

ЭЛЕКТРОДИНАМИКА И РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

УДК 537.87

МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ НА РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЛН¹

© 2024 г. А. С. Крюковский*, Д. С. Лукин, Е. В. Михалева, Е. А. Палкин, Д. В. Растягаев

Российский новый университет, ул. Радио, 22, Москва, 105005 Российская Федерация

**E-mail: kryukovsky56@yandex.ru*

Поступила в редакцию 28.10.2023 г.

После доработки 28.10.2023 г.

Принята к публикации 25.11.2023 г.

Представлены новые методы диагностики тонкой структуры ионосферы Земли и их верификация путем сопоставления результатов их применения с результатами моделирования и независимыми прямыми измерениями. Развита методика восстановления профилей электронной концентрации и частоты соударений электронов в ионосфере с использованием информации о поляризационных и амплитудных характеристиках обыкновенной и необыкновенной компонент регистрируемых сигналов с линейной частотной модуляцией при вертикальном и наклонном зондировании. Выполнено математическое и численное моделирование влияния ионосферных неоднородностей на распространение коротковолнового излучения, а также анализ временных вариаций амплитудных, поляризационных и траекторных характеристик декаметровых радиосигналов, отраженных от ионосферы. На основе метода бихарактеристик и волновой теории катастроф разработаны методы математического моделирования особенностей распространения частотно-модулированных радиосигналов в ионосферной плазме при наличии локальных неоднородностей среды. Разработаны численные алгоритмы программ построения ионограмм наклонного и вертикального зондирования при наличии локальных неоднородностей в ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, неоднородности ионосферы, эффективная частота соударений, профили электронной концентрации, зондирование ионосферы, лучи, бихарактеристики, характеристики декаметровых радиосигналов, расходимость, поглощение

DOI: 10.31857/S0033849424060017, EDN: IKKID

1. ПОСТАНОВКА ЗАДАЧИ

Интенсивное развитие наземных и спутниковых средств диагностики околоземного космического пространства открывает новые перспективы высокоточного определения характеристик среды и предъявляет новые требования к моделированию распространения радиоволн. Для эффективной обработки и визуализации регистрируемой информации, а также решения широкого круга задач как по диагностике свойств среды распространения различных сигналов (радиосвязь, радиолокация, навигация и т.д.), так и по определению источников (и их характеристик) естественных и искусственных возмущений среды актуальным является разработка методов численного моделирования

распространения сложных широкополосных сигналов в анизотропной диспергирующей среде с неоднородностями различного масштаба.

Диагностика и контроль ионосферы, постоянный мониторинг динамических процессов в атмосфере является актуальной задачей в связи с существенным влиянием состояния ионосферы на работу радиосистем различного назначения. Эффективность работы этих систем, и в первую очередь коротковолновой (КВ) радиосвязи и радионавигации, зависит от адекватно описания среды распространения с учётом всех возможных процессов, проходящих в ионосфере. Не менее важным представляется и непосредственный мониторинг экстремальных явлений в атмосфере Земли с помощью зондирования в КВ-диапазоне [1–3].

Примеры реальных ионограмм, отражающих сложную структуру сигналов зондирования, полученных в Институте солнечно-земной физики Сибирского отделения РАН [4] и любезно предоставленных авторам статьи, представлены на рис. 1.

¹Некоторые результаты работы представлены на XXVIII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (23–26 мая 2023 г., Йошкар-Ола, ПГТУ) в виде пленарного доклада.

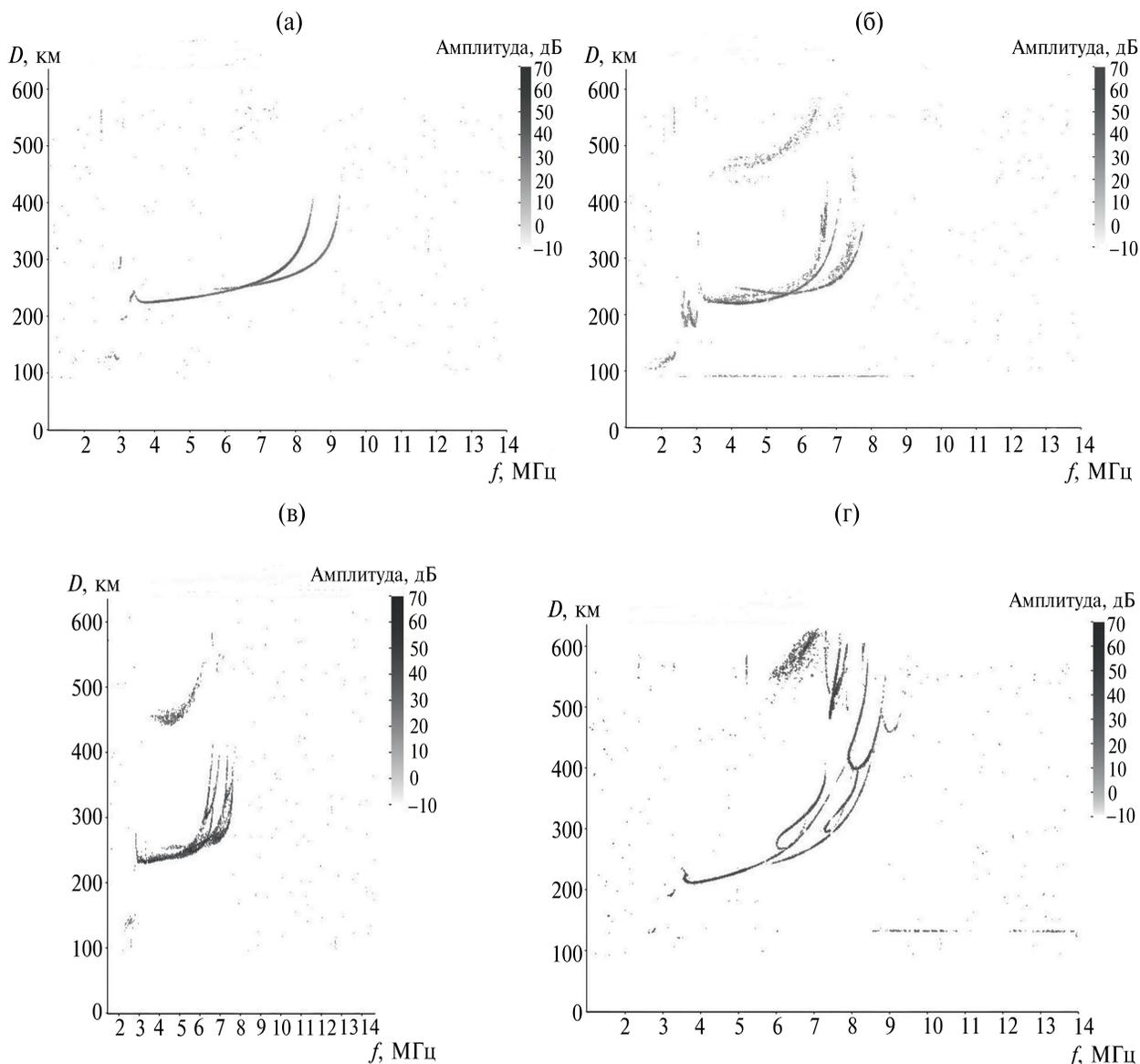


Рис. 1. Примеры реальных ионограмм, полученных на трассах: а) Торы–Торы (09.01.2023, 05:52 UT), б) Торы–Торы (07.02.2022, 03:00:00 UT), в) Усолье–Торы (07.02.2022, 03:00:00 UT), г) Торы–Торы (09.01.2023, 05:30:00).

2. МОДЕЛИ ЛУЧЕВОГО РАСПРОСТРАНЕНИЯ И КАУСТИЧЕСКИХ СТРУКТУР ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ РАДИОСИГНАЛОВ В ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЕ ПРИ НАЛИЧИИ ЛОКАЛЬНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ

Локальные неоднородности в ионосфере Земли различной природы играют существенную роль в процессах распространения на линиях КВ-радиосвязи, вызывая замирания, образование зон фокусировки (каустик) и дефокусировки электромагнитных волн. Для исследования влияния таких неоднородностей на распространение радиосигналов может быть использован метод моделирования, основанный на решении бихарактеристической системы (БС) уравнений [5, 6], гамильтониан

которой соответствует дисперсионному соотношению для волн, распространяющихся в неоднородной плазме. Бихарактеристическая система представляет собой систему из восьми обыкновенных дифференциальных уравнений, описывающих изменение компонент волнового вектора \vec{k} , частоты ω , группового времени распространения сигнала t и координат \vec{r} вдоль лучевой траектории, связанной с волной в рамках геометрооптического (ГО) подхода:

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{r}}{d\tau} &= \frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{k}}, \quad \frac{d\vec{k}}{d\tau} = -\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{r}}, \\ \frac{dt}{d\tau} &= -\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega}, \quad \frac{d\omega}{d\tau} = \frac{\partial \Gamma}{\partial t}, \end{aligned} \quad (1)$$

где

$$\Gamma = k_x^2 + k_y^2 + k_z^2 - \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon(\vec{r}, \vec{k}, \omega, t) \quad (2)$$

– гамильтониан волнового уравнения, τ – параметр вдоль траектории [6,7], ε – эффективная диэлектрическая проницаемость среды, которая в ионосфере представима в виде формулы Эпплтона–Хартри (Лассена) [8, 9]. В нее входят значение электронной концентрации в точке пространства, модуль напряженности магнитного поля Земли, а также угол между волновым вектором и вектором напряженности магнитного поля.

Бихарактеристическая система (1), (2), дополненная уравнениями для вычисления производных по параметрам лучевого семейства, известна как расширенная бихарактеристическая система Лукина [10, 11]. В стационарной среде она имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{r}_{h_j}}{dt} &= -\frac{\partial}{\partial h_j} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{k}} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega} \right)^{-1} \right), \\ \frac{d\vec{k}_{h_j}}{dt} &= \frac{\partial}{\partial h_j} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \vec{r}} \left(\frac{\partial \Gamma}{\partial \omega} \right)^{-1} \right), j = 1, 2, \end{aligned} \quad (3)$$

где h_j – это величины, параметризующие начальное многообразие лучевых траекторий, например угловые координаты направлений выхода лучей.

Совместно с (3) система (1), (2) позволяет не только рассчитывать лучевые траектории в неоднородных анизотропных средах, но и определять положения каустик и иных сложных фокальных структур, а также при известной модели ионосферы и магнитного поля Земли находить максимальные и минимальные применимые частоты, зоны радиосвязи и радиомолчания, рассчитать характеристики ионограмм вертикального и наклонного зондирования (ВЗ, НЗ), а также групповые задержки [12,13]. Комплексный расчет геометрических и энергетических характеристик лучевых семейств позволяет определять также фазовые характеристики сигнала, доплеровское смещение частоты, учитывать поглощение вдоль траекторий и вращение вектора поляризации [7, 14–17]. В качестве примера рассмотрим лучевую структуру, образующую каустики в ионосфере [18–20].

Для представленных результатов расчета использована модель высокоширотной ночной ионосферной плазмы. На рис. 2 представлена зависимость электронной концентрации от высоты, а на рис. 3 – высотная зависимость электронной частоты соударений ν_e .

На рис. 4а, 4б представлены результаты расчетов трехмерной лучевой структуры радиосигнала в проекции на плоскость (x, z) для обыкновенной волны (o -волны) и необыкновенной (x -волны) соответственно в случае, когда излучение волны осуществляется точечным источником,

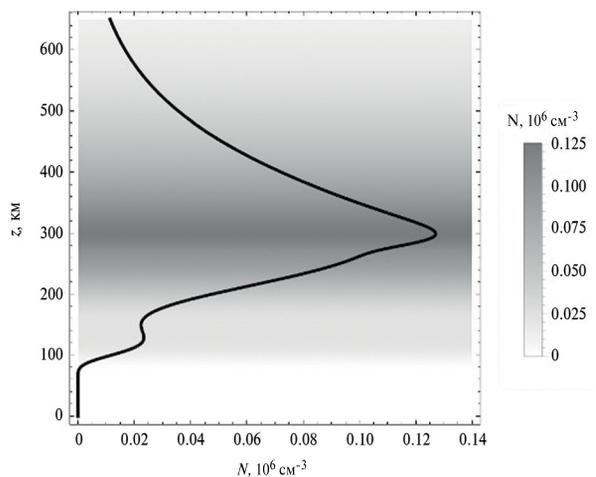


Рис. 2. Зависимость электронной концентрации N от высоты z .

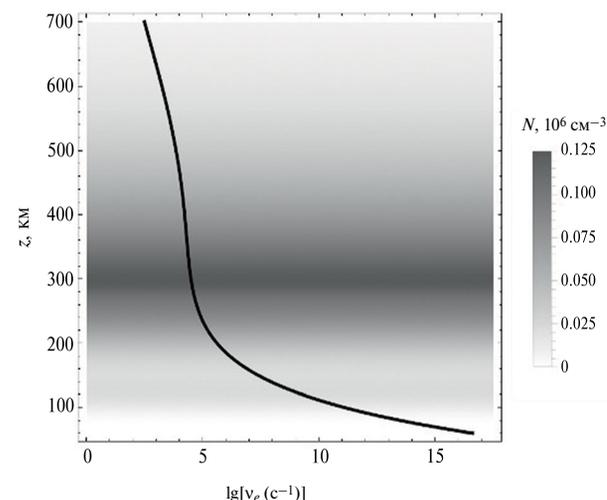


Рис. 3. Зависимость электронной частоты соударений от высоты z .

расположенным на поверхности Земли на рабочей частоте $f = 3.3$ МГц. Начало системы координат совмещено с источником, углы выхода лучей меняются от 0 до 90°. В виде фона различной плотности, как и на рис. 3, показана электронная концентрация в ионосфере.

Лучи, соответствующие распространению o -волны, с небольшим углом выхода отражаются от слоев E и F и возвращаются на землю, а лучи с большими углами выхода проходят сквозь ионосферу. Из рис. 4а видно, что семейство лучей образует сложную каустическую структуру, содержащую три разделенных в пространстве каустических острия. В соответствии с классификацией волновых катастроф каждое каустическое острие это особенность A_3 [6]. Нижнее каустическое острие обусловлено отражением от слоя E, а два верхних каустических острия определяются ионосферными

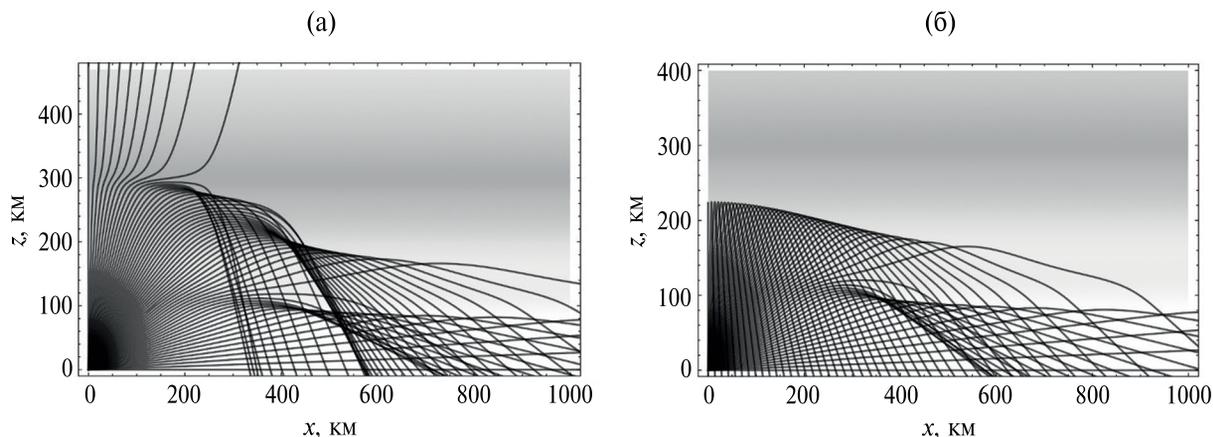


Рис. 4. Лучевые структуры в плоскости (x, z) : o -волна (а) и x -волна (б).

слоями, образующими главный максимум. В случае x -волны (рис. 4б) все лучи отражаются от ионосферы и возвращаются на поверхность Земли, формируя только одно каустическое острие и простую каустику, особенность A_2 .

Из численного решения расширенной БС уравнений можно найти расходимости лучевых потоков по формуле

$$R_s = -10 \lg \left| \frac{J_0}{J} \right|, \quad (4)$$

где J — якобиан расходимости в рассматриваемой точке на луче, а J_0 — начальный якобиан расходимости [14, 15], определенный для условного расстояния от источника.

На рис. 5а и 5б приведены зависимости расходимости вдоль лучей для обыкновенной

и необыкновенной волн от горизонтальной координаты x . Для обыкновенной и необыкновенной волн графики не сильно отличаются. Видно, что при удалении от источника излучения амплитуда волны резко падает, примерно на 100...110 дБ, а далее медленно спадает до уровня -120 дБ. При этом на каждом луче существуют узкие области, в которых расходимость стремится к нулю. Это каустики.

Поскольку лучевое описание амплитудно-фазовой структуры волнового поля в областях каустик (огibaющих лучевых семейств) и их особенностей неприменимо, то для описания волновых полей в этих областях были использованы методы волновой теории катастроф (ВТК). Методы ВТК помимо определения полного волнового поля позволяют построить наглядную геометрическую (лучевую и каустическую) интерпретацию особых фокальных пространственных или

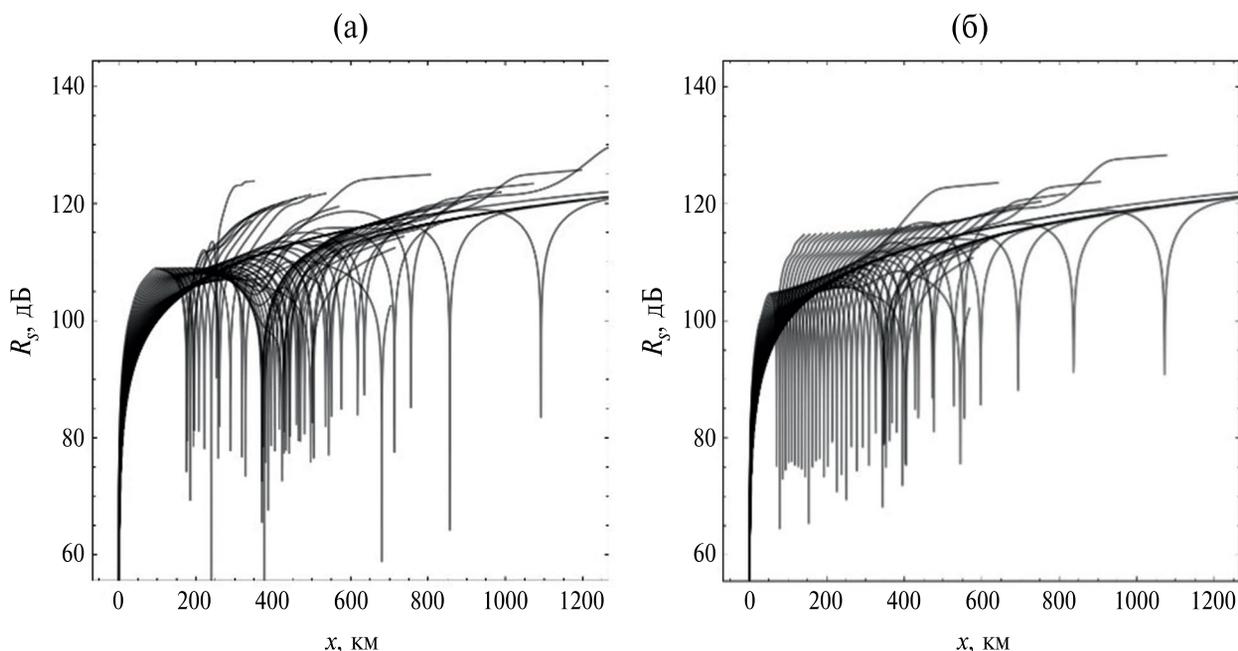


Рис. 5. Расходимость o -волны (а) и x -волны (б).

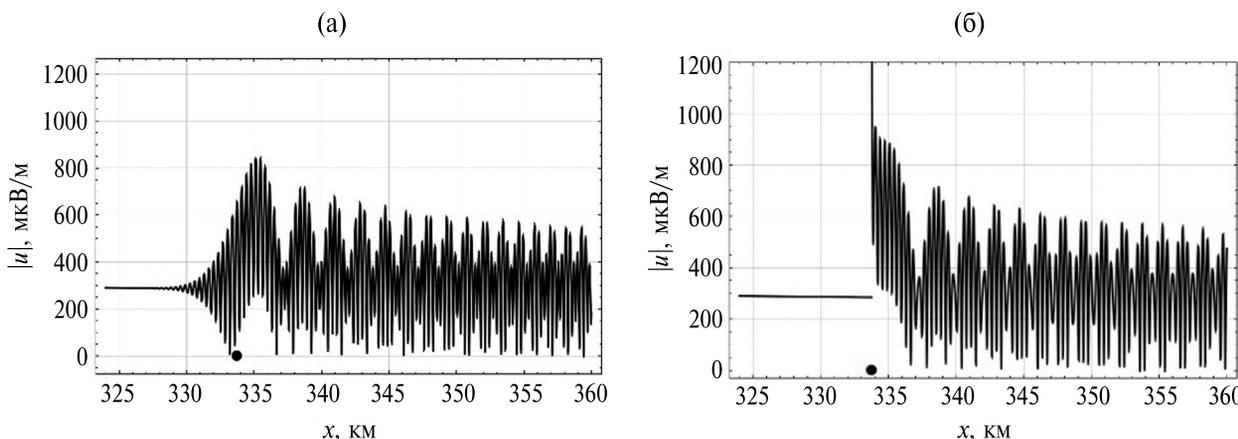


Рис. 6. Зависимость модуля напряженности электрического поля от расстояния без учета поглощения: равномерная асимптотика (а), ГО-приближение (б); точка – положение каустики.

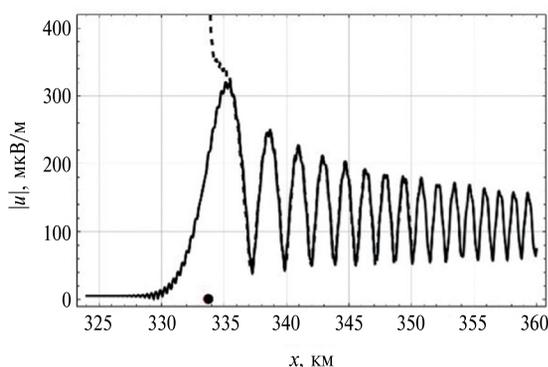


Рис. 7. Зависимость модуля напряженности электрического поля от расстояния с учетом поглощения.

пространственно-временных интерференционных (дифракционных) структур электромагнитных полей [6,19]. В рамках ВТК всякая особенность фокального типа, возникающая при построении лучевого семейства, есть особенность (катастрофа) проектирования семейств бихарактеристических решений из координатно-импульсного (фазового) пространства в координатное (конфигурационное) пространство и соответствует эталонной амплитудно-фазовой структуре волнового поля.

Для анализа волнового поля в области каустик было проведено математическое и численное моделирование амплитуды поля x - и o -волны в окрестности этих особенностей, на основе решения расширенной бихарактеристической системы Лукина. Выполнено сопоставление равномерного (каустического) приближения и неравномерного (лучевого) приближения, а также проведена качественная оценка влияния x -волны на амплитуду поля o -волны в окрестности каустики [20, 21].

Для численного моделирования был разработан и реализован метод интерполяционной локальной асимптотики, позволяющий на основе данных интерполяции вычислить параметры

интерферирующих парциальных полей, а затем по известным формулам находить поля как в лучевом, так и в каустическом приближении [15, 22]. Для примера на рис. 6а, 6б приведены результаты численного расчета амплитуды поля o -волны с учетом вклада x -волны в окрестности каустики в каустическом и геометрооптическом приближениях без учета поглощения. Положение каустики показано точкой на нижней оси.

Из рис. 6 видно, что x -волна может вносить существенный вклад в структуру каустического поля o -волны, что выражается в модуляции поля одной волны другой волной. При этом внутри осциллирующей огибающей присутствует и более быстрая интерференционная составляющая при условии когерентности полей волн разной поляризации (на рисунках не показана). Однако учет поглощения нивелирует этот вклад (рис. 7).

3. МЕТОДЫ ДИАГНОСТИКИ РАЗЛИЧНЫХ СИЛЬНО НЕОДНОРОДНЫХ АНИЗОТРОПНЫХ СРЕД – ИОНОСФЕРЫ ЗЕМЛИ В РАМКАХ МЕТОДА БИХАРАКТЕРИСТИК И ВОЛНОВОЙ ТЕОРИИ КАТАСТРОФ

Для оценки погрешностей математического моделирования, связанных с асимптотическим характером используемых методов, было проведено исследование их применимости для решения задачи о критическом отражении радиоволн от плазменного слоя. Большим параметром асимптотик в этом случае является отношение толщины слоя к длине волны. На основе метода канонического оператора Маслова [6] построено асимптотическое решение для модельной задачи о падении на параболический плазменный слой электромагнитной волны, излученной точечным источником, находящимся вне слоя плазмы в условиях, когда существенными являются эффекты «подбарьерного

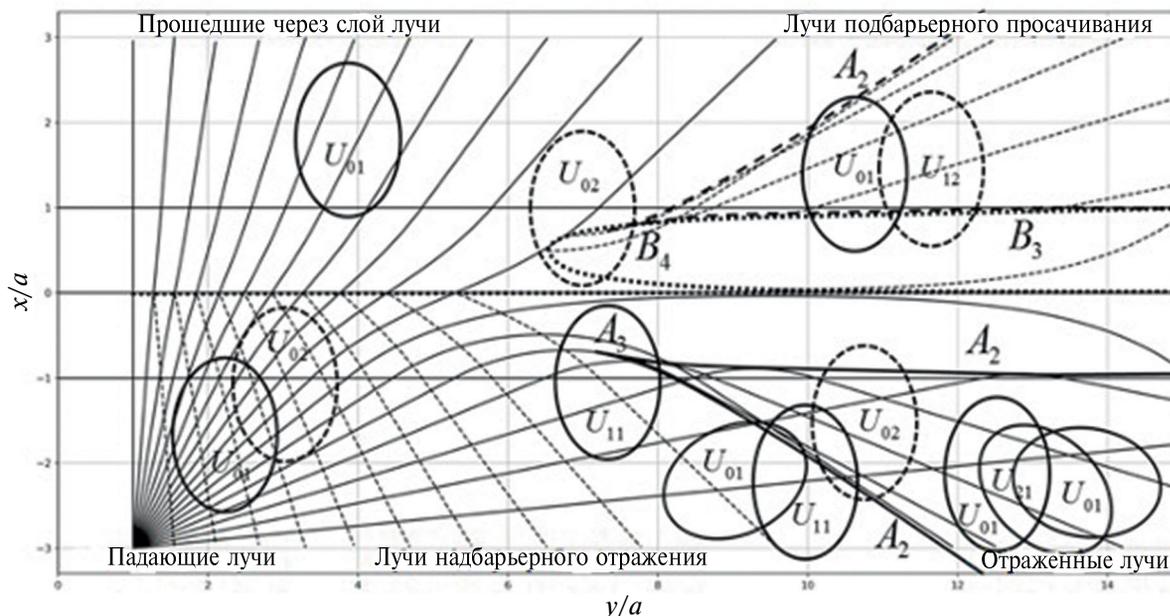


Рис. 8. Геометрия лучевых семейств, особенностей многообразия и карт канонического атласа при отражении радиоволн от плазменного слоя: A_2, A_3 – основные особенности, B_3, B_4 – краевые особенности [23, 24].

просачивания» волны и «надбарьерного отражения» [23, 35]. Решение учитывает как формирование в неоднородном слое фокальных структур различного типа, так и эффекты полупрозрачности слоя для различных частей пространственного спектра волны.

Эффекты полупрозрачности слоя (частичное отражение проходящих слоев волн и частичное просачивание волн, отраженных слоем) представлены в виде взаимодействия отдельных мод решения, отвечающих различным подмногообразиям лагранжева многообразия задачи, определенного в рамках метода бихарактеристик и ВТК. Показано, что в значимой окрестности критического значения параметров слоя существенным является эффект полупрозрачности, для адекватного учета которого предложены новые асимптотические решения.

На основе методов ВТК проанализированы типы фокусировок, возникающие в данных условиях (как основные – A_2, A_3 , так и краевые – B_3, B_4 [23–24]). Показано, что в области над плазменным слоем возможно образование фокальной области для волны просачивания. Показано, что в случае отражающего слоя формируется особенность семейства лучей типа простой каустики, однако равномерная по углу падения волны асимптотика для описания волнового поля не представляет через функцию Эйри и ее производную, а требует использования функции Вебера–Эрмита. На рис. 8 представлен пример геометрии лучевых семейств, особенностей многообразия и карт канонического атласа при отражении радиоволн от плазменного слоя при учете эффектов полупрозрачности.

Решение может быть использовано при интерпретации сложных ионограмм НЗ и слабонаклонного зондирования (СНЗ) при наличии эффектов, связанных с переходными областями в частотной области, соответствующими изменениям условий отражения для различных ионосферных слоев, а также при дифракционном возбуждении волн в ионосферных межслоевых волноводных каналах.

4. МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЛОКАЛИЗОВАННЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ РАЗЛИЧНОГО МАСШТАБА В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕННЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРЕРЫВНЫХ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ

Неоднородности ионосферной плазмы естественного и искусственного происхождения оказывают существенное влияние на распространение радиоволн; их учет необходим при прогнозировании линий КВ-радиосвязи. Поляризационные характеристики коротких радиоволн существенно зависят от наличия неоднородностей на трассе распространения. Для исследования этих эффектов проведено моделирование влияния локальных неоднородностей электронной концентрации ионосферы Земли на амплитуду отраженного сигнала и его поляризационные характеристики при ВЗ частотно-модулированным (ЧМ) КВ-излучением. Использовалась модель анизотропной магнитоактивной ионосферной плазмы, было

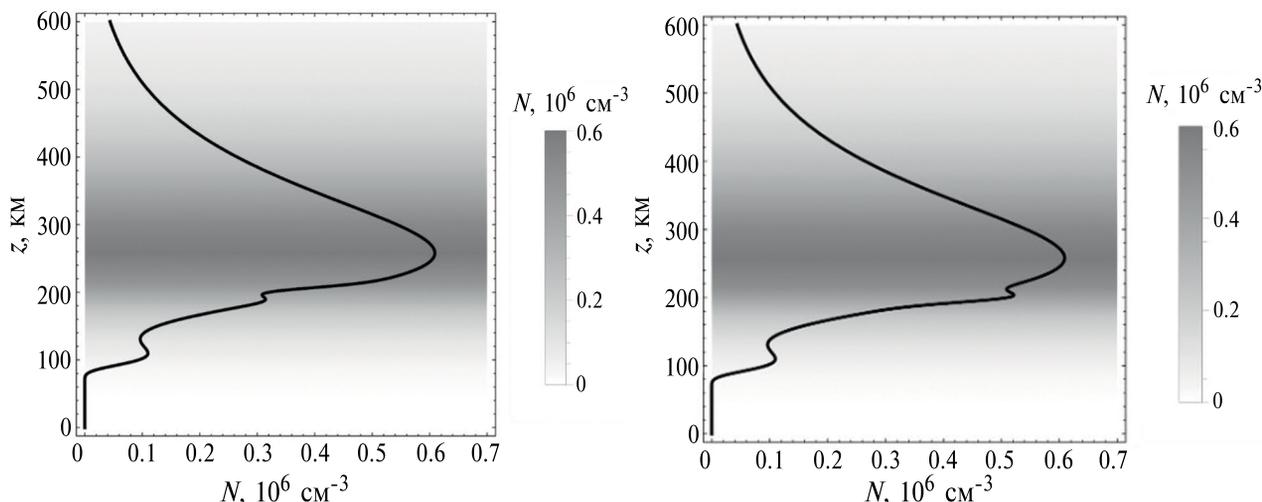


Рис. 9. Зависимости электронной концентрации N от высоты z в случае неоднородности с пониженной (а) и повышенной (б) электронной концентрацией.

проведено моделирование распространения радиоволн различной поляризации, соответствующей o - и x -волнам. Математическое моделирование распространения коротких радиоволн выполнено в рамках метода БС и ВТК. Были исследованы траекторные, энергетические и поляризационные зависимости отраженных сигналов от частоты, а также влияние локальной неоднородности на характеристики сигнала [16, 17, 24, 25].

Для численных расчетов рассматривалась модель ионосферы, включающая ионосферные слои E и F. В модель было введено локальное возмущение (рис. 9а, 9б), расположенное ниже главного максимума ионосферного слоя. Учитывалось влияние эффективной частоты соударений электронов, ответственной за поглощение радиоволн. Эффективная диэлектрическая проницаемость описывалась формулой Эпплтона–Хартри [8], при этом поправка, связанная с эффективной частотой соударений,

в части рефракционного отклонения не учитывалась, поскольку расчеты показали, что она не приводит к существенным отличиям в траекторных параметрах, а сказывается только на энергетике отраженных сигналов.

В качестве иллюстрации на рис. 10а и 10б представлены типичные зависимости от частоты f действующей высоты V_h , определяемой через время прихода луча t_m в точку отражения [26, 27]: для локальной неоднородности с пониженной и повышенной электронной концентрацией. Графики согласуются с ионограммами ВЗ. Локальные максимумы соответствуют положению на частотной оси областей характеристических частот плазменных неоднородностей: в левой части графика – слоя E, справа – локальной неоднородности.

Важной характеристикой отраженных от ионосферы радиоволн являются коэффициенты поляризации. В рамках проведенных исследований

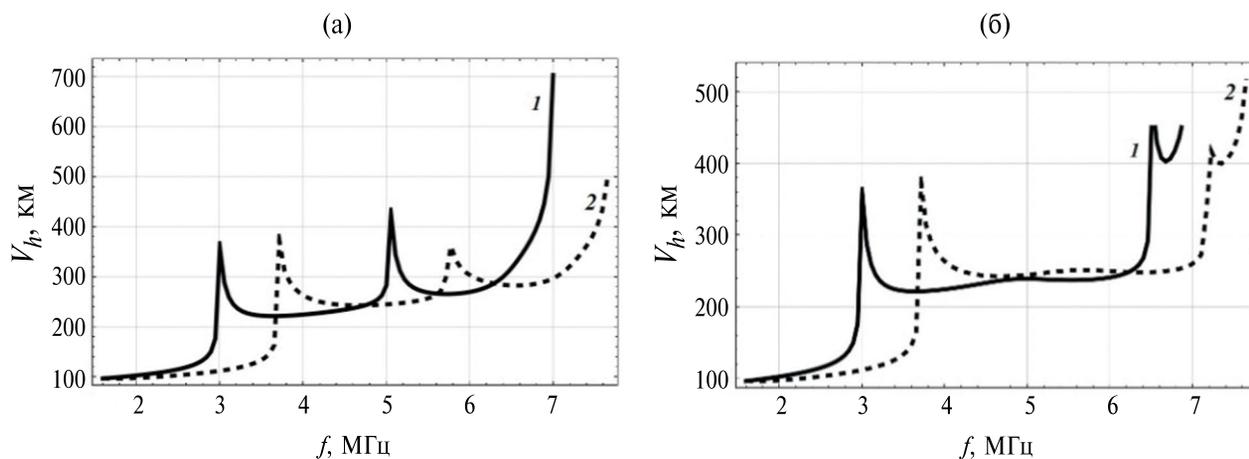


Рис. 10. Зависимость действующей высоты от частоты, локальная неоднородность с пониженной (а) и повышенной (б) электронной концентрацией: o -волна (1) и x -волна (2).

было выполнено моделирование частотных вариаций поперечных поляризационных коэффициентов для o -волны и x -волны. Когда эти коэффициенты близки к единице, волна сохраняет круговую поляризацию. В точке отражения коэффициент поляризации меняет знак. Для o -волны существуют лучи, для которых эллипс поляризации в среде существенно меняется вдоль лучевой траектории. Однако при выходе из ионосферы круговая поляризация в целом восстанавливается и плоскость поляризации остается ортогональной направлению распространения [16, 17]. Также показано, что в ионосфере значения коэффициентов продольной поляризации могут достигать существенной величины, причем для o -волны пределы изменения коэффициента продольной поляризации вдоль траектории существенно больше, чем для x -волны.

Для оценки возможности контроля особенностей частотных характеристик КВ-зондирования в невозмущенных условиях и выделения на их фоне эффектов, связанных с локальными неоднородностями, выполнено моделирование вариаций амплитуды отраженного от ионосферы радиосигнала в точке приема в зависимости от частоты сигнала. Для вычисления локальной расходимости лучевой конгруэнции и определения амплитуды поля в каждой точке пространства применена расширенная бихарактеристическая система Лукина. Исследованы зависимости расходимости от высоты для o - и x -волны. Выделены три группы такой зависимости: для волн, которые отражаются от слоя E (нижние), волн, которые отражаются от ионосферы выше слоя E до неоднородности, и волн, отражающиеся от слоя F2.

5. МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ПЕРЕМЕЩАЮЩИХСЯ ИОНОСФЕРНЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ ВРЕМЕННЫХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ И ПОЛЯРИЗАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК НЕПРЕРЫВНЫХ ЧАСТОТНО-МОДУЛИРОВАННЫХ СИГНАЛОВ ПРИ СЛАБО НАКЛОННОМ ЗОНДИРОВАНИИ

В рамках рассматриваемого подхода выполнено математическое моделирование распространения коротких радиоволн и проанализированы вариации их характеристик при наличии в ионосфере перемещающихся возмущений (ПИВ) в экспериментах по СНЗ ионосферы Земли непрерывными частотно-модулированными сигналами. Рассмотрено распространение обыкновенной и необыкновенной компоненты электромагнитной волны. Для проведения сравнительного анализа выбраны две модели ионосферы Земли: модель, содержащая ПИВ и не содержащая ПИВ. Обе модели также включают ионосферный слой F2, слой F1 и слой E [28, 29].

Для определения временных, энергетических и поляризационных характеристик сигналов, прошедших из передатчика в приемник, были использованы метод бихарактеристик и ВТК. С помощью метода бихарактеристик выполнены расчеты частотных вариаций группового времени прихода сигнала, угла выхода сигнала, а также угла прихода сигнала. Последний параметр позволяет оценить предельную поляризацию и определить расположение осей эллипса поляризации в проекции на плоскость наблюдения. При численном моделировании предполагалось, что точечный источник излучения находится на поверхности Земли. Приемник расположен также на поверхности Земли на расстоянии 100 км от источника. Слабо наклонное зондирование осуществлялось с помощью линейной частотной модуляции (ЛЧМ) излучения в диапазоне 2...7 МГц. Магнитное поле Земли предполагалось постоянным. При расчетах считалось, что характерный размер ПИВ по горизонтали (координате x) составляет 40 км, по вертикали z – 10 км.

Характерная лучевая структура для частоты 6.2 МГц показана на рис. 11. Положение центра неоднородности – точка $(-20$ км, 200 км). Видно, что в окрестности приёмника образуется зона многолучевости, ограниченная двумя каустиками и отвечающая катастрофе A_3 – каустическое острие.

На рис. 12а показаны зависимости угла выхода лучей от координаты x при разных значениях положения центра ПИВ x_d , а на рис. 12б – зависимости группового времени. Как видно из рисунков, наличие ПИВ приводит либо к образованиям S-образных кривых (рис. 12а), либо к образованию петель времени группового запаздывания [28, 29] (рис. 12б).

Частотные зависимости параметров принимаемого ЧМ-сигнала на трассах СНЗ исследовались для невозмущенной и возмущенной модели ионосферы, содержащей ПИВ. Для группового времени прихода сигнала на частотах ниже 3 МГц эти зависимости в возмущенном и невозмущенном случае совпадают. Главным признаком наличия ПИВ считается U-образный элемент на графиках частотных

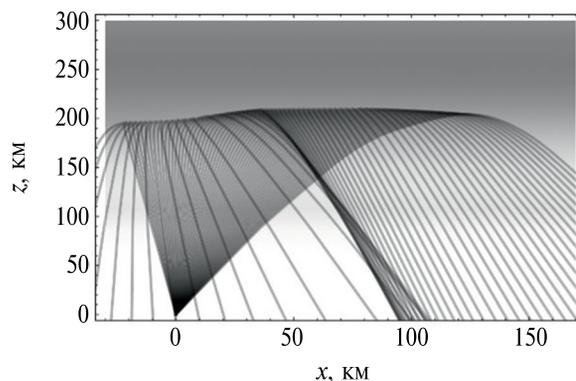


Рис. 11. Лучевая структура в плоскости (x, z) ; ПИВ образует каустическое острие.

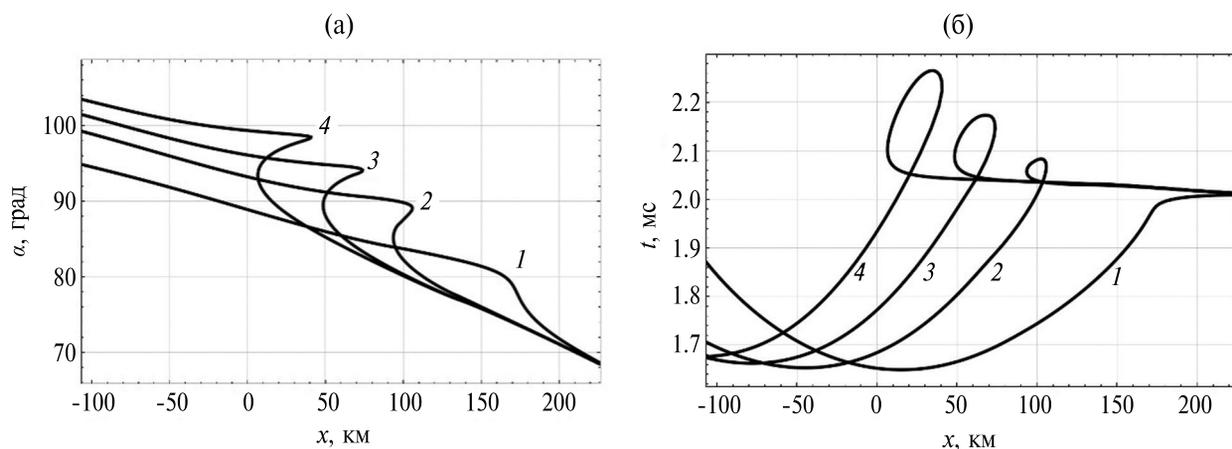


Рис. 12. Зависимость угла выхода лучей (а) и группового времени прихода сигнала (б) от горизонтальной координаты при $x_d = 10$ (1), -20 (2), -40 (3) и -60 км (4).

зависимостей. Однако расчеты показывают, что правая ветвь U не относится к ПИВ, а связана с прохождением волны сквозь ионосферу при более высоких частотах. Признаком ПИВ, как и в случае появления E-слоя, является наличие точки поворота на кривой частотной зависимости, которая соответствует каустике, а также резкий рост времени группового запаздывания сигнала [28].

6. МЕТОД ДИАГНОСТИКИ ЧАСТОТЫ СОУДАРЕНИЙ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ НА ОСНОВЕ РЕГИСТРАЦИИ АМПЛИТУДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК O- И X-КОМПОНЕНТ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ ВЕРТИКАЛЬНОМ ЗОНДИРОВАНИИ

В рамках рассматриваемого аппарата математического моделирования разработан метод реконструкции эффективной частоты соударений электронов в ионосфере Земли на основе амплитудных данных об ослаблении ЧМ-радиосигнала при ВЗ ионосферы декаметровыми ЧМ-радиосигналами [30–32].

При работе ЛЧМ-ионозонда регистрируются задержка и амплитуда сигнала в зависимости от частоты излучения. Профиль электронной концентрации как функция высоты может быть восстановлен по зависимости задержки сигнала от частоты излучения стандартными методами. Что же касается эффективной частоты соударений, то она может быть восстановлена по ослаблению амплитуды зондирующего сигнала, определяемому из совокупности факторов: амплитуды поля вне ионосферы на некотором расстоянии от источника, мощности источника излучения, расходимости лучевых конгруэнций, которая вычисляется как корень из отношения якобианов, определяемых через производные лучевых координат по начальным углам выхода луча и групповому времени вдоль

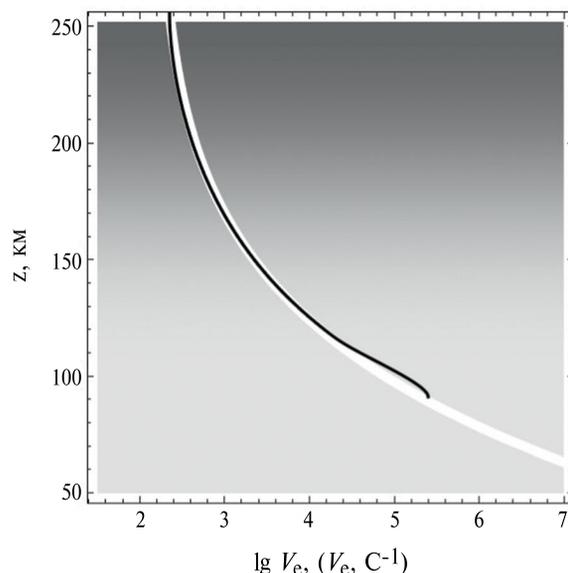


Рис. 13. Сравнение зависимости модельной (светлая линия) и расчетной (темная) частоты соударений электронов от высоты.

траектории и собственно поглощения радиоволн в ионосферной плазме, обусловленного столкновениями электронов.

Пример расчета, выполненный на основании разработанных алгоритмов восстановления частоты соударений $\nu_e(z)$, приведен на рис. 13 ([32]).

Результаты расчета показывают, что модельные и расчетные значения совпадают с точностью, приемлемой для экспериментальных работ по НЗ и СНЗ ионосферы. Причем точность восстановления значений частоты соударений увеличивается с высотой.

В работах [33, 34] разработанный метод обобщен на случай магнитоактивной среды, учитывающий различный характер распространения обыкновенной и необыкновенной волны.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, методом бихарактеристик исследованы особенности распространения радиоволн декаметрового диапазона (~2...8 МГц) в ионосфере Земли, содержащей как регулярные слои E, F1 и F2, так и возмущения электронной плотности различного характера. Выполнено моделирование основных характеристик сигналов НЗ и СНЗ в условиях невозмущенной и возмущенной ионосферы. При моделировании использовались модели крупномасштабных локализованных неоднородностей электронной концентрации и неоднородностей типа ПИВ.

Рассмотрено распространение как обыкновенной, так и необыкновенной волны в магнитоактивной плазме. Выполнено численное моделирование ионограмм СНЗ ЛЧМ-сигналами. В частности, показано, что ионограмма необыкновенной волны сдвинута по частоте относительно ионограммы обыкновенной волны приблизительно на одну и ту же величину как для невозмущенной, так и возмущенной модели.

Показано, что на частотах радиосигналов, отражающихся в окрестности максимума E-слоя, а также на частотах, отражающихся в области ПИВ, возникает каустика и зона трехлучевости. Установлено, что зависимости группового времени запаздывания сигнала и угла выхода радиосигнала от частоты имеют одну и ту же качественную зависимость в обоих случаях.

При проведении численного моделирования была определена расходимость лучевого потока в точке приема излучения, что позволило прогнозировать уровень принимаемого сигнала. Показано, что расходимости и амплитуды принятых сигналов (без учета поглощения, обусловленного частотой соударений электронов в плазме) для обыкновенной и необыкновенной волн приблизительно одинаковы и отличаются только сдвигом в частотной зависимости. В соответствии с ГО-подходом расходимость резко убывает в окрестности каустики и резко нарастает при приближении частоты к частоте просачивания волны. Проблема просачивания радиоволны рассмотрена в работах [24,35] на основе канонического оператора Маслова [6].

В работе также представлены новые методы диагностики тонкой структуры ионосферы Земли, развитые на основе метода бихарактеристик и ВТК, и их верификация путем сопоставления результатов экспериментов по ВЗ и СНЗ с результатами моделирования. Развита методика восстановления профилей электронной концентрации и частоты соударений электронов в ионосфере с использованием информации о поляризационных и амплитудных характеристиках обыкновенной и необыкновенной компонент регистрируемых

сигналов с линейной частотной модуляцией при вертикальном и наклонном зондировании.

БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность В. И. Куркину (ИСЗФ СО РАН) за предоставленные результаты экспериментальных наблюдений.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 20–12–00299–П).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Иванов Д. В.* Методы и математические модели исследования распространения в ионосфере сложных декаметровых сигналов и коррекции их дисперсионных искажений. Йошкар-Ола: Марийский гос. технич. ун-т, 2006.
2. *Куницын В. Е., Терещенко Е. Д., Андреева Е. С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007.
3. *Софьин А. В., Куркин В. И.* // Распространение радиоволн. Труды XXVII Всерос. открытой науч. конф. Калининград, 28 июня–3 июля 2021. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2021. Ч. 3. С. 358.
4. *Цедрик М. В., Подлесный А. В., Куркин В. И.* // Всерос. открытые Армандовские чтения. Матер. Всерос. открытой науч. конф. «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Муром. 28–30 июня. 2022. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2022. С. 223.
5. *Казанцев А. Н., Лукин Д. С., Спиридонов Ю. Г.* // Космич. исслед. 1967. Т. 5. № 4. С. 593.
6. *Лукин Д. С., Палкин Е. А.* Численный канонический метод в задачах дифракции и распространения электромагнитных волн в неоднородных средах. М.: МФТИ, 1982.
7. *Ипатов Е. Б., Крюковский А. С., Лукин Д. С. и др.* // РЭ. 2014. Т. 59. № 12. С. 1180.
8. *Дэвис К.* Радиоволны в ионосфере. М.: Мир, 1973.
9. *Крюковский А. С., Лукин Д. С., Растягаев Д. В., Скворцова Ю. И.* // РЭ. 2015. Т. 60. № 10. С. 1001.
10. *Лукин Д. С., Спиридонов Ю. Г.* // РЭ. 1969. Т. 14. № 9. С. 1673.
11. *Крюковский А. С., Лукин Д. С., Кирьянова К. С.* // РЭ. 2012. Т. 57. № 9. С. 1028.
12. *Kryukovsky A. S., Rastyagaev D. V., Bova Y. I., Popchenko O. V.* // 2020 7th All-Russian Microwave

- Conf. (RMC-2020). Moscow. 25–27 Nov. N.Y.: IEEE, 2020. P. 220.
13. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Popchenko O.V., Rastyagaev D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1991. № 1. Article No. 012002.
 14. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С. // РЭ. 2019. Т. 64. № 1. С. 3.
 15. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Бова Ю.И. // РЭ. 2020. Т. 65. № 12. С. 1160.
 16. Bova Yu.I., Kryukovsky A.S., Kutuza B.G. et. al. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1632. № 1. Article No. 012009.
 17. Egorov D.P., Kutuza B.G., Kryukovsky A.S. et. al. // 2022 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS). Hangzhou. 25–29 Apr. N.Y.: 2022, P. 1108.
 18. Бова Ю.И., Крюковский А.С., Лукин Д.С., Растягаев Д.В. // Всерос. открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Матер. Всерос. открытой науч. конф. Муром. 23–25 июня. 2020. Муром.: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2020. С. 54.
 19. Крюковский А.С. // Междунар. Байкальская молодеж. науч. школа по фундаментальной физике. Труды XVII Конф. молодых ученых. Иркутск 5–10 сент. Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2022. С. 3.
 20. Bova Yu.I., Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2020. V. 1632. № 1. Article No. 012005.
 21. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Rastyagaev D.V., Bova Y.I. // XXXIV General Assembly and Scientific Symp. Int. Union of Radio Sci. (URSI GASS). Rome. 28 Aug- 04 Sept. 2021. Paris: URSI, 2021. Paper Th-B08-PM1–2.
 22. Каренов С.Л., Крюковский А.С. // РЭ. 2001. Т. 46. № 1. С. 40.
 23. Палкин Е.А., Петрович А.А. // РЭ. 2021. Т. 66. № 1. С. 18.
 24. Ipatov E., Palkin E., Rastyagaev D. // 2020 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC). Moscow. 25–27 Nov. N.Y.: IEEE, 2020. P. 216.
 25. Ипатов Е.Б., Палкин Е.А., Петрович А.А., Растягаев Д.В. // Тр. XXVII Всерос. открытой науч. конф. Калининград. 28 июня. – 03 июля. 2021. Калининград: БФУ им. И. Канта, 2021. С. 893.
 26. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Попченко О.В., Растягаев Д.В. // Всерос. открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Муром., 25–27 июня. 2021. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2021. С. 32.
 27. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Popchenko O.V., Rastyagaev D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1991. Article No. 012002.
 28. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. // РЭ. 2023. Т. 68. № 6. С. 553.
 29. Михалева Е.В., Крюковский А.С., Растягаев Д.В. // Всерос. открытые Армандовские чтения. Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн. Матер. Всерос. открытой науч. конф. Муром. 27–29 июня. 2023. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2023. С. 47.
 30. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V. et. al. // 2020 7th All-Russian Microwave Conf. (RMC). Moscow. 25–27 Nov. N.Y.: IEEE, 2020. P. 211.
 31. Kryukovsky A.S., Lukin D.S., Mikhaleva E.V., Rastyagaev D.V. // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1991. № 1. Article No. 012001.
 32. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалёва Е.В., Растягаев Д.В. // РЭ. 2022. Т. 67. № 2. С. 117.
 33. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Михалева Е.В., Растягаев Д.В. // Всерос. открытые Армандовские чтения «Современные проблемы дистанционного зондирования, радиолокации, распространения и дифракции волн». Матер. Всерос. открытой науч. конф. Муром. 28–30 июня. 2022. Муром: Изд.-полиграфический центр МИ ВлГУ, 2022. С. 36.
 34. Kryukovsky A.S., Mikhaleva E.V., Lukin D.S., Rastyagaev D.V. // 2022 IEEE8th All-Russian Microwave Conf. (RMC). Moscow. 23–25 Nov. N.Y.: IEEE, 2022. P. 334.
 35. Palkin E.A., Petrovich A.A. // 2022 IEEE8th All-Russian Microwave Conf. (RMC). Moscow. 23–25 Nov. N.Y.: IEEE, 2022. P. 301.

MATHEMATICAL MODELING OF THE INFLUENCE OF EARTH'S IONOSPHERE INHOMOGENEITIES ON THE PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES

A. S. Kryukovsky*, D. S. Lukin, E. V. Mikhaleva, E. A. Palkin, D. V. Rastyagaev

*Russian New University,
22, Radio St., Moscow, 105005 Russian Federation
E-mail: kryukovsky56@yandex.ru

Received October, 28 2023, revised October, 28, 2023, accepted November, 25, 2023

New methods for diagnostics of the fine structure of the Earth's ionosphere and their verification by comparing the results of their application with the results of modeling and independent direct measurements are presented. Techniques for reconstructing the profiles of electron density and electron collision frequency in the ionosphere are developed using information on the polarization and amplitude characteristics of the ordinary and extraordinary components of the recorded signals with linear frequency modulation during vertical and oblique sounding. Mathematical and numerical modeling of the influence of ionospheric inhomogeneities on the propagation of short-wave radiation, as well as an analysis of temporal variations in the amplitude, polarization and trajectory characteristics of decameter radio signals reflected from the ionosphere, have been carried out. Based on the bicharacteristic method and the wave theory of catastrophes, methods for mathematical modeling of the features of the propagation of frequency-modulated radio signals in the ionospheric plasma in the presence of local inhomogeneities of the medium are developed. Numerical algorithms for programs for constructing ionograms of oblique and vertical sounding in the presence of local inhomogeneities in the ionosphere are developed.

Keywords: ionosphere, ionospheric inhomogeneities, effective collision frequency, electron density profiles, ionospheric sounding, rays, bicharacteristics, characteristics of decameter radio signals, divergence, absorption