеофизических условиях и сравнение с экспериментальными наблюдениями параметров Шумановских резонансов в ГФО Михнево ИДГ РАН.

Научная новизна

- Реализованы и верифицированы два трехмерных численных метода для расчета параметров Шумановских резонансов.
- Предложено использование Шумановских резонансов для тестирования глобальных физических моделей нижней ионосферы.
- Определены оптимальные параметры и алгоритмы обработки первичных данных измерений вариаций геомагнитного поля в диапазоне частот 3–30 Гц для восстановления параметров Шумановских резонансов (собственные частоты, интенсивности, добротности). На основе полученных результатов реализована автоматизированная система расчета и обработки КНЧ спектров по данным регистрации горизонтальных компонент геомагнитного поля в ГФО Михнево.
- Исследована динамика параметров Шумановских резонансов в 2016–2020 годах по данным среднеширотной обсерватории «Михнево» Института динамики геосфер им. академика М. А. Садовского. На основе полученных результатов выявлены долгопери-

одные вариации Шумановских резонансов, отражающие глобальную динамику мезосферы-нижней ионосферы.

- Впервые на основе длительных измерений выполнен одновременный спектральный анализ параметров Шумановских резонансов и амплитуд ОНЧ радиосигналов на радиотрассах разной ориентации, на основе которого определена возможность использования параметров Шумановских резонансов для детектирования сигнатур планетарных волн.

Научная и практическая значимость работы

Разработанный инструментарий для расчета и обработки характеристик КНЧ спектра в ГФО Михнево используется для накопления экспериментальных данных Шумановских резонансов, что в дальнейшем позволит использовать полученные результаты для решения широкого круга различных геофизических задач.

Предложенная методика тестирования теоретических 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.

Реализованные средства численного моделирования распространения ЭМ волн в ионосферной плазме на основе метода конечных разностей во временной области могут быть использованы для широкого радиочастотного диапазона, а также для других задач взаимодействия электромагнитных волн с ионосферной плазмой, например, самосогласованных расчетов воздействия ЭМ излучения на ионосферную плазму (в том числе с учетом нелинейных эффектов).

Методы исследования

Основные методы исследования — создание численных электродинамических моделей, а также средств обработки и анализа КНЧ радиоволн.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Реализован и верифицирован трехмерный конечно-разностный код для расчета распространения ЭМ волн в трехмерно-неоднородной анизотропной многокомпонентной ионосфере Земли.
2. Впервые на основе численных расчетов получено эмпирическое соотношение между изменением собственных частот Шумановских резонансов и интенсивностью солнечной рентгеновской вспышки.
3. Показано, что современные эмпирические и теоретические модели нижней ионосферы не способны воспроизвести наблюдаемые вариации параметров Шумановских резонансов, а также оказываются непригодными для моделирования Шумановских резонансов с учетом распределения глобальной молниевой активности, что требует их дальнейшего совершенствования в части учета ионизации жестким электромагнитным излучением Солнца.
4. Впервые показано, что в экспериментальных спектрах параметров Шумановских резонансов присутствуют периоды, совпадающие с известными периодами планетарных волн в атмосфере Земли. Это делает возможным использование Шумановских резонансов в качестве инструмента мониторинга волновых процессов в мезосфере-нижней ионосфере.
5. Впервые предложено и обосновано применение вероятностного подхода для анализа динамики параметров Шумановских резонансов на различных временных масштабах при помощи расчета нестационарной плотности вероятности.

Апробация работы

Результаты, представленные в диссертации, докладывались и обсуждались на следующих конференциях:

”Гелиогеофизические исследования в Арктике” (г. Мурманск, ПГИ, 2016),

”Триггерные эффекты в геосистемах” (г. Москва, ИДГ РАН, 2017),

”Физика плазмы в солнечной системе” (г. Москва, ИКИ РАН, 2017),

”Научно-техническая конференция ВНИИА-2017” (г. Москва, ВНИИА им. Духова, 2017),

”Конференция по физике плазмы и управляемому термоядерному синтезу” (г. Звенигород, ИОФ РАН, 2017),

”Распространение радиоволн” (г. Казань, КФУ, 2019),

”Состояние и перспективы развития современной науки по направлению Информатика и вычислительная техника” (г. Анапа, технополис «ЭРА», 2020),

”Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы” (г. Москва, ИОА СО РАН, 2021),

”Научно-техническая конференция ВНИИА-2022” (Москва, ВНИИА им. Духова, 2022).

Также автор докладывался на семинарах ИДГ РАН (г. Москва).

Публикации

Основные результаты по теме диссертации изложены в 6 публикациях, индексируемых в Web of Science, Scopus и двух публикациях, индексируемых в РИНЦ.

Личный вклад

Автором программно реализованы представленные в диссертации численные модели для расчета распространения КНЧ радиоволн в ионосферной плазме на основе методов FDTD и FEM, а также методики обработки и постобработки экспериментальных характеристик КНЧ спектра. Также автором выполнены все численные расчеты и проведен анализ полученных экспериментальных и расчетных результатов. В основных результатах, выносимых на защиту, вклад диссертанта является определяющим.

Объём и структура работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы, списка рисунков, списка таблиц, и приложения. Полный объём диссертации составляет 170 страниц, включая

50 рисунков и 4 таблицы. Список литературы содержит 210 наименований.

Содержание работы

Во **введении** обосновывается актуальность исследований, проводимых в настоящей диссертационной работе. Описано современное состояние исследований КНЧ радиодиапазона и в частности Шумановских резонансов.

В **главе 1** приведен обзор некоторых глобальных моделей нижней ионосферы, используемых далее для численного моделирования Шумановских резонансов. Рассмотренные модели нижней ионосферы можно классифицировать по принципу построения, а именно: эмпирические (Уайта-Фергюсона, IRI) и плазмохимические (WACCM, ИДГ-5К, ИДГ-22К). Приведены основные характеристики моделей, а также границы их применимости.

В **главе 2** предложены две трехмерные численные модели для расчета параметров Шумановских резонансов. Одна из них разработана на основе метода конечных элементов Finite Element Method (FEM), вторая — на основе метода конечных разностей во временной области Finite Difference Time Domain (FDTD). Численная модель на основе метода FEM реализована в программном комплексе COMSOL (модуль «Wave Optics») за счет решения волнового уравнения. Необходимость разрешения экспоненциального профиля ионосферной проводимости на расчетной области потребовала генерации особенной неравномерной сетки. Разработанная численная модель имеет следующие преимущества:

- позволяет исследовать собственные резонансные параметры волновода Земля-ионосфера без учета влияния источника;
- результат расчета описывает все $2n + 1$ моды резонансных частот, где n — номер резонансной частоты. Эта особенность модели может быть использована для изучения тонкого эффекта расщепления резонансных частот;
- позволяет учитывать неоднородности ионосферы масштаба элементарной расчетной ячейки.

Необходимость в универсальном электродинамическом решателе, применимом для решения задач распространения произвольного электромагнитного излучения в ионосферной плазме, привела к созданию трехмерной численной модели на основе метода FDTD (**параграф 2.2**). Основу базового метода составляет дискретизация уравнений Максвелла на пространственно-временной равномерной сетке, а также особое расположение компонент электромагнитного поля (схема Йи). Учет ионосферной проводимости реализован за счет решения дополнительных дифференциальных уравнений (ДУ) для тока проводимости заряженных частиц ионосферной плазмы:

$$\frac{d\vec{J}_{mk}}{dt} + \frac{q_k}{m_k} \vec{J}_{mk} \times \vec{B}_0 + \nu_k \vec{J}_{mk} = \frac{N_e |q_k|^2}{m} \vec{E}, \quad (2)$$

где q_k , m_k , N_k — заряд, масса, концентрация заряженных частиц вида k , соответственно, \vec{B}_0 — вектор геомагнитного поля, ν_k — эффективная частота соударений заряженных частиц с нейтралами. При этом полный ток ионосферной проводимости вычисляется как $J_m = \sum J_{mk}$. Такой подход естественным образом описывает ток проводимости многокомпонентной ионосферы для широкого диапазона радиоволн с учетом частотной дисперсии, а также анизотропии, вызванной присутствием геомагнитного поля. Для оптимизации трехмерных численных расчетов волноводного распространения электромагнитного излучения в волноводе Земля-ионосфера применена методика построения неоднородной расчетной сетки (рисунок 1), а также недавно разработанная методика неявного решения уравнения (2). Реализация параллельных вычислений с использованием стандарта Message Passing Interface (MPI) позволила значительно улучшить масштабируемость электродинамического кода. В **параграфе 2.2.1** представлены результаты верификации расчетной модели, выполненной на основе двухмерных расчетов распространения ОНЧ излучения в волноводе Земля-ионосфера.

В **главе 3** представлены результаты моделирования Шумановских резонансов с использованием численных методов, описанных в **главе 2** и моделей нижней ионосферы, представленных в **главе 1**. Сперва, для проверки корректности решаемых уравнений и используемой геометрии представлены результаты тестовых расчетов параметров Шумановских резонансов по двум численным

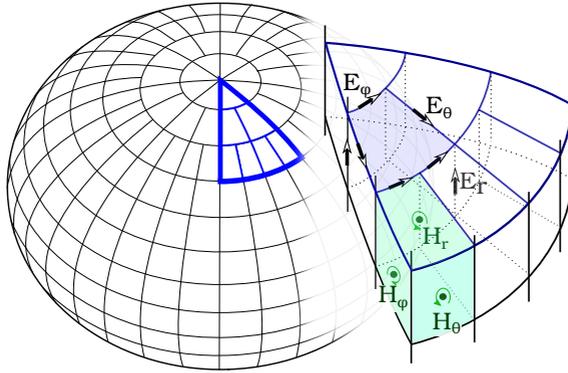


Рис. 1 — Пространственное расположение компонент электромагнитного поля на расчетной сетке для метода FDTD.

моделям без учета ионосферной проводимости. Полученные собственные частоты соответствуют аналитическому решению Шумана. В случае численного метода на основе FEM можно наблюдать вырождение $2n + 1$ собственных частот резонатора, где n — номер резонанса, что также согласуется с аналитическим приближением.

В параграфе 3.2 представлены результаты расчетов параметров Шумановских резонансов с использованием глобальных эмпирических моделей нижней ионосферы: Уайта, Уайта-Фергюсона, IRI-2016. Показано, что модель нижней ионосферы Уайта дает наиболее близкие к эксперименту значения резонансных частот, несмотря на то, что эта модель является наиболее простым приближением параметров нижней ионосферы. При этом общепринятая модель нижней ионосферы IRI-2016 оказывается неспособной описать резонансные характеристики даже при невозмущенных геофизических условиях (таблица 1).

В параграфе 3.3 проводится количественная оценка влияния ионной проводимости на параметры Шумановских резонансов. В качестве модели электронной проводимости нижней ионосферы взята эмпирическая модель Уайта, продемонстрировавшая значения резонансных частот наиболее близкие к экспериментально наблюдаемым. Высотные профили (дневной и ночной) концентрации положительных ионов взяты из литературы. Концентрация

отрицательных ионов рассчитывается исходя из условия электронейтральности ионосферной плазмы. Результаты расчетов показали, что учет ионной проводимости существенно влияет на затухание КНЧ сигнала в волноводе Земля-ионосфера даже при спокойных гелиогеофизических условиях, и соответственно оказывается наиболее существенным фактором для значений резонансных добротностей. Это говорит о том, что для моделирования корректных параметров Шумановских резонансов необходимо проводить численные расчеты с учетом теоретических многокомпонентных моделей, описывающих электронно-ионный состав в области мезосферы-нижней ионосферы при различных гелиогеофизических условиях. При этом разработанный программный инструментариум представляет хороший инструмент для тестирования именно таких моделей.

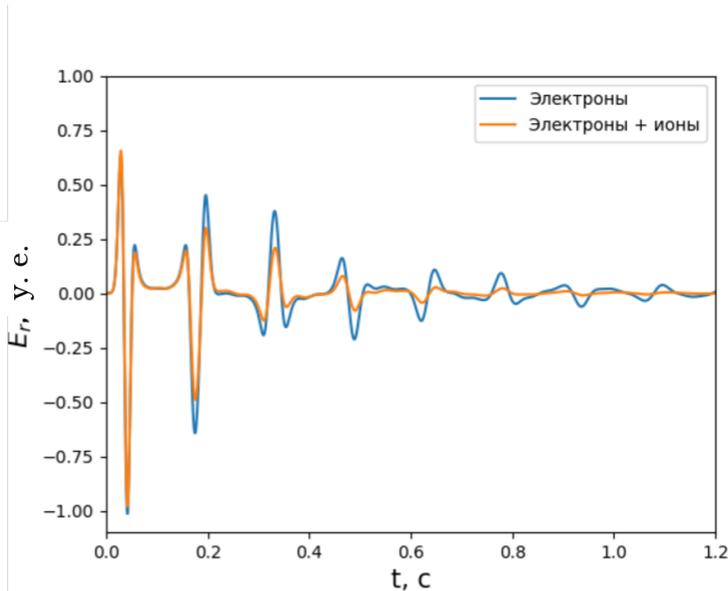


Рис. 2 — Вертикальная электрическая компонента E_r в точке приема с учетом ионной проводимости и без. В качестве источника ЭМИ — производная импульса Гаусса.

В параграфе 3.4 проведена количественная оценка влияния неоднородной проводимости Земной поверхности на параметры Шумановских резонансов на основе модели проводимости Земли с высоким разрешением. В результате расчета резонансных параметров оказалось, что различие первых 4-х резонансных частот в случаях с учетом конечной проводимости Земли и приближении поверхности Земли идеальным проводником оказывается сравнимым с расчетной погрешностью, и, более того, является пренебрежимо малой величиной по сравнению с погрешностью экспериментальных значений. Это подтверждает справедливость приближения Земной поверхности идеальным проводником для распространения КНЧ диапазона.

В параграфе 3.5.1 представлены результаты верификации глобальной метеорологической модели нижней ионосферы «Whole Atmosphere Community Climate Model» (WACCM) на расчетах параметров Шумановских резонансов. Получено, что WACCM хорошо воспроизводит резонансные частоты по сравнению с эмпирическими моделями нижней ионосферы (таблица 1), однако резонансные добротности также оказываются завышенными. На основе расчетов параметров ионосферы по модели WACCM за 2017–2018 гг. выполнены расчеты сезонной/суточной динамики резонансных частот для случая стационарного источника, а также с учетом модели одиночного дрейфующего источника. Сравнение расчетных результатов с динамикой резонансных частот, наблюдаемых в ГФО Михнево, показало, что рассчитанная сезонная/суточная динамика резонансных параметров не соответствует экспериментальным наблюдениям (рисунки 3 и 4). Такое несоответствие объясняется тем фактом, что ионосферная модель WACCM неверно описывает значения резонансных добротностей (т. е. затухание КНЧ радиоволн в волноводе Земля-ионосфера), а значит не в состоянии корректно воспроизвести влияние распределения глобальных центров молниевой активности на параметры Шумановских резонансов.

В параграфе 3.5.2 представлены результаты проверки моделей нижней ионосферы, разработанные в ИДГ РАН. Получено, что модель ИДГ-22К, также, как и климатическая модель WACCM хорошо воспроизводит резонансные частоты Шумановских резонансов при спокойных гелиогеофизических условиях (таблица 1).

Таблица 1 — Расчетные значения Шумановских резонансов согласно различным моделям нижней ионосферы

Модель нижней ионосферы	F_1 , Гц	Q_1	F_2 , Гц	Q_2	F_3 , Гц	Q_3
—	10.5	—	18.2	—	25.7	—
IRI-2016 (электроны)	9.5	28.4	16.7	39.4	23.8	38.1
Уайт-Фергюсон (электроны)	9.1	28.1	15.7	29.1	22.4	32.7
Уайт (электроны)	8.8	26.1	15.3	32.0	21.9	24.4
Уайт (электроны) + ионы	8.6	11.8	15.1	15.1	21.7	15.8
WACCM (электроны + ионы; 18.01.2018, 15 UT)	7.8	19.1	13.9	21.1	19.8	18.1
ИДГ-22К (электроны + ионы)	7.8	6.3	13.7	6.5	19.6	6.6
ИДГ-5К (электроны + ионы; 10.09.2017, 15.75 UT)	6.6	4.5	12.5	7.8	16.9	7.7
Эксперимент	7.8	4.6	14.1	6.0	20.3	6.6

Расчеты резонансных частот согласно модели ИДГ-22К при различных значениях потока солнечного рентгена привели к логарифмической зависимости изменения резонансных частот (ΔF_n) от значения потока солнечного рентгена W [Вт/м²]:

$$\Delta F_n \sim \log(W), \quad (3)$$

что подтверждается экспериментальными наблюдениями. Модель ИДГ-5К приводит к заниженным значениям резонансных частот, что может свидетельствовать о существенном влиянии малых нейтральных компонент (учитываемых в модели ИДГ-22К) на электронно-ионное содержание.

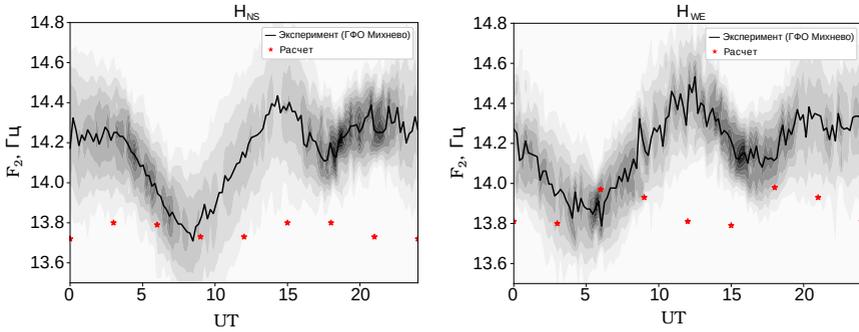


Рис. 3 — Суточная динамика второй резонансной частоты.

Экспериментальные данные представляют динамику распределения плотности вероятности второй резонансной частоты для января 2018 года. Расчетные значения получены при помощи численного расчета методом FDTD, согласно модели нижней ионосферы WACCM для 18.01.2018.

В главе 4 приведены результаты исследования Шумановских резонансов по данным регистрации горизонтальных компонент магнитного поля в ГФО Михнево, Института Динамики Гео-сфер им. академика М.А. Садовского РАН. Основными проблемами определения параметров Шумановских резонансов является низкая добротность резонатора Земля-ионосфера, а также стохастический характер молниевой активности, что делает сложным определение резонансных параметров с хорошей точностью. Обзор

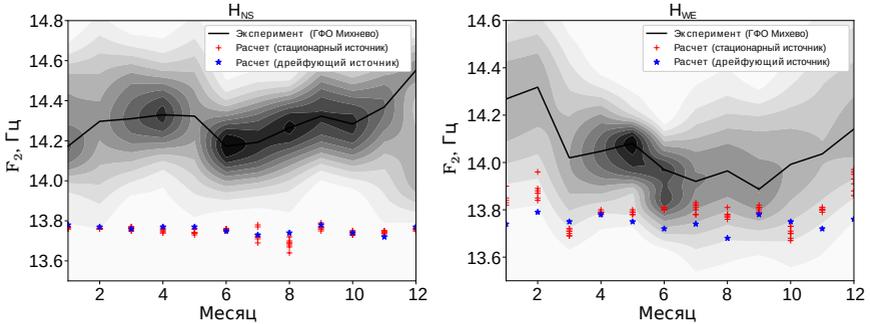


Рис. 4 — Сезонная динамика второй резонансной частоты для 0 UT, 2017 г. Экспериментальные данные представляют собой динамику распределения плотности вероятности второй резонансной частоты для месячных наблюдений (черная кривая — максимальное значение плотности вероятности).

работ, связанных с наблюдением Шумановских резонансов в различных обсерваториях, показал отсутствие единого подхода при обработке КНЧ спектра. Для станции регистрации горизонтальных компонент магнитного поля в ГФО Михнево получен оптимальный набор параметров для обработки КНЧ спектра, исходя из принципа минимизации ошибки резонансных характеристик. Приведено обоснование, что именно спектр интенсивности должен быть использован для определения аппроксимационной функции. Используя набор оптимальных параметров обработки КНЧ данных для станции ГФО Михнево, разработан программный модуль для расчета параметров Шумановских резонансов <https://doi.org/10.5281/zenodo.6378370>.

В параграфе 4.3 приведены результаты анализа суточной, сезонной, межгодовой динамики Шумановских резонансов, полученные на основе данных регистрации горизонтальных компонент магнитного поля в ГФО Михнево в 2016–2020 гг. Динамика резонансных параметров согласуется с наблюдениями на других Европейских станциях мониторинга. Сравнение с результатами наблюдения глобальной молниевой активности по данным сети «World Wide Lightning Location Network» (WWLLN) и спутниковых оптических наблюдений показало, что амплитуды Шумановских резо-

нансов хорошо отражают динамику глобальных грозových центров на различных временных масштабах.

Корреляция Шумановских резонансов с 11-летней солнечной активностью наблюдается в данных ГФО Михнево только для некоторых резонансных параметров, что может быть следствием попадания периода наблюдений характеристик Шумановских резонансов на минимум солнечной активности. Также, было продемонстрировано влияние планетарных волн в мезосфере и нижней ионосфере на резонансные параметры (рисунок 5). Это делает возможным

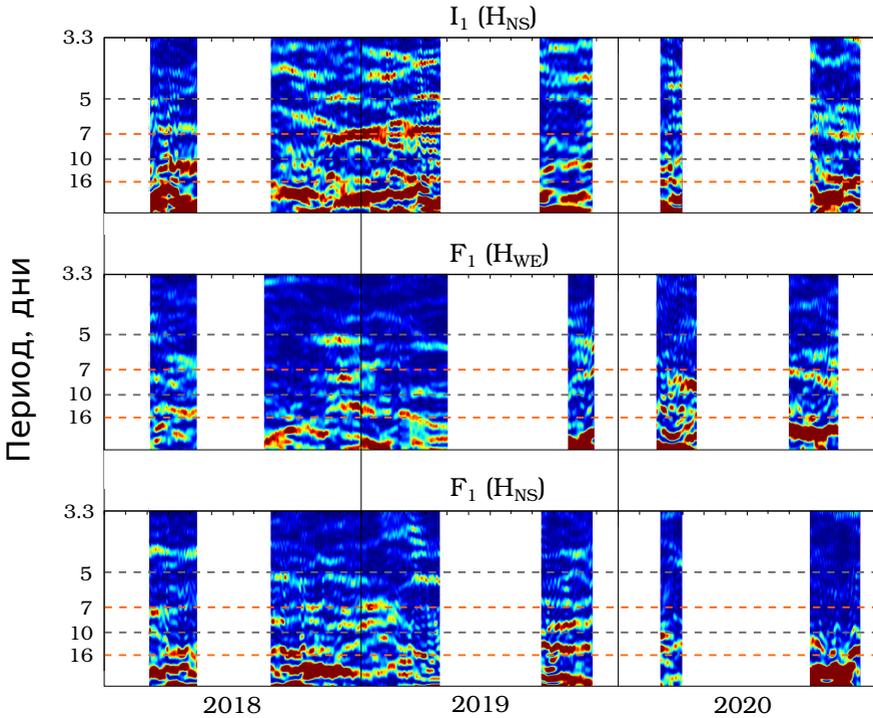


Рис. 5 — Периодограммы интенсивности (I) и резонансной частоты (F) первого Шумановского резонанса по наблюдениям динамики горизонтальных магнитных компонент (H_{NS} и H_{WE}) в ГФО Михнево.

использование Шумановских резонансов для дешевого мониторин-

га сигнатур планетарных волн, аналогично наблюдениям параметров ОНЧ радиотрасс.

Общепринятое усреднение параметров Шумановских резонансов приводит к потере информации о характере распределения отдельных значений, которое в общем случае не всегда соответствует нормальному распределению. В **параграфе 4.4** предложена методика вероятностного анализа Шумановских резонансов на основе непараметрического расчета плотности вероятности резонансных параметров. Показано, что максимум плотности вероятности отличается от среднего арифметического отдельных значений, особенно при значительном разбросе данных или наличии редких сильных отклонений резонансных параметров, связанных с влиянием мощных локальных молниевых источников. Предложенная методика используется в части сравнения экспериментальных данных с результатами расчетов.

В **заключении** отмечены **основные** результаты диссертации, выносимые на защиту.

В **приложении** приведено описание электродинамического кода на основе метода FDTD.

Публикации автора по теме диссертации

1. *Goncharov E., Lyakhov A. N., Loseva T.* 3D-FEM simulation model of the Earth-ionosphere cavity // Journal of Electromagnetic Waves and Applications. — 2019. — Т. 33, № 6. — С. 734–742.
2. *Goncharov E., Lyakhov A., Losseva T.* Seasonal Schumann Resonance variations according to magnetic field measurements at Mikhnevo observatory // 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Т. 11916 / под ред. G. G. Matvienko, O. A. Romanovskii. — International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2021. — С. 1672–1678.
3. *Goncharov E. S., Lyakhov A. N., Losseva T. V.* Long-term Schumann resonance dynamics based on horizontal magnetic field data at Mikhnevo observatory during 2016–2020 // Radio Science. — 2022. — Т. 57, вып. 5.

4. Frontiers in the D-region physics / A. N. Lyakhov [и др.] // 25th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics: Atmospheric Physics. Т. 11208 / под ред. О. А. Romanovskii, G. G. Matvienko. — SPIE, 2019. — С. 1875—1879.
5. *Lyakhov A. N., Goncharov E. S., Losseva T. V.* FDTD, FDFD, and mode sum methods for VLF-LF propagation in the lower ionosphere // 26th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Т. 11560 / под ред. G. G. Matvienko, O. A. Romanovskii. — International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2020. — С. 1885—1889.
6. *Lyakhov A. N., Goncharov E. S., Losseva T. V.* The numerical simulation of ELF-LF propagation in the Earth-ionosphere waveguide under WACCM-X results // 27th International Symposium on Atmospheric and Ocean Optics, Atmospheric Physics. Т. 11916 / под ред. G. G. Matvienko, O. A. Romanovskii. — International Society for Optics, Photonics. SPIE, 2021. — С. 1665—1671.
7. *Гончаров Е. С., Ляхов А. Н., Лосева Т.* Влияние солнечных вспышек на частоты Шумановского резонанса // Гелиогеофизические исследования в Арктике. Сборник трудов конференции (Полярный геофизический институт). — Кольский научный центр Российской академии наук (Апатиты), 2016. — С. 15—18.
8. *Гончаров Е., Ляхов А., Т.В. Л.* О возможности верификации моделей нижней ионосферы по наблюдениям Шумановских резонансов // Динамические процессы в геосферах. — 2017. — № 9. — С. 124—130.