

На правах рукописи



Семенова Надежда Александровна

**МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ КВ РАДИОВОЛН В
МАГНИТОАКТИВНОЙ ПЛАЗМЕ В ЗАДАЧАХ ИССЛЕДОВАНИЯ
ХАРАКТЕРИСТИК ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ**

1.3.4 – Радиофизика

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Нижний Новгород – 2025

Работа выполнена на кафедре распространения радиоволн и радиоастрономии радиофизического факультета ННГУ им. Н.И. Лобачевского (РФФ ННГУ).

**Научный
руководитель:**

Грач Савелий Максимович

доктор физико-математических наук,
профессор, профессор кафедры распространения радиоволн
и радиоастрономии радиофизического факультета ННГУ им.
Н.И. Лобачевского

**Официальные
оппоненты:**

Крюковский Андрей Сергеевич

доктор физико-математических наук, профессор, зав.
кафедрой Информационных технологий и
естественнонаучных дисциплин Автономной
некоммерческой организации высшего образования
«Российский новый университет» (АНО ВО РосНОУ)

Падохин Артем Михайлович

кандидат физико-математических наук, доцент кафедры
физики атмосферы (физический факультет) МГУ имени М.В.
Ломоносова

**Ведущая
организация:**

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Арктический и антарктический научно-исследовательский
институт» (АНИИ)

Защита состоится 20 мая 2026 года в 15 ч. 00 мин. на заседании
диссертационного совета 24.2.340.03, созданного на базе Нижегородского
государственного университета им. Н.И. Лобачевского по адресу: 603022, г.
Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1, ауд. 420.

С диссертацией можно ознакомиться в фундаментальной библиотеке
Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского и на
сайте <https://diss.unn.ru/1603>.

Отзывы на автореферат в двух экземплярах, заверенные печатью, просьба
направлять по адресу: 603022, г. Нижний Новгород, пр. Гагарина, 23, корп. 1,
ауд. 420, ученому секретарю диссертационного совета 24.2.340.03.

Автореферат разослан _____ г.
Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.340.03,
д. ф.-м. н., профессор



А.В. Ключев

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность и степень разработанности темы исследования

Интерес к исследованиям в области распространения радиоволн декаметрового диапазона связан с широким использованием их для дальней радиосвязи, загоризонтной радиолокации и диагностики ионосферной плазмы, что определяется задачами мониторинга ионосферы в целях повышения надежности радиосвязи [1, 2].

Особенности распространения декаметровых радиоволн в неоднородной ионосфере исследуются, как правило, на основе лучевого подхода (применения метода геометрической оптики к расчету траекторий их распространения) [3-5] с учетом дисперсионных свойств нормальных волн в неоднородной магнитоактивной плазме. Эти свойства к настоящему времени хорошо изучены, см., например [4]. К настоящему времени накоплен достаточно большой опыт в расчетах лучевых траекторий электромагнитных волн в неоднородных средах, для чего созданы соответствующие специализированные пакеты программ, доступные в том числе, в сети интернет, см., например [6]. Как правило, такие программы предназначены для решения узкоспециализированных задач, и их использование даже для проблем, весьма близких, но несколько отличающихся по своей тематике, оказывается затруднительным. Несмотря на тот факт, что методы и алгоритмы расчета характеристик радиоволн в неоднородной ионосфере хорошо известны [3, 7-11], задача создания пакетов программ, удобных для оперативного анализа и моделирования условий распространения радиоволн в условиях конкретных экспериментов, в том числе в возмущенной ионосфере, с использованием данных зондирования ионосферы и применения этих пакетов для интерпретации полученных в этих экспериментах результатов, остается несомненно актуальной.

Мощная электромагнитная волна (волна накачки (ВН)), излучаемая с Земли в ионосферу, вызывает целый ряд различных плазменных процессов в возмущенной области ионосферы. Эти процессы исследуются различными диагностическими методами, в том числе, с помощью вертикального, слабонаклонного и наклонного зондирования и просвечивания возмущенной области ионосферы радиоволнами КВ, УКВ и СВЧ диапазонов (пробные волны, ракурсное рассеяние, радары некогерентного рассеяния, прием сигналов искусственных спутников Земли, в частности, навигационных спутников систем ГЛОНАСС и GPS и низкоорбитальных пролетных спутников), а также измерения излучения из возмущенной области в оптическом и радио-диапазонах [12-17]. Ряд исследований был проведен при запусках геофизических ракет через возмущенную область [18]. В соответствующих экспериментах изучаются структура пространственного и частотного спектра плазменных волн; спектры и динамика низкочастотных возмущений с масштабами от десятков см до десятков км; дополнительная ионизация и оптическое свечение, вызываемые ускоренными электронами; искажения

(модификация) профиля электронной концентрации; искусственное радиоизлучение в КВ и СВЧ диапазонах; крупномасштабное расслоение ионосферной плазмы, проникновение искусственной турбулентности плазмы во внешнюю ионосферу и др. При этом существенное внимание уделяется комплексному (одновременному) применению различных средств диагностики, например, измерений сигналов радаров некогерентного рассеяния, искусственному радиоизлучению (ИРИ или в английской терминологии – stimulated electromagnetic emission, SEE) и искусственному оптическому свечению (ИОС).

Часть эффектов, обнаруженных в экспериментах, связана с возникновением в плазме неоднородностей электронной концентрации, вытянутых в направлении геомагнитного поля, что приводит к изменению направления распространения радиоволн и их рассеянию. При воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением возникают средние- и крупномасштабные неоднородности, захватывающие или отклоняющие сигнал, а также магнитоориентированные мелкомасштабные неоднородности (ММН), вызывающие ракурсное рассеяние сигналов КВ радиоволн [19] и ответственные за т.н. аномальное ослабление ВН и близких по частоте пробных волн [20].

Для детального изучения свойств искусственных возмущений, в частности, особенностей генерации ИРИ, расположения областей генерации ИОС, влияния искусственных неоднородностей с масштабами $\sim 1\text{--}10$ км на область генерации ИОС; расположения области, ответственной за ракурсное рассеяние пробных радиоволн на искусственных ММН ($\lesssim 100$ м) при различных углах падения ВН на ионосферу, необходимо знание параметров ВН и пробных волн (траекторий их распространения, амплитуды, поляризации), распространяющихся в возмущённой области ионосферы, которые можно найти с помощью расчета лучевых траекторий.

Помимо искусственных неоднородностей, существенное влияние на распространение радиоволн оказывают средние- и крупномасштабные естественные неоднородности, к которым, в частности, относятся перемещающиеся ионосферные возмущения (ПИВ). Такие неоднородности являются трудно прогнозируемыми и при этом могут сильно влиять на точность позиционирования в задачах загоризонтной радиолокации и спутниковой навигации, искажая сигнал, что снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения. В частности, может происходить сильное отклонение траектории сигнала от его траектории в невозмущенной ионосфере, что приводит к неопределённостям при модельном прогнозировании характеристик радиосигналов, проходящих через область прохождения ПИВ. На практике эксперимента это может выражаться, например, в появлении искажений дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) наклонного зондирования (НЗ) и изменения максимально наблюдаемых частот (МНЧ) [21, 22].

Для построения детальной картины всех вышеперечисленных процессов,

происходящих в возмущенной области ионосферы, необходима подробная информация о состоянии ионосферы для конкретных условий эксперимента и проведение расчетов лучевых траекторий и поляризации декаметровых радиоволн именно в этих условиях. В связи с этим важной задачей является моделирование распространения радиоволн при параметрах среды, имеющих место при проведении того или иного эксперимента. В результате моделирования могут быть получены необходимые характеристики сигнала для последующего их сопоставления с экспериментальными данными. Для этого требуется программное обеспечение, позволяющее производить расчет большого числа лучевых траекторий с последующим извлечением, накоплением и сортировкой таких характеристик в каждой точке лучевой траектории, как показатель преломления, временная задержка, направление волнового вектора и поляризация. Такое использование лучевого метода весьма желательно, а иногда и необходимо для адекватной интерпретации ионосферного эксперимента. В частности, подобные пакеты используются при анализе результатов ионосферных экспериментов на нагревных стендах [23] и экспериментов по управляемому термоядерному синтезу [24].

На основе анализа характеристик становится возможной дальнейшая и более глубокая интерпретация результатов экспериментальных исследований естественных возмущений ионосферы и плазменных процессов, инициированных в ней мощными радиоволнами. В связи с этим, тема исследований диссертационной работы представляется несомненно актуальной и практически значимой.

Целью работы является применение траекторных расчетов для интерпретации данных экспериментов по воздействию мощным радиоизлучением на ионосферу и по исследованию распространения декаметровых радиоволн на различных трассах при наличии ПИВ.

Для достижения поставленной цели работы решались следующие **задачи**:

1. Развитие методики применения расчетов траекторий распространения коротких радиоволн в ионосфере, включающей использование как реальных профилей электронной концентрации в ионосфере, восстановленных по ионограммам вертикального зондирования, так и различных моделей среды, для интерпретации результатов реальных экспериментов по исследованию структуры возмущенной ионосферы.

2. Исследование особенностей искусственного радиоизлучения (ИРИ) и искусственного оптического свечения (ИОС) в зависимости от условий воздействия на ионосферу мощным радиоизлучением: а) зависимость спектров ИРИ от угла падения волны накачки (ВН) на ионосферу при частотах ВН, близких к 4-ой гармонике электронной циклотронной частоты; б) интерпретация наблюдаемого положения области генерации ИОС при вертикальном воздействии ВН и воздействии в магнитный зенит (МЗ).

3. Развитие методики определения положения искусственных мелкомасштабных магнитоориентированных неоднородностей (ММН),

возникающих при нагреве ионосферы мощными волнами, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн на короткой трассе Казань–Нижегород, по ионограммам наклонного зондирования (НЗ).

4. Определение характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПВ) на основе сопоставления экспериментальных ДЧХ с расчетными, полученными с помощью моделирования распространения КВ радиоволн в возмущенной ПВ ионосфере на коротких и длинных трассах.

Научная новизна диссертационной работы

1. Показано, что обнаруженный в эксперименте эффект уменьшения интенсивности ИРИ при частотах ВЧ ниже четвертой гармоники электронной циклотронной частоты ($f_0 \lesssim 4f_{ce}$) по сравнению со обратным случаем $f_0 \gtrsim 4f_{ce}$ при увеличении угла наклона центрального луча диаграммы направленности станда «Сура» на ионосферу в плоскости магнитного меридиана на юг связан с уменьшением высоты отражения при больших углах падения и разницей дисперсионных свойств плазменных волн при частотах выше и ниже четвертой гармоники. Показано, что снижение интенсивности ИРИ при наклоне центрального луча ДН станда НААРП на север связано со свойствами поляризации ВЧ при различных углах наклона ДН станда по отношению к направлению магнитного поля, а также что наиболее интенсивная генерация ИРИ происходит при взаимодействии ВЧ с плазмой на восходящих участках траектории распространения.

2. Установлено, что возрастание интенсивности ИРИ в случае диаграммы направленности (ДН) станда, наклоненной по отношению к вертикали на 14° на север определяется эффектом «зеркального магнитного зенита», т.е. распространением отраженной ВЧ вдоль геомагнитного поля и усилением ее взаимодействия с ионосферой в этом случае на нисходящем участке траектории.

3. Установлено, что смещение пятна свечения ИОС на север при вертикальном воздействии ВЧ на ионосферу связано с увеличением высоты области плазменного резонанса, где происходит ускорение электронов, и их высыпанием вдоль геомагнитного поля на север на более низкие высоты, где имеет место максимум возбуждения атомов кислорода и генерация оптического свечения в красной линии атомарного кислорода с длиной волны 630 нм.

4. С помощью траекторных расчетов для ВЧ при ее наклонном падении на ионосферу при наличии в ионосфере крупномасштабных неоднородностей электронной концентрации показано, что наблюдение пятна ИОС в магнитном зените (МЗ) при наличии связано с фокусировкой ВЧ на крупномасштабных неоднородностях.

5. С помощью траекторных расчетов установлено местоположение области и характеристики рассеивающих неоднородностей, ответственных за обратное ракурсное рассеяние радиоволн на трассе Казань–Васильсурск–Казань при различных частотах зондирующих сигналов. Развита методика определения местоположения неоднородностей при зондирующем сигнале ионозонда,

работающего в режиме снятия ионограмм.

6. Определены параметры ПИВ, наблюдаемых в эксперименте по одновременному ЛЧМ-зондированию на трёх среднеширотных слабонаклонных трассах, а также в эксперименте по сильно-наклонному ЛЧМ-зондированию на длинной трассе Кипр–Нижний Новгород.

Научная и практическая ценность

В ходе диссертационной работы был развит комплексный подход, позволяющий наиболее простым и удобным способом сопоставлять выполненные в разработанной программной среде расчеты траекторий лучей и их характеристик с результатами экспериментов по воздействию на ионосферу мощным радиоизлучением, в частности, экспериментов по исследованию искусственного радио- и оптического свечения ионосферы, а также экспериментов по ракурсному рассеянию радиоволн в условиях возвратно-наклонного зондирования (ВНЗ), что дало возможность детальной интерпретации таких экспериментов с точки зрения описания физических процессов, обуславливающих особенности и модификацию структуры ионосферы. На основе расчетов в программной среде, построенной с применением известных алгоритмов, предложена методика определения положения и характеристик искусственных ионосферных неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн на короткой трассе по ионограммам наклонного зондирования (НЗ). Представленный метод моделирования распространения КВ радиоволн в ионосфере применим и к задаче определения характеристик перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), с учетом динамики их движения.

Разработанное программное обеспечение является удобным инструментом для моделирования распространения волн в процессе экспериментов по детальному исследованию искусственного радио- и оптического свечения ионосферы, в том числе, эффекта «магнитного зенита» (МЗ) и ракурсного рассеяния дециметровых радиоволн в возмущенной области, для сравнительного анализа эффектов воздействия мощной волны накачки (ВН) на ионосферу на нагревных стендах, подобных стендам «Сура» и НААРР. Проводимое в данных условиях моделирование распространения КВ радиоволн позволяет спрогнозировать отклонение сигнала и изменение его характеристик при его прохождении через возмущенную область, что особенно важно в задачах по исследованию ПИВ. Предложенные модели ПИВ расширяют ряд существующих на данный момент моделей и позволяют учитывать более широкий спектр особенностей ПИВ в целях их детальной диагностики. Кроме того, полученные результаты траекторных расчетов позволили сделать корректную интерпретацию обнаруженных эффектов искусственного оптического свечения (ИОС) при воздействии на ионосферу мощным радиоизлучением, а именно, объяснить причины смещения пятна оптического свечения на север в случае вертикального нагрева и на юг в область магнитного

зенита в случае наклонного нагрева ионосферы, а также зависимость ИРИ от угла выхода ВН, что вносит важный вклад в изучение природы и особенностей данных эффектов. Полученные результаты, позволили развить представление о структуре и динамике искусственных и естественных ионосферных неоднородностей.

Методология и методы исследования

В работе использовались методы численного моделирования распространения радиоволн в приближении геометрической оптики для неоднородных анизотропных сред. Для описания структуры возмущенной ионосферы и ее динамики использовались различные трехмерные модели локальных неоднородностей электронной концентрации с возможностью вариации их параметров, экспериментальные данные вертикального и наклонного зондирования, а также эмпирическая модель ионосферы IRI2016. Для проверки корректности результатов численных расчетов проводился сравнительный анализ ионосферных параметров среды с данными ионозондов.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Созданный пакет программ для моделирования распространения КВ радиоволн в ионосфере с использованием реальных и модельных профилей электронной концентрации, а также моделей возмущений (неоднородностей среды) позволяет интерпретировать данные экспериментов по воздействию мощным радиоизлучением на ионосферу и по исследованию распространения декаметровых радиоволн на различных трассах при наличии перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

2. С помощью расчетов лучевых траекторий и поляризации волны накачки (ВН) удастся обосновать причину ослабления интенсивности искусственного радиоизлучения (ИРИ) при $f_0 \lesssim 4f_{ce}$ по сравнению со случаем $f_0 \gtrsim 4f_{ce}$ при увеличении угла наклона диаграммы направленности (ДН) нагревного стэнда «Сура» на юг от 14° до 18° ; объяснить ослабление искусственного радиоизлучения (ИРИ) для северных углов наклона к вертикали центрального луча ДН нагревного стэнда HAARP в плоскости магнитного меридиана; увеличения интенсивности ИРИ при наклоне ДН стэнда HAARP на 14° на север.

3. Наблюдаемое смещение на север пятна искусственного оптического свечения (ИОС) ионосферы в красной линии атомарного кислорода для вертикального воздействия волны накачки (ВН) при увеличении высоты ее отражения связано с высыпанием ускоренных электронов вдоль магнитного поля от высот генерации плазменных волн до высот генерации свечения; б) наблюдаемое смещение на юг (в «магнитный зенит», угол зрения 19°) положения пятна свечения при наклоне диаграммы направленности (ДН) стэнда «Сура» на юг на 12° связано с фокусировкой волны накачки (ВН) на крупномасштабных неоднородностях электронной концентрации.

4. На основе траекторных расчетов зондирующих волн на трассе Казань–

Васильсурск–Казань и характеристик, ответственных за их ракурсное рассеяние на искусственных магнитоориентированных мелкомасштабных неоднородностях (ММН), созданных излучением стенда «Сура», удается определить местоположение этих неоднородностей в возмущенной области ионосферы.

Моделирование распространения КВ радиоволн на коротких (120-240 км) и длинной (~2500 км) трассах с учетом модели возмущенной ионосферы позволяет определить параметры перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ), в том числе величину скорости и направление их перемещения.

Степень достоверности и апробация результатов

Достоверность и обоснованность результатов и выводов диссертационной работы определяются корректностью применения лучевого метода геометрической оптики для описания распространения и рассеяния КВ радиоволн в плавно-неоднородной среде (ионосфере), возможностью непротиворечивого использования результатов для объяснения причин наблюдаемых явлений, связанных с воздействием мощного радиоизлучения на ионосферу, сходством выбора моделей перемещающихся ионосферных возмущений с моделями, используемыми другими авторами. Основные положения диссертации неоднократно докладывались и обсуждались на научно-технических конференциях, включая международные, они опубликованы в журналах, входящих в перечень ВАК для кандидатских диссертаций и индексируемых в библиографических базах WoS и Scopus.

Апробация работы и публикации

По теме диссертации опубликовано 16 работ: 7 статей в изданиях, рекомендованных ВАК (Geophysical Research Letters; Известия ВУЗов, Радиофизика; Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского); 1 тезис доклада в сборнике докладов всероссийской открытой научной конференции; 2 тезиса доклада в сборниках материалов международных научных конференций; 5 статей в сборниках трудов региональных научных конференций; 1 статья в сборнике трудов международной научной конференции.

Основные результаты работы были представлены на следующих научных семинарах, симпозиумах и конференциях: XXII международная конференция "Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса". Москва, ИКИ, 11–15 ноября 2024 г.; XXVIII научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, ННГУ, 14–31 мая, 2024 г.; XXVII научная конференция по радиофизике, Нижний Новгород, ННГУ, 15–25 мая 2023 г.; XXVIII всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн». Йошкар-Ола, ПГТУ, 16–19 мая, 2023 г.; XX международная конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса (Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов)». Москва, ИКИ РАН, 14–18

ноября, 2022 г.; XXIII научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, ННГУ, 13–21 мая 2019 г.; XIX научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, ННГУ, 11–15 мая 2015 г.; Международная научная конференция «Излучение и рассеяние электромагнитных волн» ИРЭМВ-2015. Краснодарский край, Геленджикский район, п. Дивноморское, ЮФУ, 23–28 июня, 2013 г.; XVII научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, ННГУ, 13–17 мая 2013 г.; XVI научная конференция по радиофизике. Нижний Новгород, ННГУ, 11–18 мая 2012 г.

Личный вклад автора

На основе известных алгоритмов автором реализован пакет программ для проведения траекторных расчетов распространения КВ радиоволн в ионосфере для условий конкретных реальных экспериментов. По результатам проведенных автором расчетов с использованием реальных профилей электронной концентрации в ионосфере и их сопоставления с данными по измерениям искусственного оптического свечения ионосферы (ИОС), искусственного радиоизлучения (ИРИ) ионосферы и сигналов ракурсного рассеяния радиоволн при различных наклонах диаграммы направленности нагревных стенов к вертикали, а также сопоставления результатов расчетов модельных и экспериментальных ДЧХ на различных КВ радиотрассах совместно с соавторами проанализированы полученные экспериментальные результаты и дана их интерпретация, а также, определены параметры перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ).

Объем и структура работы

Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав основного материала, заключения, списка сокращений и списка цитируемой литературы, содержащего 139 ссылок. Общий объем диссертации – 156 страниц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

В первой главе кратко изложена методика расчетов лучевых траекторий в магнитоактивной ионосферной плазме на основе известных алгоритмов в приближении геометрической оптики. Приведена система уравнений для расчета и примеры расчета лучевых траекторий в плоскостной среде в декартовой системе координат, а также в трехмерной сферической системе координат, связанной с реальной географической системой координат, что справедливо как для случая сферически-слоистой, так и плавно-неоднородной среды распространения волн при наличии в ионосфере неоднородностей электронной концентрации.

Для определения времени группового запаздывания τ (а, следовательно, и временной задержки сигнала) используется присоединенное к системе уравнение:

$$\frac{d\tau}{dt} = 1 + \frac{f}{n} \frac{\partial n}{\partial f}, \quad (1)$$

Здесь t – параметр, изменяющийся вдоль луча и пропорциональный времени распространения волны, f – частота волны.

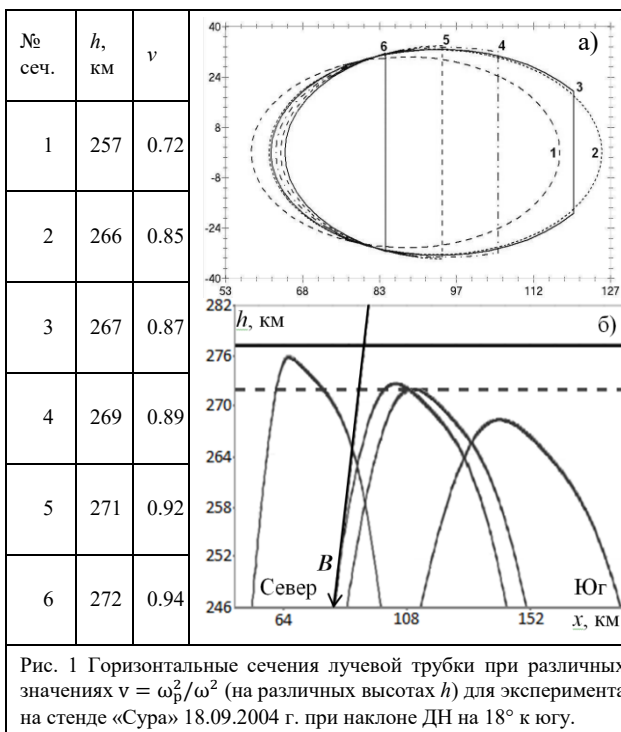
Решением системы уравнений является траектория волны (r, θ, φ) и ее параметры вдоль луча, такие как показатель преломления n ; углы, определяющие направление волнового вектора δ, ξ (для расчета поляризации волны); время задержки сигнала τ ; – необходимые для построения интерпретации экспериментов.

Во второй главе проведено моделирование распространения радиоволн в ионосферной плазме, в ходе которого была дана детальная интерпретация ряда результатов исследования неоднородной структуры ионосферы с помощью пробных радиоволн, искусственного радио- и оптического излучения из возмущенной области ионосферы, проходящих через возмущенную область, применительно к результатам экспериментов по воздействию мощного КВ радиоизлучения на ионосферу, полученных на стенде «Сура» и на высокоширотном стенде HAARP [1a-3a]. Результаты расчетов использованы для объяснения наблюдаемых в экспериментах особенностей спектра искусственного радиоизлучения ионосферы вблизи 4-й электронной гирогармоники и положения пятна искусственного оптического свечения на небосводе.

В **подразделе 2.1.1** рассмотрен эффект уменьшения интенсивности искусственного радиоизлучения ионосферы (ИРИ) в области отрицательных отстроек ($\Delta f < 0$) при частотах волны накачки (ВН) меньших четвертой электронной гирогармоники ($f_0 \lesssim 4f_{ce}$), при увеличении угла падения ВН на ионосферу [1a].

Выполненные расчеты сечения лучевой трубки показывают, что максимальная площадь засветки ионосферы, соответствующая наибольшей площади сечения лучевой трубки (см. сечения лучевой трубки 1, 2 на рис. 1a), приходится на область более низких высот. При этом может возникать ситуация, когда наибольшая область засветки не совпадает по высоте с областью существования плазменных волн, расположенной выше или ниже высоты двойного резонанса в зависимости от частоты ВН ($f_0 \lesssim 4f_{ce}$ или $f_0 \gtrsim 4f_{ce}$), где происходит наиболее эффективное взаимодействие ВН с ионосферной плазмой. В случае $f_0 \lesssim 4f_{ce}$ высотная область существования плазменных волн в ионосфере в соответствии с расчетами, проведенными в работе [25], оказывается ограниченной снизу, в то время как во втором случае ($f_0 \gtrsim 4f_{ce}$) диапазон высот существования плазменных волн оказывается существенно шире и даже захватывает область высот ниже уровня верхнего гибридного резонанса. По этой причине, при увеличении угла наклона ДН у большей части лучей, составляющих лучевую трубку, наивысшая точка траектории оказывается ниже области существования плазменных волн при $f_0 \lesssim 4f_{ce}$ (см.

результаты траекторных расчетов на рис. 1б). В то же время, на область их существования, которая лежит выше, приходится меньшая площадь засветки (см. урезанные по форме сечения лучевой трубки 5, 6 на рис. 1а). В случае, когда частота ВН превышает частоту двойного резонанса ($f_0 \gtrsim 4f_{ce}$), практически все лучи ВН отражаются в области существования плазменных волн, как при малом, так и большем наклоне ДН. Таким образом, удастся объяснить причину снижения интенсивности компоненты ИРИ при наклоне ДН стенда на юг



на 18° в сравнении со случаем наклона на 14° при условии $f_0 \lesssim 4f_{ce}$.

В подразделе 2.1.2 посредством расчета траектории и поляризации мощной волны объясняется зависимость интенсивности ИРИ от угла α наклона (к вертикали) диаграммы направленности стенда HAARP для условий эксперимента 29 марта 2011 года [2а]. Данная зависимость заключается в обнаружении в эксперименте следующих эффектов: для наклона ДН стенда на север интенсивность всех компонент спектра ИРИ уменьшается с $|\alpha|$ по сравнению со случаем наклона ДН на юг, в частности, когда максимальная интенсивность ИРИ наблюдается при $\alpha = 14^\circ$, т.е. при направлении ДН в «магнитный зенит»; более слабый эффект усиления ИРИ наблюдается при $\alpha = -14^\circ$, что соответствует так называемому «зеркальному магнитному зениту».

На рис. 2 представлены результаты расчета лучевых траекторий для частоты $f = 5.83$ МГц для условий эксперимента для 5 из 9 использованных углов падения ВН на ионосферу. Тонкими линиями на восходящих и нисходящих участках траекторий ВН в плоскости магнитного меридиана изображены участки квазипродольного распространения волны, для которого выполняется условие (следует из подкоренного выражения (4)):

$$u^2 \sin^4 \vartheta \ll 4u(1 - \nu)^2 \cos^2 \vartheta \quad (2)$$

Жирными линиями показаны участки квазипоперечного распространения:

$$u^2 \sin^4 \vartheta \gg 4u(1 - v)^2 \cos^2 \vartheta \quad (3)$$

Квазипоперечное приближение [4] справедливо на восходящих участках лучевых трасс и вблизи их вершин (жирные линии на рис. 2, (3)). Для этих участков траекторий проекция электрического поля мощной волны на направление геомагнитного поля **B** значительно превосходит перпендикулярные

проекции, $|E_{||}| \gg |E_{\perp}|$, и, следовательно, возбуждаются плазменные волны, которые

распространяются вдоль **B** ($k_p || B$), т.е. ленгмюровские волны. По этой причине «продольная» поляризация ВН приводит к уменьшению эффективности ее взаимодействия с плазменными верхнегибридными волнами (УН), у которых вектор напряженности электрического поля почти перпендикулярен геомагнитному полю, $E_{uh} \perp B$, и следовательно, практически перпендикулярен вектору напряженности электрического поля ВН ($E_{uh} \perp E$), в силу чего верхнегибридные волны не вносят заметного вклада в генерацию ИРИ. Таким образом, возбуждение квазиэлектростатических УН волн, распространяющихся поперек **B** из-за взаимодействия мощной ВН и ММН должно ослабевать.

Квазипродольное приближение для наклонов ДН на юг справедливо почти до вершин лучевых траекторий (тонкие линии на рис. 2, (2)). При квазипродольном распространении ВН вектор напряженности электрического поля оказывается, главным образом, ориентирован поперек волнового вектора ($E \perp k$). Практически вдоль всей восходящей траектории вектор электрического поля мощной волны перпендикулярен геомагнитному полю ($|E_{\perp}| \gg |E_{||}|$), и в области плазменного резонанса имеет место эффективное возбуждение УН плазменных волн и ММН (т.к. выполняется условие $E_{uh} || E$), для создания которых используется 60-ти секундный нагрев. Этого времени оказывается заведомо достаточно для создания ММН и возбуждения верхнегибридных волн. Таким образом, плазменная УН турбулентность возбуждается достаточно эффективно.

При северных наклонах ДН ИРИ слабее, чем при южных, т.к. на восходящем участке взаимодействие северных лучей с ионосферной плазмой ослаблено в области, близкой к плазменному резонансу (квазипоперечное распространение), и возбуждение ИРИ менее эффективно, т.к. меньший

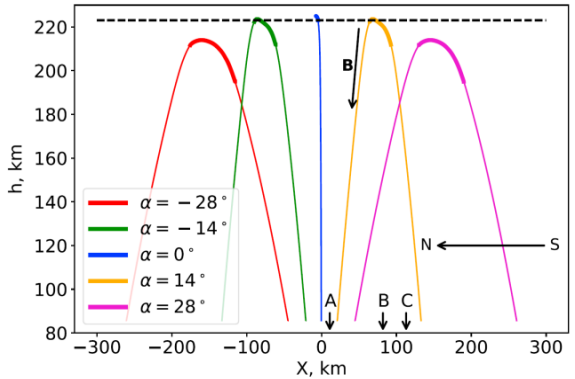


Рис. 2 Лучевые траектории для различных углов падения мощной волны с частотой 5.83 кГц для плоскостойкой ионосферы. Соответствующая ионограмма зарегистрирована в 17:54:50 AKDT. Положения пунктов приема показаны черными стрелками.

восходящий участок траектории приходится на область взаимодействия ВН с верхнегибридными волнами. Кроме этого, расчет траекторий лучей (рис. 2) также показывает, что ИРИ для больших наклонов ДН станда ($\alpha = \pm 21^\circ, \pm 28^\circ$) должно генерироваться на несколько километров ниже высоты верхнего гибридного резонанса (ВГР).

При $\alpha = -14^\circ$, в соответствии с проведенными траекторными расчетами, отраженная от ионосферы ВН распространялась почти вдоль магнитного поля, где справедливо квазипродольное приближение, подразумевающее усиление взаимодействия мощной волны с ионосферной плазмой (см. рис. 2). В этом случае ИРИ менее интенсивное, чем в случае «магнитного зенита», т.к. отраженная ВН по мощности слабее падающей на ионосферу ВН вследствие потерь энергии ВН на возбуждении плазменных волн на восходящем участке.

В подразделе 2.2.1 приведен другой пример применения траекторных расчетов для интерпретации экспериментов по воздействию КВ-радиоизлучения служит интерпретация положения на небосводе пятна искусственного оптического свечения в красной линии атомарного кислорода с длиной волны 630 нм, возникающего в результате возбуждения атомов кислорода при столкновениях с электронами, ускоренными плазменными волнами, возбужденными мощной волной. Согласно [3а, 26], оптическое свечение генерируется на высотах 230÷270 км, где достаточно высока концентрация атомов кислорода.

Согласно результатам эксперимента 2010 г. при вертикальном воздействии мощной волны на ионосферу, пятно оптического свечения смещено к северу относительно геометрической проекции ДН станда «Сура» на небосвод [26]. Для объяснения данного смещения был проведен расчет траекторий лучей ВН с углами выхода $-6^\circ, 2^\circ$ и 6° для частоты $f_0 = 4.375$ МГц в плоскости магнитного меридиана в соответствии с данными эксперимента 03.09.2010г для трех последовательных моментов времени (рис. 3а). Профиль электронной концентрации на рис. 6а получен из ионограммы, снятой в 21:35 LT. Профили электронной концентрации на рис. 3 (б, в) для моментов времени 21:44:45 LT и 21:50:45 LT, соответственно, были построены по усредненным данным ионограмм, зарегистрированных в ближайшее к эксперименту время.

Когда ионосфера наиболее низкая, центр пятна свечения совпадает с центром ДН на высоте верхнего гибридного резонанса (250 км), и, в то же время, совпадает с высотой предполагаемого максимума возбуждения атомов кислорода и генерации свечения, пятно свечения занимает практически всю область, ограниченную ДН.

Сопоставление траекторных расчетов с экспериментальными снимками пятна свечения в последовательные моменты времени показало, что чем выше ионосфера (уровень верхнего гибридного резонанса), тем больший путь проходят электроны вниз вдоль магнитного поля до высоты 250 км, где происходит наиболее эффективная генерация оптического свечения в красной линии атомарного кислорода, и тем больше смещение пятна на север.

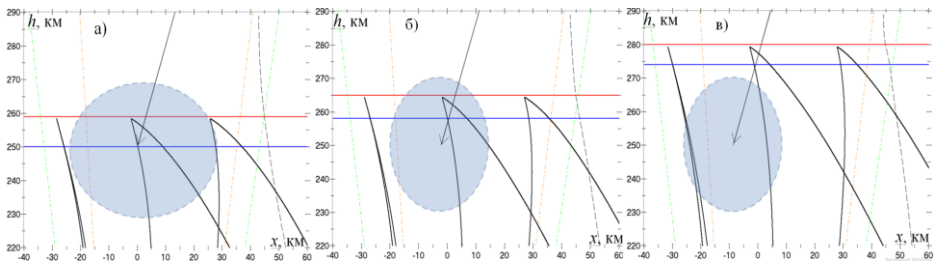


Рис. 3 Лучевые траектории ВН с углом выхода -6° , 2° и 6° для частоты $f_0 = 4.375$ МГц в плоскости магнитного меридиана для: а) 21:35 LT; б) 21:44:45 LT; в) 21:50:45 LT. Зеленым и оранжевым пунктиром с точкой показано поле зрения устройства формирования изображения и границы луча накачки, соответственно. Красной и синей линиями показаны уровни плазменного и верхнего гибридного резонанса, соответственно. Черным пунктиром схематично показан профиль электронной концентрации (электронная концентрация нарастает справа налево по оси абсцисс). Направление магнитного поля показано стрелкой.

В подразделе 2.2.2 была проанализирована эффективность захвата электромагнитной волны (ВН) в крупномасштабную неоднородность (с поперечными размерами 0.5 – 15 км) в возмущенной области ионосферы в зависимости от характерных параметров неоднородности и ее расположения, в том числе в МЗ, посредством моделирования поведения обыкновенной волны в присутствии неоднородностей, вытянутых вдоль геомагнитного поля, чему соответствует трехмерное распределение электронной концентрации:

$$N(x, y, z) = N_0(z) - \sum_{i=1}^m N_i(x, y, z), \quad (4)$$

где m – число неоднородностей с известными координатами центров и расстояниями между соседними неоднородностями; $N_0(z)$ – значение электронной концентрации в невозмущенной ионосфере, полученное путем обработки ионограммы ВЗ ионосферы в месте расположения нагревного стенда.

$$\Delta N_i(x', y', z') = n_i \cdot \exp \left[-\left(\frac{x'}{a} \right)^2 - \left(\frac{y'}{b} \right)^2 - \left(\frac{z'}{c} \right)^2 \right] \quad (5)$$

– возмущение электронной концентрации, связанное с наличием крупномасштабных неоднородностей, в локальной системе координат x', y', z' , связанной с их центрами; n_i – амплитуды ($n_i < 0$); a, b, c – характерные масштабы неоднородностей.

При наличии неоднородностей уровень $\nu = 1$ представляет собой криволинейную поверхность, которой ограничена область распространения в виде «каверны», в которой может происходить захват волны (на рис. 4а приведены примеры расчетов соответствующих траекторий волн).

Отдельный интерес представляет исследование зависимости эффективности фокусировки лучей внутри вытянутой вдоль геомагнитного поля области неоднородности и, следовательно, яркости свечения от поперечного и продольного размера каверны, ее глубины и положения относительно МЗ (когда вытянутая вдоль магнитного поля неоднородность находится под углом зрения 18.5°). Был проведен анализ расчета, основанный на сопоставлении угла наблюдения неоднородности γ и диапазона углов выхода волн, при попадании в

который все лучи будут захвачены неоднородностью. Угол γ определяется как:

$$\gamma = \text{tg}^{-1}((R_3 + h) \cdot (\varphi - \varphi_0) / h), \quad (6)$$

где R_3 – радиус Земли, φ_0 – широта нагревного стенда «Сура», φ и h – широта и высота центра неоднородности. Соответствующие траекторные расчеты проводились для нескольких значений амплитуды, продольного и поперечного размера неоднородности. На рис. 4б приведен вариант такого расчета, который согласуется с результатом эксперимента, представленного на рис. 4в, где при наклоне ДН стенда «Сура» на юг на 12° (или 16°), пятно свечения оказывается смещенным в 19° на юг, т.е. попадает в МЗ [3а].

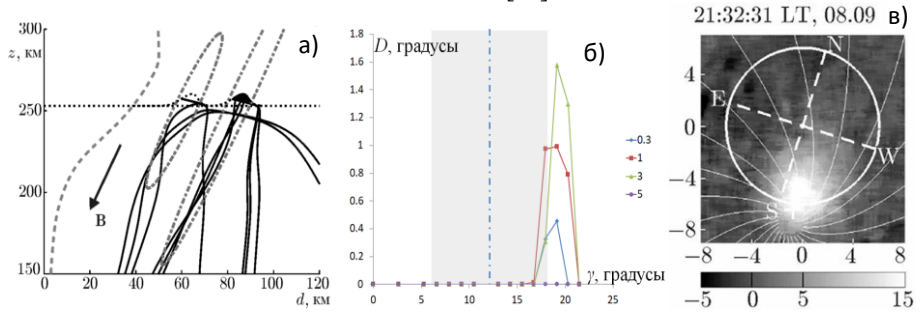


Рис. 4 а) Траектории лучей с углами выхода к вертикали (слева направо) 12.5° ; 13.5° ; 14.5° и 17.5° ; 18.5° ; 19.5° в плоскости магнитного меридиана при наличии крупномасштабных неоднородностей. Профиль электронной концентрации получен по данным ионограммы ВЗ 08.09.2010 г. 21:23 LT для условий эксперимента на стенде «Сура» для частоты ВН $f = 4.74$ МГц, когда пятно оптического свечения находилось в МЗ. Стрелкой показано направление магнитного поля, чёрными точками показан уровень отражения ВН $\nu = 1$. Параметры неоднородностей: $a=b=5$ км, $c=50$ км и $c=100$ км, $\delta = n_i/N_0 = 0.1$. б) Зависимость ширины D диапазона углов выхода волн, захватываемых неоднородностью, от угла наблюдения γ неоднородности с параметрами $a=b=0.3$ км, 1 км, 3 км, 5 км (показаны синим, красным, зеленым и фиолетовым цветами, соответственно), $c = 75$ км, $\delta = 0.03$. Серым прямоугольником показана область углов, ограниченная ДН стенда, наклоненной на 12° к югу и полушириной 6° . в) Снимок пятна свечения при наклоне ДН стенда «Сура» на юг на 12° . Крест соответствует направлению луча зрения в МЗ.

В третьей главе проведено сопоставление данных экспериментов по ракурсному рассеянию волн, выполненных на нагревном стенде «Сура» в 2010 г. на короткой трассе Казань–Васильсурск–Казань с результатами расчетов лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов, выполненных для условий экспериментов [4а, 5а]. Для расчетных траекторий в соответствии с условием Брэгга определялось семейство рассеянных лучей, приходящих в зону приёма:

$$\mathbf{k}_d = \mathbf{k}_s \pm \boldsymbol{\kappa} \quad (7)$$

где \mathbf{k}_d и \mathbf{k}_s – волновые векторы падающей (диагностической) и рассеянной волн, $k_d \approx k_s = 2\pi f_d n/c$, $f_d \approx f_s$ и n – частоты и модуль показателя преломления падающей и рассеянной волн, c – скорость света, $\boldsymbol{\kappa}$ – волновой вектор неоднородности концентрации, $\boldsymbol{\kappa} \perp \mathbf{B}$. При обратном рассеянии ($\mathbf{k}_d = -\mathbf{k}_s$) $\boldsymbol{\kappa} = 2\mathbf{k}_d$.

Размеры рассеивающих неоднородностей определялись согласно выражению:

$$l_{\perp} = 2\pi/\kappa = \lambda_d/2n|\sin(\gamma)| \approx c/2nf_d, \quad (8)$$

где γ – угол между векторами \mathbf{k}_d и \mathbf{B} ($85^\circ < \gamma < 95^\circ$).

При этом рассчитанное время распространения сигнала ВНЗ совпадало с экспериментально наблюдаемым временем задержки. Зондирование возмущенной области ионосферы и регистрация рассеянных сигналов проводились с помощью ионозонда «Циклон», расположенного в 172 км к востоку от стенда «Сура» на базе КФУ. Ионосферные условия во время экспериментов определялись с помощью ионозондов «Базис» (стенд «Сура») и «Циклон-GPS». Данные эксперименты по ВНЗ возмущенной области ионосферы над нагревным стендом «Сура» на короткой трассе Казань–Васильсурск–Казань при работе ионозонда «Циклон» осуществлялись в двух режимах: излучение зондирующих и регистрация рассеянных сигналов на 10 фиксированных частотах в диапазоне 2–7 МГц (эксперименты 14–15 мая и 6 сентября 2010 г.) и снятие ионограмм во всем диапазоне рабочих частот 1–7 МГц с шагом ~ 20 кГц (эксперименты 20 сентября и 24 сентября 2010 г.).

В первом случае (в разделе 3.1) посредством расчета траекторий зондирующих/рассеянных сигналов О- и Х-поляризации были определены положение и размеры области над нагревным стендом «Сура», ответственной за генерацию сигналов ракурсного рассеяния, характерные масштабы искусственных декаметровых неоднородностей, ответственных за рассеяние, их динамические характеристики в зависимости от высоты генерации и времени суток как для вертикального, так и наклонного нагрева ионосферы [4а].

В случае наклонного нагрева высота области рассеяния в юго-западной части ДН стенда снижается приблизительно на 10 км по сравнению с центральной частью. Расчеты показывают, что область рассеяния волн с различными частотами, т.е. область, занятая вытянутыми неоднородностями, ответственными за рассеяние, занимает достаточно большой интервал высот (порядка 55 км в данном сеансе), причем волны с более низкими частотами рассеиваются на более низких высотах. Показано, что вертикальный размер области рассеяния для конуса углов выхода зондирующих волн с раскрывом 1° вблизи центрального луча не превышает 5 км для каждой из частот. Высота этой области зависит от частоты зондирующего сигнала и изменяется от 185 до 240 км, т.е. расположена, в основном, ниже точки отражения ВН. Горизонтальный размер области рассеяния для одного угла выхода центрального луча зондирующей волны составляет от 6 до 12 км.

Пример расчета характеристик рассеянных сигналов для сеанса измерений в дневные часы 15:35 МСК (высота отражения ВН $h_0 = 232$ км) приведен на рис.5. Здесь показаны проекции траекторий рассеянных сигналов на земную поверхность (рис. 5а) и на взаимно перпендикулярные вертикальные плоскости север-юг и восток-запад рис. 5(б, в). Окружности на рисунке 6а характеризуют размер области на высоте отражения ВН по уровню половинной мощности ДН стенда. Здесь, в отличие от наклонного нагрева в вечерние часы, область рассеяния занимает меньший интервал высот (менее 40 км). Вертикальный

размер области рассеяния для каждой частоты зондирующих волн, как и в случае наклонного нагрева, не превышает 5 км, а горизонтальный для одного угла выхода центрального луча с конусом 1° составляет от 5 до 15 км. Высота области рассеяния изменяется от 180 до 225 км в зависимости от частоты зондирующего сигнала, для которого в эксперименте наблюдалось рассеяние.

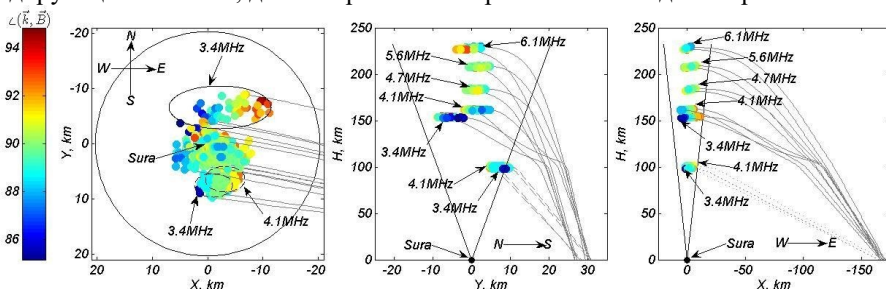


Рис. 5 Пример расчета лучевых траекторий, представленный в трех плоскостях, для случая вертикального нагрева ионосферы. 06.09.2010, 15:35 МСК, Возможные дополнительные траектории рассеяния в E-области для двух частот $f_d = 3400$ кГц и 4100 кГц представлены пунктиром.

В случае сетки частот (раздел 3.2) с учетом результатов расчетов лучевых траекторий зондирующих и рассеянных сигналов О- и Х- поляризации ионозонда для всего диапазона существования ионограмм ВНЗ были определены зависимости характерных поперечных геомагнитному полю размеров искусственных рассеивающих неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние волн данного диапазона, и положения области рассеяния от частоты зондирующих сигналов для наклонного и вертикального нагрева [5a].

Согласно расчетам, выполненным для вертикального нагрева, было выявлено смещение области рассеяния на запад на высоких частотах вблизи 5.75 МГц. В основном (среднем) диапазоне частот ракурсного рассеяния область рассеяния достаточно узка и не выходит за пределы ДН стенда «Сура». При этом, если в основном диапазоне частот О-мода ракурсного рассеяния попадает в центр засветки ДН стенда, то область рассеяния Х-моды локализуется в южной части ДН (смещена на $10 \div 15$ км на юг). Высота рассеяния снижается на $72 \div 77$ км с уменьшением частоты зондирования, охватывая области высот как выше, так и ниже уровня отражения ВН. Масштабы рассеивающих неоднородностей лежат в пределах $l_\perp \approx 48 \div 124$ м и убывают с ростом частоты.

Было установлено, что эффект смещения выражен для случая наклонного нагрева больше, чем для вертикального, т. к. наблюдается заметно большее смещение на запад области рассеяния для обеих мод на высоких частотах, смещение на север для О-моды на низких частотах и общее смещение на юг в основной части диапазона частот. При этом, однако, область рассеяния практически не выходит за границы ДН стенда, хотя и расположена преимущественно ближе к её южной границе. Высотный интервал области рассеяния на разных частотах составляет $54 \div 57$ км. Как и в случае с вертикальным нагревом, поперечный масштаб рассеивающих неоднородностей

$l_{\perp} \approx 42 \div 195$ м убывает с ростом частоты.

В четвертой главе исследованы характеристики ПИВ, полученные при моделировании распространения КВ радиоволн в средних широтах на схеме коротких трасс и трассе большой дальности для результатов экспериментов по НЗ ионосферы 19.12.2019 г. и 20.07.2023 г., соответственно. В качестве исходных данных использовались ДЧХ наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы.

В первом случае (**раздел 4.1**) представлены результаты моделирования синхронного распространения декаметровых радиоволн на трех слабонаклонных трассах (п. Васильсурск – г. Нижний Новгород, г. Йошкар-Ола – г. Нижний Новгород и г. Йошкар-Ола – п. Васильсурск) во время регистрации ПИВ типа «серп» (см. рис. 6) [6а]. Профиль электронной концентрации в невозмущенной ионосфере (без ПИВ) был восстановлен по ионограмме ВЗ ионосферы, полученной в 08:45 UTC на ионозонде CADI в Васильсурске перед появлением ПИВ.

В общем случае неоднородность при прохождении ПИВ моделировалась гармонической функцией (плоской волной с длиной волны L):

$$N(x, y, z) = N_0(z) \left[1 + \delta \exp \left(- \left(\frac{z}{d} \right)^p \right) \cos \left(- \frac{2\pi}{L} (x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta) \right) \right] \\ \text{при } -n \frac{L}{4} \leq x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta \leq m \frac{L}{4}; \quad (9)$$

$$N(x, y, z) = N_0(z) \\ \text{при } x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta < -n \frac{L}{4}, \\ x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta > m \frac{L}{4} \quad (10)$$

Здесь $\frac{2\pi}{L} (x \cos \alpha \cos \beta + y \sin \alpha \cos \beta + z \sin \beta) = \mathbf{k} \mathbf{r}$, где \mathbf{k} – волновой вектор, \mathbf{r} – радиус-вектор в локальной декартовой системе координат с центром, совпадающим с центром неоднородности (высота центра неоднородности $H=250$ км); ось x – с востока на запад, ось y – с севера на юг; z – по вертикали; $N_0(z)$ – невозмущенный профиль. Параметры: δ – относительная амплитуда неоднородности; α – угол, определяющий направление распространения волны в азимутальной плоскости (от оси x к оси y); β – высотный угол наклона фронта волны (от плоскости горизонта); $n=m=1$ и $\exp=0$ (для типа “серп”).

При моделировании перемещение фронта плоской волны задавалось перемещением центра неоднородности относительно средней точки трассы при $H = \text{const}$ по широте с запада на восток и по долготе с севера на юг.

Наилучшее совпадение расчетных ДЧХ с экспериментальными по всем трассам достигаются при: $\delta = 0.2$, $L = 100$ км, $\alpha = -10.25^\circ$, $\beta = 45^\circ$, $H = 250$ км.

Поскольку характерной особенностью ПИВ является ДЧХ в виде «серпа», который имеет минимум, то особое внимание акцентировалось на соответствующем значении минимальной задержки τ_{\min} , которому соответствует

луч определенной частоты f_m . Согласно данным, полученным в эксперименте 19.12.2019, ПИВ со временем движется так, что минимальное значение задержки τ_{\min} убывает (что отмечено в работе [27]), и перемещается в сторону более низких частот f_m от 5.6 МГц в 8:35 UTC до 5.46 МГц в 8:38 UTC, что видно из расчетов для трассы 1 на рис. 6 (а, б). Аналогичные результаты были получены для трассы 2 и для трассы 3.

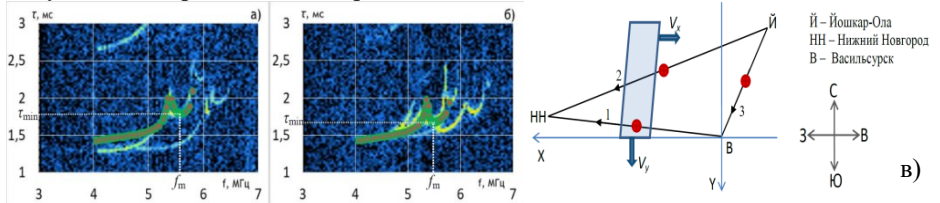


Рис. 6 а) Экспериментальные (светлые) и расчетные (оранжевые точки) графики временных задержек τ в зависимости от частоты зондирующих волн f для трассы 1 в моменты времени: а) 8:35 UTC; б) 8:38 UTC; в) Схема трасс распространения радиоволн и перемещения ПИВ (серый параллелограмм) с проекциями скорости V_x , V_y на оси координат.

Исходя из геометрии перемещения линии фронта ПИВ (линии равных временных задержек τ_{\min}), полученной на основе проведенных расчетов для трех трасс, а также с учетом известного из эксперимента временного интервала между регистрацией ДЧХ на одной и той же трассе $\Delta t = 3$ мин, был определен угол, задающий направление перемещения проекции линии фронта ПИВ на земную поверхность (отсчитывается от направления на север по часовой стрелке) $\varphi \approx 105^\circ$, а также модуль скорости перемещения ПИВ по следующим формулам: $S = \Delta X \cdot \cos(\varphi - 90^\circ) = \Delta Y \cdot \sin(\varphi - 90^\circ)$, $|V| = S/\Delta t$, где ΔX – расстояние (в км), определяющее смещение центра неоднородности вдоль направления запад-восток. Полученные значения модуля скорости для трасс 1 и 2 заметно различаются и составляют, соответственно $|V_1| \approx 65$ м/с и $|V_2| \approx 105$ м/с.

В разделе 4.2 представлены результаты моделирования распространения КВ на трассе Кипр – Нижний Новгород во время регистрации ПИВ z-типа [7a]. Длина трассы и азимут из пункта передачи в пункт приема составляли 2492 км и $\Psi = 15^\circ$.

Моделирование возмущения профиля электронной концентрации ионосферы при прохождении ПИВ задавалось в виде периодической структуры с определенным числом периодов, которая моделировалась гармонической функцией, экспоненциально ограниченной по высоте (9, 10). Проведено исследование влияния параметров модели неоднородностей на форму z-следа на графике ДЧХ, определяющих градиент, наклон фронта неоднородности и взаимную ориентацию трассы и ПИВ.

Перемещение фронта плоской волны задавалось сдвигом центра неоднородности (при $H = \text{const}$) вдоль линии широты средней точки трассы с запада на восток. Наилучшее соответствие экспериментальным ДЧХ (что продемонстрировано на рис. 7 (а-в)) достигается при параметрах ПИВ: $\delta = 0.1$, $\alpha = -45^\circ$ ($\gamma = 60$), $\beta = 45^\circ$, $H = 250$ км, $L = 100$ км, $d = 50$ км, $p = 6$, $n = 7$, $m = 7$ ($q = 14$),

где γ – относительный азимут, т.е. угол между трассой и направлением распространения ПИВ в горизонтальной плоскости. Точки 1-3 на рис. 7а соответствуют траекториям лучей 1-3 соответствующих частот на рис. 7в.

На основе сопоставления полученных результатов с экспериментальными данными сделаны выводы о размерах, расположении в пространстве, направлении перемещения и скорости движения неоднородности (ПИВ). С учетом известных моментов времени и модельного перемещения ПИВ было оценено значение компоненты скорости перемещения ПИВ в направлении с запада на восток: $V_x = 176$ м/с.

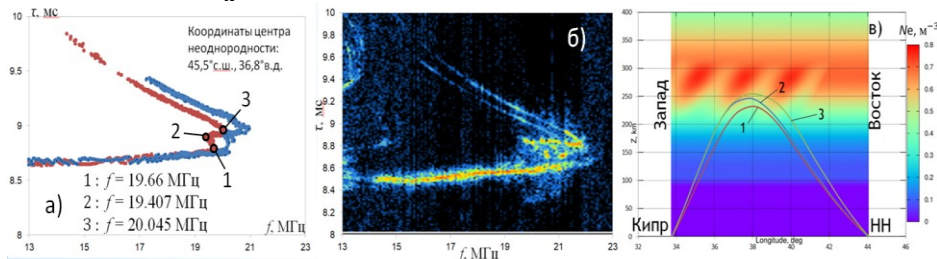


Рис. 7 а-б) Графики временных задержек $\tau(f)$ в зависимости от частоты волны f для О- и Х- мод: а) расчеты моделирования; б) экспериментальный след задержек (ДЧХ), зарегистрированный в 4:10 UTC. в) Проекция лучей в широтной плоскости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

При выполнении диссертационной работы реализован пакет программ для моделирования распространения КВ радиоволн в ионосфере с использованием реальных и модельных профилей электронной концентрации, а также моделей возмущений (неоднородностей среды) с целью интерпретации данных экспериментов. В процессе моделирования для реальных условий проведенных экспериментов получены следующие результаты.

1. Показано, что наблюдаемое ослабление интенсивности искусственного радиоизлучения (ИРИ) при $f_0 \lesssim 4f_{ce}$ по сравнению со случаем $f_0 \gtrsim 4f_{ce}$ при увеличении угла наклона ДН нагревного стенда «Сура» на юг от 14° до 18° к направлению геомагнитного поля наблюдается вследствие зависимости дисперсионных свойств плазменных волн, ответственных за генерацию ИРИ, от их соотношения с 4-ой гирогармоникой электронной частоты в неоднородной ионосфере: для достаточно больших углов наклона ДН при $f_0 \lesssim 4f_{ce}$ область отражения волны накачки (ВН) оказывается ниже области существования плазменных волн, ответственных за возбуждение ИРИ.

2. Показано, что наблюдаемое ослабление ИРИ при наклоне ДН стенда НААРП на север от вертикали происходит в силу зависимости поляризационных свойств ВН от ее угла падения на ионосферу: при «северных» наклонах в области существования плазменных волн, где происходит генерация ИРИ, направление электрического поля ВН близко к направлению геомагнитного

поля, и возбуждение поперечных геомагнитному полю плазменных волн, ответственных за генерацию ИРИ, оказывается значительно ослабленным. Небольшое увеличение интенсивности ИРИ при наклоне ДН на 14° на север связано с распространением отраженной ВН практически вдоль магнитного поля, когда условия возбуждения плазменных волн и ИРИ оптимальны (эффект магнитного зенита (МЗ) для отражённой волны).

3. Показано, что в случае вертикального воздействия ВН на ионосферу причиной наблюдаемого увеличения смещения пятна искусственного оптического свечения (ИОС) в линии $\lambda = 630$ нм на север при увеличении высоты области возбуждения плазменных волн является высыпание ускоренных электронов, ответственных за возбуждение ИОС, от области возбуждения плазменных волн вдоль геомагнитного поля вниз до области максимального возбуждения атомов кислорода электронным ударом. Для наклона ДН нагревного стенда на юг пятно свечения находится в МЗ вследствие фокусировки ВН на крупномасштабных неоднородностях электронной концентрации.

4. С помощью сопоставления результатов расчетов с данными экспериментов определены местоположение области расположения и характерные масштабы магнито-ориентированных мелкомасштабных неоднородностей (ММН), возбуждаемых ВН и ответственных за ракурсное рассеяние при возвратно-наклонном зондировании (ВНЗ) возмущённой области ионосферы над стендом «Сура» ионозондом «Циклон-GPS» в режиме фиксированных частот на короткой трассе Казань–Васильсурск–Казань в диапазоне зондирующих волн 2–7 МГц. Установлено, что рассеяние сигналов ВНЗ происходит вблизи наивысшей точки траекторий для сигналов, распространяющихся под углами, близкими к 90° к геомагнитному полю, т. е. имеет место почти обратное рассеяние, определен вертикальный размер области рассеяния для каждой из частот зондирующих волн; исследован суточный ход высот области рассеяния и определены типы возможных траекторий рассеяния для О- и Х- поляризаций зондирующих волн как в случае вертикального, так и в случае наклонного (в МЗ) воздействия. Для работы ионозонда в режиме снятия ионограмм проведенные расчеты позволяют увеличить частотное (а, следовательно, и пространственное) разрешение определения положения искусственных ММН, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн на короткой трассе.

5. Моделирование распространения КВ радиоволн с учетом модели возмущенной ионосферы при наличии перемещающихся ионосферных возмущений (ПИБ) для трех слабонаклонных трасс (Васильсурск – Нижний Новгород, Йошкар-Ола – Нижний Новгород и Йошкар-Ола – Васильсурск) позволило определить параметры ПИБ, в том числе динамику и направление их перемещения, на основе наилучшего совпадения расчетных дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) с полученными в эксперименте 19.12.2019 одновременно по всем трем трассам. Показано, что регистрируемое снижение

минимума временной задержки зондирующего сигнала на ДЧХ в области частот, где наблюдается след ПИВ, со временем соответствует смещению области неоднородности электронной концентрации (ПИВ) в направлении с запада на восток и с севера на юг, соответственно. Установлено, что 19.12.2019 в полуденные часы ПИВ движется с северо-запада на юго-восток. Определена средняя абсолютная величина скорости ПИВ: $|V| \approx 85$ м/с.

6. Для моделирования распространения КВ радиоволн на длинной трассе Кипр – Нижний Новгород при наличии ПИВ предложена модель ПИВ в виде ограниченного по высоте цуга волн неоднородностей электронной концентрации конечной длины с заданным периодом ($L \sim 50 \div 300$ км) и ориентированного в трехмерном пространстве под произвольным углом относительно трассы. Траекторные расчеты КВ радиоволн в рамках предложенной модели показали соответствие результатов моделирования экспериментальным ДЧХ, полученным 20.07.2023, и позволили сделать выводы о форме, структуре, направлении перемещения и широтной компоненте скорости движения неоднородности (ПИВ) на основе выбранных значений параметров модели. Показано, что z-образное возмущение на экспериментально полученных ДЧХ обусловлено расположением центра неоднородности (ПИВ) на 10–40 км ниже максимума F2-слоя; что регистрируемое снижение со временем верхней кромки возмущения ДЧХ соответствует движению ПИВ с запада на восток (вдоль линии широты) со скоростью $V_x \approx 176$ м/с; выявлено, что при увеличении пространственного периода z-образный участок следа ДЧХ становится менее выражен и при достижении значений $L \sim 300$ км практически исчезает в силу малости градиента электронной плотности, создаваемого ПИВ; установлено, что наблюдаемое в ряде экспериментов последовательное появление и перемещение на одном треке ДЧХ нескольких z-структур обусловлено рефракцией лучей на соседних периодах структуры ПИВ.

Проведенное в диссертационной работе моделирование позволило интерпретировать ряд экспериментов по воздействию на ионосферу мощными радиоволнами и по распространению радиоволн в ионосфере при наличии естественных возмущений (ПИВ). Данное моделирование также является надежным фундаментом для последующих исследований структуры ионосферы и соответствующей интерпретации возникающих в ней эффектов для различных географических регионов.

Результаты диссертации получены при финансовой поддержке грантов РНФ 14-12-00706п, 20-12-00197, 20-12-00197п, 25-72-20019 и РФФИ 18-02-00622.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

Научные статьи, опубликованные в журналах перечня ВАК

1а. Грач, С. М. Расчет лучевых траекторий и поляризации радиоволн декаметрового диапазона для условий воздействия на ионосферу мощным

радиоизлучением / С. М. Грач, Н. А. Погорелко, В. А. Яшнов // Вестник ННГУ им. Н.И. Лобачевского. – 2012. – № 6(1). – С. 43-50.

2а. Shindin, A. V. Properties of the stimulated electromagnetic emissions during the inclined high-frequency pumping of the ionosphere near the fourth electron gyroharmonic at the high-frequency Active Auroral Research Program Facility / A. V. Shindin, S. M. Grach, E. N. Sergeev, V. P. Smolina, N. A. Pogorelko // Geophys. Res. Lett. – 2019. – V. 46. – № 11. – P. 5653-5661.

3а. Грач, С. М. Оптическое свечение при воздействии на ионосферу радиоизлучением стенда «Сура»: результаты экспериментов 2010 года / С. М. Грач, В. В. Клименко, А. В. Шиндин, И. А. Насыров, Е. Н. Сергеев, В. А. Яшнов, Н. А. Погорелко // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 1-2. – С. 36-56.

4а. Погорелко, Н. А. Определение положения и характеристик области искусственных ионосферных неоднородностей над стендом «Сура», ответственных за генерацию сигналов ракурсного рассеяния на короткой трассе / Н. А. Погорелко, Е. Н. Сергеев, С. М. Грач, В. А. Яшнов, А. В. Шиндин // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2018. – Т. 61. – № 2. – С. 93-109.

5а. Погорелко, Н. А. Развитие методики определения положения искусственных ионосферных неоднородностей, ответственных за ракурсное рассеяние радиоволн на короткой трассе, по ионограммам возвратно-наклонного зондирования / Н. А. Погорелко, Е. Н. Сергеев, С. М. Грач, Е. Ю. Зыков // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – № 2. – С. 95-109.

6а. Семенова, Н. А. Характеристики ПИВ, полученные при моделировании распространения КВ-радиоволн на слабонаклонных трассах в средних широтах / Н. А. Семенова, Ф. И. Выборнов, С. М. Грач // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2024. – Т. 67. – Вып. 4. – С. 329-338.

7а. Семенова, Н. А. Особенности моделирования распространения КВ радиоволн на длинной трассе при регистрации на ионограммах наклонного зондирования z-образований, вызванных перемещающимися ионосферными возмущениями / Н. А. Семенова, Ф. И. Выборнов, С. М. Грач // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2025. – Т. 68. – № 3. – С. 203-215.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Коваль, С. А. Ионосферный мониторинг в интересах перспективных адаптивных систем декаметровой радиосвязи: современное состояние и перспективы развития / С. А. Коваль // Системы управления, связи и безопасности. – 2020. – № 4. – С. 73.

2. Урядов, В.П. Влияние неоднородной структуры высокоширотной ионосферы на дальнейшее распространение коротких радиоволн / В. П. Урядов, Г. Г. Вертоградов, Е. Г. Вертоградова // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2012. – Т. 55. – № 4. – С. 255.

3. Кравцов, Ю. А. Геометрическая оптика неоднородных сред / Ю. А.

Кравцов, Ю. И. Орлов. – М.: Наука, 1980. – 304 с.

4. Гинзбург, В. Л. Распространение электромагнитных волн в плазме / В. Л. Гинзбург. – М.: Наука, 1967. – 684 с.

5. Крюковский, А. С. Исследование особенностей распространения коротких радиоволн в неоднородной анизотропной ионосфере / А. С. Крюковский, Д. С. Лукин, Д. В. Растягаев // Электромагнитные волны и электронные системы. – 2009. – Т. 14. – № 8. – С. 17-26.

6. GitHub [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://github.com/search?q=ray+tracing+ionosphere&type=repositories>.

7. Лукин, Д. С. Применение метода характеристик для численного решения задач распространения радиоволн в неоднородной и нелинейной среде / Д. С. Лукин, Ю. Г. Спиридонов // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т. 14 – № 9. – С. 1673-1677.

8. Котова, Д. С. Численное моделирование влияние геомагнитной бури 2–3 мая 2010 года на распространение коротких радиоволн в ионосфере Котова / Д. С., Клименко М.В., Клименко В.В., Захаров В.Е.// Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2014. – Т. 57. – № 7. – С. 519-530.

9. Coleman, C.J. Point-to-point ionospheric ray tracing by a direct variational method / C.J. Coleman // Radio Science. – 2011. – V. 46. – № 5. – P. 5016.

10. Крюковский, А. С. Моделирование поля в окрестности каустик обыкновенной и необыкновенной волн при ионосферном распространении / А. С. Крюковский, Д. С. Лукин, Ю. И. Бова // Радиотехника и электроника. – 2020. – Т. 65. – № 12. – С. 1160-1169.

11. Molina, C. Modern ionospheric ray tracer for Earth observation satellite missions / C. Molina, E. Fernández-Niño, A. Camps // J. Sel. Top. Appl. Earth Observ. Remote Sens. – 2024. – V. 17. – P. 13244-13260.

12. Ларюнин, О. А. Определение параметров перемещающихся ионосферных возмущений по ионограммам вертикального зондирования с дополнительными u-образными треками / О. А. Ларюнин // Геомагнетизм и аэрномия. – 2021. – Т. 61. – № 6. – С. 763.

13. Крюковский, А. С. Математическое моделирование амплитудных, угловых и временных характеристик коротких радиоволн при слабонаклонном зондировании ионосферы / А. С. Крюковский, Д. С. Лукин, Е. В. Михалёва и др. // Радиотехника и электроника. – 2023. – Т. 68. – № 6. – С. 553.

14. Вертоградов, Г. Г. Мониторинг волновых возмущений методом наклонного зондирования ионосферы / Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, В. П. Урядов // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2006. – Т. 49. – № 12. – С. 1015.

15. Пономарчук, С. Н. Возвратно-наклонное зондирование ионосферы непрерывным сигналом с линейной частотной модуляцией / С. Н. Пономарчук, В. П. Грозов, Н. В. Ильин и др. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2021. – Т. 64. – № 8-9. – С. 591.

16. Моисеева, Д. С. Физические исследования и численное моделирование воздействия мощного потока радиоизлучения на нижнюю ионосферу. Часть 1.

Краткий обзор состояния вопроса и постановка задачи / Д. С. Моисеева, Е. Л. Ступицкий // Компьютерные исследования и моделирование. – 2023. – Т. 15. – № 3. – С. 619-637.

17. Ткачев, И.Д. Искусственное оптическое свечение ионосферы в линиях 557,7 и 391,4 нм, индуцированное коротковолновым радиоизлучением стенда «Сура»/ И.Д. Ткачев, А.Б. Белецкий, С.М. Грач и др. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2024. – Т. 67 – № 10. – С. 811-818.

18. Kelley, M. C. Density depletions at the 10-m scale induced by the Arecibo heater / M. C. Kelley, T. L. Arce, J. Salowey, M. Sulzer, M. Carter et al. // Journal of geophysical research. – 1995. – V. 100. – № A9. – P.17.367-17.376.

19. Болдырев, М. С. Модель рассеяния коротких радиоволн искусственными ионосферными неоднородностями / М. С. Болдырев, Н. Д. Наумов, В. А. Никольский, В. П. Урядов // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4. – № 1. – С. 41-45.

20. Gurevich, A. V. Modern problems of ionospheric modification / A. V. Gurevich // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1958. – Т. 42. – № 7. – С. 599-606.

21. Вертоградов, Г. Г. Наклонное зондирование ионосферы с помощью ионозонда-радиопеленгатора с линейной частотной модуляцией сигнала / Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, М. С. Скларевский и др. // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2016. – Т. 61. – № 11. – С. 991.

22. Шейнер, О. А. Оценка степени ионосферных возмущений по поведению нового ионосферного индекса / О. А. Шейнер, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин // Геомагнетизм и аэронавигация. – 2022. – Т. 62 – № 4. – С. 509.

23. Nordblad, E. Ray tracing analysis of L mode pumping of the ionosphere, with implication for magnetic zenith effect / E. Nordblad, T. B. Leyser // Annales Geophysicae. – 2010. – V. 28. – P. 1749-1759.

24. Гусаков, Е. З. Низкопороговые параметрические распадные неустойчивости в экспериментах по электронно-циклотронному нагреву в тороидальных ловушках / Е. З. Гусаков, А. Ю. Попов // Письма в ЖЭТФ. – 2010. – Т. 91. – Вып. 12. – С. 724-728.

25. Котов, П. В. Спектры искусственного радиоизлучения ионосферы при свипировании частоты воздействия в области электронных циклотронных гармоник. I. Результаты эксперимента / П.В. Котов, Е.Н. Сергеев, С.М. Грач // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 2008. – Т. 51. – № 6. – С. 461-477.

26. Grach, S. M. On the location and structure of the artificial 630-nm airglow patch over Sura facility / S. M. Grach, M. J. Kosh, V. A. Yashnov et al. // Annales Geophysicae. – 2007. – V. 25. – P. 689-700.

27. Vybornov, F. On the Results of a Special Experiment on the Registration of Traveling Ionospheric Disturbances by a System of Synchronously Operating Chirp Ionosondes / F. Vybornov, O. Sheiner, A. Kolchev et al. // Atmosphere. – 2022. – Vol. 13. – № 1. – P. 84.