

На правах рукописи



Нгуен Минь Жанг

**МЕТОД И АЛГОРИТМ ПРОГНОЗИРОВАНИЯ УГЛОВ ПРИХОДА
ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН ПРИ ИХ РАСПРОСТРАНЕНИИ
В ГОРИЗОНТАЛЬНО-НЕОДНОРОДНОЙ
РАССЕИВАЮЩЕЙ ИОНОСФЕРЕ**

Специальность 05.12.04 – Радиотехника, в том числе системы
и устройства телевидения

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Красноярск – 2017

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Иркутский национальный исследовательский технический университет»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник
Агарышев Анатолий Иванович

Официальные оппоненты: **Сажин Виктор Иванович,**
доктор физико-математических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет», кафедра радиофизики и радиоэлектроники, профессор

Горбачев Олег Анатольевич,
доктор технических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Московский государственный технический университет гражданской авиации», Иркутский филиал, директор

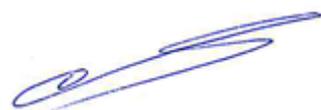
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Иркутский государственный университет путей сообщения»

Защита состоится « 28 » ноября 2017 г. в 15⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д212.099.21 на базе Сибирского федерального университета по адресу: 660036, г. Красноярск, ул. Академгородок, 13а, ауд. 107.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте Сибирского федерального университета www.sfu-kras.ru.

Автореферат разослан « ___ » _____ 2017 года

Ученый секретарь
диссертационного совета



Дмитриев Дмитрий Дмитриевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. В настоящее время существует множество видов радиосвязи. Они разработаны, в том числе за последние годы, благодаря научно-техническому прогрессу с целью удовлетворения непрерывно растущих потребностей пользователей. К их числу относятся, в частности, радиорелейные и спутниковые линии.

При этом системы связи с использованием декаметровых радиоволн (ДКВ) сохраняют свою значимость. ДКВ отражаются от ионосферы с малыми потерями, поэтому они могут распространяться на большие расстояния в процессе однократного или многократных отражений от ионосферы и поверхности Земли и не требуют передатчиков большой мощности. Системы радиосвязи, использующие ДКВ, можно применять для диагностики состояний ионосферы, так как распространяющиеся ДКВ радиоволны очень чувствительны к параметрам окружающей среды. Кроме того, системы ДКВ радиосвязи обладают рядом преимуществ перед другими системами связи, например, сравнительно низкой стоимостью эксплуатации средств системы ДКВ радиосвязи и высокой устойчивостью систем ДКВ-радиосвязи к внешним воздействиям.

Для повышения эффективности системы ДКВ радиосвязи разработан ряд способов. Среди них – использование ретранслятора, вынесенного за зону расположения абонентов системы, прогнозирование оптимальной рабочей частоты, применение метода наклонного зондирования (НЗ) ионосферы. Важный вклад в развитие этих методов внесли, в том числе, К. Дэвис, Р. Фенвик, В.Б. Смирнов, В.А. Иванов, О.В. Головин, А.П. Потехин, В.И. Куркин и др.

Степень разработанности темы диссертации. Особое место в диссертации занимает способ повышения эффективности систем ДКВ радиосвязи на основе оптимизации диаграмм направленности приёмно-передающих антенн, что требует дополнительных устройств в виде антенн с управляемыми по углу диаграммами направленности. Для реализации данного способа необходимы прогнозы углов излучения и приёма радиоволн в вертикальной плоскости (углов места) с использованием экспериментальных данных об угловых характеристиках ДКВ, полученных, например, А.И. Агарышевым и В.Е. Унучковым [1*].

Известный метод прогнозирования углов места, рекомендованный к практическому использованию Международным консультативным комитетом по радио (МККР), основан на задании параметров ионосферы и расчётах характеристик радиоволн. Он реализован в виде программы для ЭВМ, которая обеспечивает высокое быстродействие при расчёте характеристик ДКВ и может применяться в задачах проектирования систем радиосвязи, требующих большого объема расчётов, например, при проектировании систем ДКВ радиосвязи с вынесенным ретрансляционным пунктом. Однако метод МККР не учитывает регулярные (прогнозируемые) изменения параметров ионосферы вдоль радиолиний, то есть не учитывает возможные отличия средних значений углов излучения и приёма ДКВ в вертикальной плоскости. Возможны также систематические ошибки прогнозов этих углов в условиях многослойной ионосферы (днём летом и в равноденствие) из-за нарушений условий применения теорем эквивалентности в условиях сферической ионосферы, лежащих в основе метода МККР. Существуют также методы, осно-

ванные на численном интегрировании системы лучевых уравнений для ионосферы с изменяющейся в вертикальном и горизонтальном направлениях плотностью электронов N . Они обеспечивают более высокую, по сравнению с методом МККР, точность прогнозов углов излучения и приёма (характерный метод описан в работе В.И. Сажина [2*]), но не обеспечивают необходимое при проектировании систем ДКВ радиосвязи быстрое действие расчетов характеристик ДКВ.

Поэтому **актуальность темы исследования** диссертации состоит в том, что разработан метод прогнозирования углов прихода ДКВ, позволяющий учесть влияние регулярных и случайных неоднородностей N , то есть учесть эффекты регулярной рефракции и рассеяния ДКВ такими неоднородностями.

Метод учёта влияния регулярных и случайных (рассеивающих) неоднородностей N обоснован в [1*], но этот метод предназначен для среды, в которой отсутствуют градиенты электронной плотности вдоль трассы.

Цели и задачи диссертации заключаются в разработке метода и алгоритма для прогнозирования углов прихода ДКВ в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере, а также в оптимизации диаграмм направленности приёмопередающих антенн.

Для достижения цели распространение ДКВ в ионосфере описывается законом Снеллиуса, но с учетом возмущений в нижней части слоя ионосферы. Такой характер возмущений радиоволн вполне оправдан, так как характерный масштаб возмущений на высоте 100 км $s \approx 100$ м, а с ростом высоты на 300 км характерный масштаб возрастает на 100 км. Степень влияния возмущений на траекторию радиоволн определяется соотношением $\Delta\chi/s$, где $\Delta\chi = \Delta N/N$ – возмущение электронной концентрации; $\Delta\chi \approx 1\%$ на высоте 100 км и $\Delta\chi \approx 10\%$ – на 300 км, поэтому $\Delta\chi/s$ на высоте 100 км больше в 100 раз по сравнению с отношением $\Delta\chi/s$ на высоте 300 км.

В диссертации были решены следующие задачи:

1. Найдены аналитические выражения для расчета градиента коэффициента преломления в трехслойной горизонтально-неоднородной ионосфере при наличии возмущения в нижней части отражающего слоя, с использованием которых появилась возможность построения траекторий распространения декаметровых радиоволн.

2. Разработаны метод, алгоритм и программное обеспечение для оперативного прогнозирования углов прихода декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной ионосфере с учетом влияния случайных неоднородностей в рамках принятой модели возмущения фоновой ионосферы.

3. Проведен анализ точности разработанного метода прогнозирования углов прихода ДКВ в горизонтально-неоднородной ионосфере с наличием возмущения путём сравнения результатов расчета с результатами известных измерений.

4. Разработана методика оптимизации приемопередающих антенн, основанная на прогнозах углов излучения и приема ДКВ в вертикальной плоскости.

Научная новизна диссертации заключается в создании метода исследования ионосферного распространения радиоволн, применение которого обеспечивает учёт горизонтальных градиентов критической частоты и высоты отражающего слоя в трехслойной горизонтально-неоднородной ионосфере, а также моделирует

эффекты рассеяния радиоволн при наличии возмущения в нижней части отражающего слоя:

1. Найдены новые аналитические выражения для расчета градиента коэффициента преломления в такой среде, с использованием которых появилась возможность построения траекторий распространения декаметровых радиоволн.

2. Разработаны алгоритм и программное обеспечение для оперативного прогнозирования углов места декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной ионосфере с учетом влияния возмущения в нижней части отражающего слоя.

3. Проведенные вычисления в рамках используемой модели случайных неоднородностей показывают, что влияние таких неоднородностей может увеличивать средние углы приема по сравнению со средними углами излучения.

4. Предложена новая методика выбора направления главного лепестка приемопередающих антенн, включающая учет влияния горизонтальных градиентов электронной концентрации, и показано для двух трасс, что она существенно повышает эффективность работы антенн.

Теоретическая значимость определяется тем, что разработан метод прогнозирования углов прихода декаметровых радиоволн при распространении в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере при учете возмущений в нижней части ионосферы и роли верхнего луча, дополненный новыми аналитическими выражениями для градиента коэффициента преломления.

Практическая значимость обусловлена тем, что разработанный новый алгоритм и программа для оперативного прогнозирования углов прихода декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере, новая методика оптимизации диаграмм направленности приемопередающих антенн могут использоваться при проектировании и эксплуатации систем коротковолновой радиосвязи.

Методы исследований заключались в применении математических методов для построения траекторий декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере и анализа экспериментальных данных.

Методики исследований заключались в анализе результатов измерений по углам приема на трассах длиной в 931 км и 2300 км.

По результатам выполненных исследований можно сформулировать следующие **основные положения, выносимые на защиту**:

1. Метод прогнозирования углов прихода ДКВ обеспечивает учёт горизонтальных градиентов критической частоты и высоты отражающего слоя, что следует из анализа расчетных данных и результатов измерений, в том числе по среднему углу ориентации приёмных антенн.

2. Разработанный алгоритм и созданная программа повышают оперативность прогнозирования угловых характеристик ДКВ по сравнению с другими численными методами расчёта.

3. В результате прогнозирования углов прихода ДКВ показано, что хорошая точность прогноза достигается на трассе длиной 931 км, при этом погрешность составляет менее 1° , а на трассе длиной 2300 км погрешность увеличивается до 2° , оставаясь, тем не менее, значительно лучше, чем точность, обеспечиваемая из-

вестными методами, которые не учитывают горизонтальные градиенты концентрации электронов.

Достоверность и обоснованность основных результатов и выводов работы определяется использованием математических методов расчетов траекторий радиоволн в ионосфере, проверкой программной реализации на ЭВМ по результатам расчетов, полученным известными методами и сравнением результатов расчета с экспериментальными данными.

Результаты работы внедрены в учебном процессе ФГБОУ ВО «Иркутский национальный исследовательский технический университет»: лекции, курсовой проект и лабораторные работы по дисциплинам «Системы радиосвязи» и «Электродинамика и распространение радиоволн».

Апробация работы. Диссертация прошла апробацию на семинарах кафедры радиоэлектроники и телекоммуникационных систем Иркутского национально-исследовательского технического университета, в ФГБОУ ВО «Иркутский государственный университет путей сообщения», на XI, XII, XIII, XIV всероссийских научно-технических конференциях «Современные проблемы радиоэлектроники и связи» (г. Иркутск, 2012, 2013, 2014, 2016 г.г.), на XXIV Всероссийской научной конференции «Распространение радиоволн» (Иркутск, ИСЗФ СОРАН, 2014 г.), на XXV Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн» (г. Томск, ИОА СОРАН, 2016 г.), на XX Всероссийской научной конференции с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники» (г. Красноярск, Сибирский федеральный университет, 2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 11 научных работ, из них 3 статьи в изданиях, рекомендованных ВАК, а также 1 свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ.

Личный вклад. Все выносимые на защиту результаты получены лично автором или при его непосредственном участии. Постановка задач, методы решения поставленных задач, обобщение результатов диссертации, анализ экспериментальных данных выполнены совместно с научным руководителем А.И. Агарышевым. Автором самостоятельно разработаны алгоритмы и их программные реализации для ЭВМ.

Объем и структура работы. Диссертация состоит из введения, 4-х разделов, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и 2 приложений. Общий объем работы составляет 157 страниц, из них 134 страницы основного текста, включая список используемых источников из 138 наименований, 8 таблиц и 63 рисунка; приложения даны на 23 страницах.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении дана общая характеристика работы, определена её актуальность, сформулированы цель диссертации и решаемые задачи, определены положения, выносимые на защиту, обоснована научная новизна и практическая значимость выполненных исследований. Показан личный вклад автора, внедрение результатов работы, ее апробация, приведено краткое содержание диссертации.

В разделе 1 рассмотрены существующие методы задания моделей однослойной ионосферы. Даны описания метода прогнозирования параметров регу-

лярной ионосферы, метода оперативного расчета характеристик декаметровых радиоволн, в том числе максимальной применяемой частоты (МПЧ), углов излучения и приёма радиоволн, а также метод измерения углов прихода ДКВ. Рассмотрены основные методы построения траекторий радиоволн в ионосфере. Приведены результаты измерений углов прихода радиоволн по трассе Хабаровск – Иркутск и анализа полученных результатов. В заключении к разделу 1 сделан вывод о необходимости учета влияния случайных и регулярных неоднородностей N ионосферы на угловые характеристики декаметровых радиоволн.

Раздел 2 посвящен анализу возможностей применения закона Снеллиуса для построения траекторий радиоволн в ионосфере и приведены метод и алгоритм расчета углов излучения и прихода ДКВ в горизонтально-однородной рассеивающей ионосфере.

В подразделах 2.1 и 2.2 дано описание модифицированного вида закона Снеллиуса для толстого слоя ионосферы, метода и алгоритма построения траекторий радиоволн на основе применения этого закона.

Для толстого слоя, когда толщина слоя не является пренебрежимо малой по сравнению с высотой от Земли, закон Снеллиуса имеет вид [3*]:

$$n \cdot R \cdot \sin(\varphi) = n_1 \cdot R_1 \cdot \sin(\varphi_1), \quad (1)$$

где n, n_1 – коэффициенты преломления среды на уровне « n » и « 1 »; R, R_1 – радиусы от центра Земли до уровней « n » и « 1 »; φ, φ_1 – углы между траекторией радиоволны и радиусами R и R_1 ; φ_1 определяется с учетом среднеквадратического отклонения СКО [1*] (рисунок 1). При входе в ионосферу и выходе из ионосферы углы входа радиоволн в ионосферу φ и углы выхода из ионосферы φ_B испытывают случайные возмущения γ_1, γ_2 (параметр рассеяния). Степень влияния возмущений ионосферы на траекторию радиоволн определяется соотношением χ/s , где χ – возмущение электронной плотности в ионосфере; s – характерный масштаб возмущений. Так как χ/s на высоте 100 км более чем в 100 раз выше, чем на высоте 300 км, поэтому возмущение учитывается только на нижней части слоя.

Углы входа в ионосферу φ и выхода из ионосферы φ_B радиоволн испытывают случайные возмущения: $\varphi = \varphi \pm \gamma_1; \varphi_B = \varphi_B \pm \gamma_2$, где среднее отклонение равно 0, а среднеквадратическое отклонение СКО равно интенсивности рассеяния в ионосфере. Угол φ имеет отрицательную добавку, так как имеется верхний луч. Знак добавки зависит от дальности и она становится существенной на дальности, которая выше 2000 км (рисунки 3а и 4а).

Для определения параметра рассеяния (в градусах) используется метод, предлагаемый в работе А.И. Агарышева [1*]. Выберем на поверхности Земли отрезки длиной Δ и для лучей с дальностью D_i , попадающих в k -й отрезок, рассчитаем средние значения $\theta_k, \beta_k, h_k, D_k$, а также среднеквадратические отклонения σ от этих средних. Изменение параметра рассеяния до совпадения рассчитанных и измеренных σ_β позволяет определить γ для конкретных условий.

Согласно рисунку 1,а траектория радиоволн состоит из трёх участков: 1) прямая между передатчиком и нижней границей отражающего слоя (участок D_1); 2) искривлённая траектория в отражающем слое (D_2); 3) прямая между нижней границей слоя и приёмником (D_3).

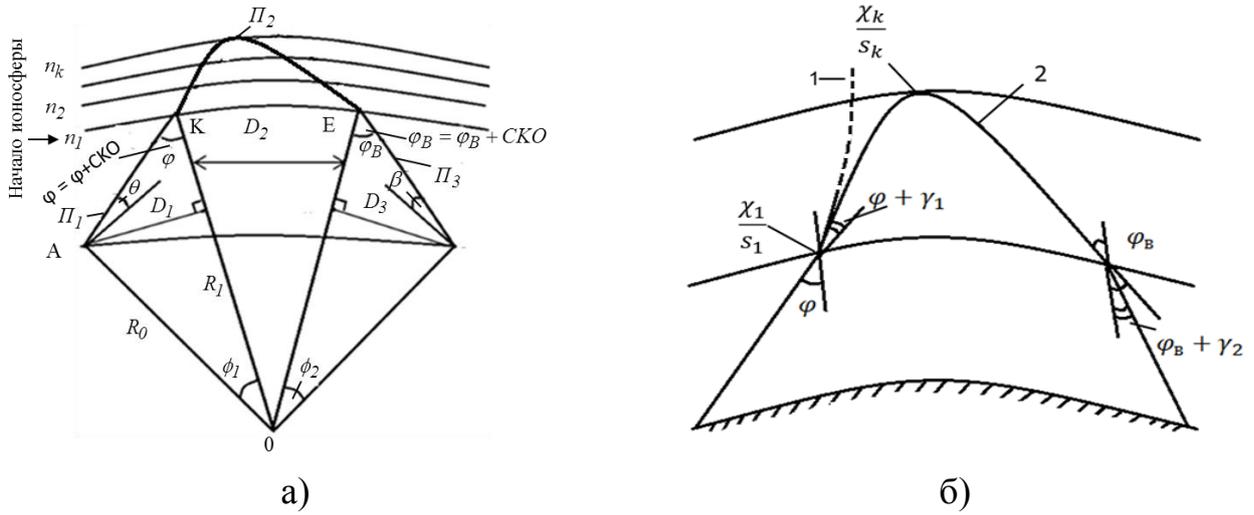


Рисунок 1 – Построение траектории радиоволны в соответствии с модифицированным законом Снеллиуса (а) и метод учета рассеяния радиоволн в ионосфере (б): 1 – преломлённый луч; 2 – отражённый луч

Длина участка траектории радиоволн от передатчика до нижней границы ионосферы рассчитывается по формуле:

$$D_1 = R_E \cdot \cos \left[\theta + \arcsin R_E \cdot \left(\frac{\cos(\theta)}{R_E + h_0} \right) \right],$$

где θ, h_0 – угол излучения ДКВ и высота отражающего слоя.

Алгоритм построения траекторий ДКВ в ионизированной среде ионосферы просто реализуется при отсутствии изменений плотности электронов в направлении вдоль радиолинии (горизонтальном направлении z). В этом случае использовался алгоритм пошагового расчёта траекторий ДКВ по закону Снеллиуса (1), основанный на аппроксимации участков траекторий отрезками прямых одинаковой длины ΔS , направленных в соответствии с показателями преломления n_{k-1} и центральными углами φ_{k-1} в начало этих участков. Затем направления этих прямых меняются в соответствии со значениями n_k, R_k в конце этих участков. Значение показателя преломления $n_k(h)$ можно рассчитать по формулам (4), (5) при использовании параболической модели ионосферы:

$$dh = \Delta S \cdot \cos(\varphi_{k-1}), \quad (2)$$

$$h_k = h_{k-1} + dh, \quad (3)$$

$$f_{OF2}(h_k) = f_m \cdot \sqrt{\left| 1 - \left(\frac{h_k - h_m}{y_m} \right)^2 \right|}, \quad (4)$$

$$n_k = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{OF2}}{f} \right)^2}, \quad (5)$$

где f_{OF2} – плазменная частота на высоте h_k .

Подставляя значение n_k из (5) в (1), находится значение φ_k :

$$\varphi_k = \sin(\varphi_{k-1}) \cdot \frac{R_{k-1} \cdot n_{k-1}}{R_k \cdot n_k}. \quad (6)$$

Через каждый шаг по траектории ΔS дальность распространения радиоволн увеличивается на значение $dx = \Delta S \cdot \sin(\varphi_k)$ (рисунок 2) и общая дальность рас-

пространения радиоволн в ионизированной среде D_2 равна $D_2 = D_2 + \Delta S \cdot \sin(\varphi_k)$. Углы входа радиоволн в ионосферу φ и их выхода из ионосферы φ_B испытывают случайные возмущения и становятся равными; $\varphi = \varphi + \gamma_1$; $\varphi_B = \varphi_B + \gamma_2$ (рисунок 1, б). При этом отмечено, что лучи с углами:

$$\varphi_B > \arcsin\left(\frac{R_E}{R_E + h_0}\right) \quad (7)$$

исключены из дальнейших расчётов, так как проходят над сферической поверхностью. Отражение радиоволны от ионосферы произойдёт на высоте h_{omp} при $\varphi_{omp} = 90^\circ$.

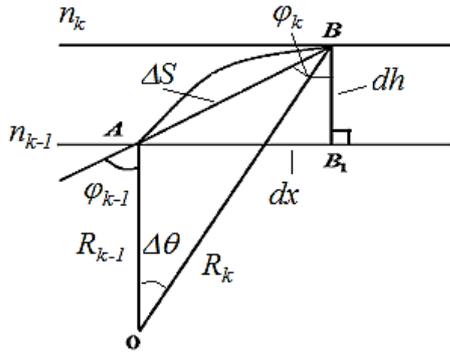


Рисунок 2 – Расчет угла преломления в ионосфере через каждый шаг движения радиоволн

После отражения от отражающего слоя радиоволна движется вниз к Земле и, когда она опускается до высоты, меньшей высоты начала слоя, радиоволна входит в среду без ионизации.

Длина нисходящей траектории радиоволн от нижней границы отражающего слоя до приёмника рассчитана по формуле:

$$D_3 = R_E \cdot \cos \left[\varphi_B + \arccos \left[\sin(\varphi_B) \cdot \left(\frac{R_E + h_0}{R_E} \right) \right] \right].$$

Общая длина траектории радиоволн равна

$$D = D_1 + D_2 + D_3. \quad (8)$$

Подраздел 2.3 посвящен обоснованию выбора длины шага приращения ΔS . Эта задача решена путем сравнения результатов, полученных с помощью разработанного метода, и рассчитанных методом [3*]. В качестве известного решения используется интеграл для зависимостей дальностей ионосферных участков радиолинии от начальных углов падения на отражающий ДКВ горизонтально-однородный слой с радиусом основания R_0 , радиусом отражения R_{omp} , радиусом Земли R_E [3*]:

$$D_i = 2 \cdot R_E \cdot \int_{R_0}^{R_{omp}} \frac{R_0 \cdot \sin(\varphi_0) \cdot dR}{R \cdot \sqrt{n^2 \cdot R^2 - R_0^2 \cdot \sin^2(\varphi_0)}}. \quad (9)$$

В результате сопоставления результатов расчета характеристик ДКВ по разработанному методу и по методу [3*] (таблица 1) обоснован выбор шага по траектории для расчетов по разработанному методу. Из таблицы 1 видно, что шаг вдоль траектории $\Delta S = 1$ км обеспечивает необходимую точность расчёта дальностей распространения ДКВ, а дальнейшее уменьшение этого шага практически не повышает точность расчётов. При шаге $\Delta S = 10$ км ошибки расчёта дальностей распространения ДКВ существенно возрастают.

Таблица 1 – Сопоставление дальностей траекторий ДКВ, рассчитанных известным и разработанным методом, в зависимости от углов излучения θ (градусы) для различных шагов приращения вдоль траекторий ΔS

Метод [3*]		$\Delta S = 0.1$ км		$\Delta S = 1$ км		$\Delta S = 10$ км	
θ	Da	D	D-Da	D	D-Da	D	D-Da
2	3048	3045	3	3052	4	2606	442
4	2693	2689	4	2692	1	2888	195
6	2400	2396	4	2398	2	2430	30
8	2163	2160	3	2170	7	2194	31
10	1976	1974	2	1985	9	2080	104
12	1831	1830	1	1838	7	1855	24
14	1725	1724	1	1729	4	1763	38
16	1657	1655	2	1660	3	1695	38
18	1634	1631	3	1635	1	1678	44
20	1703	1693	10	1696	7	1754	51
21	1881	1848	33	1850	31	1878	3

Две последние строки таблицы 1 соответствуют, так называемым, верхним лучам, отражённым от слоя $F2$ ионосферы, дальности которых гораздо сильнее зависят от углов излучения по сравнению с дальностями распространения нижних лучей, что объясняет рост ошибок расчёта дальностей для верхних лучей.

В подразделе 2.4 дано описание программы, по которой рассчитываются траектории ДКВ без учета изменения электронной плотности вдоль трассы.

В подразделе 2.5 приведены результаты расчета дистанционно-угловых характеристик декаметровых радиоволн для модели однослойной ионосферы в горизонтально-однородной рассеивающей ионосфере (рисунок 3). Сделан вывод о том, что влияние случайных неоднородностей на угловые характеристики ДКВ увеличивает средние углы приёма ДКВ и уменьшает средние углы излучения для дальностей больше 2000 км.

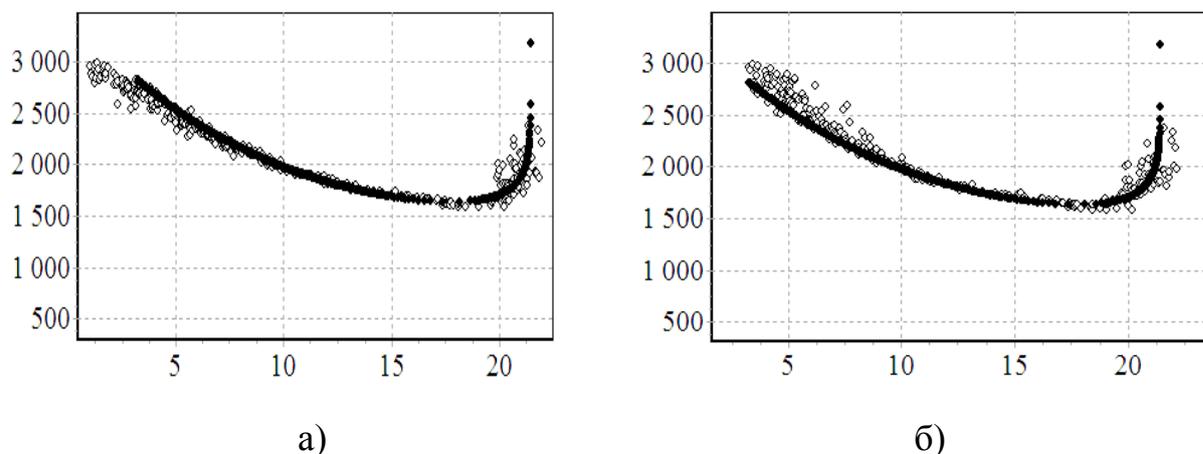


Рисунок 3 – Рассчитанные известным методом зависимости дальности распространения от углов излучения (а) и приёма (б), где (●) – без возмущения; (○) – с возмущением $SKO = 1^\circ$

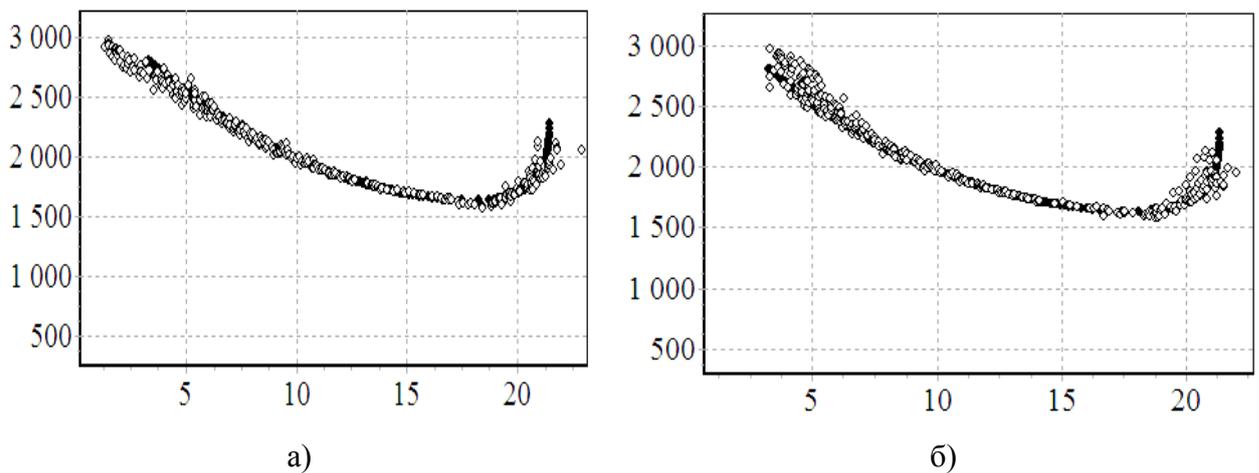


Рисунок 4 – Рассчитанные разработанным методом зависимости дальности от углов излучения (а) и приёма (б), где (●) – без возмущения; (○) – с возмущением при $СКО = 1^\circ$

Рисунок 3 (а и б) показывает, что рассеяние ДКВ в ионосфере увеличивает средние углы приёма и уменьшает средние углы излучения для дальностей, превышающих 2200 км. Такой же эффект, согласно рисунку 4 (а и б), наблюдается при расчётах разработанным методом.

В подразделе 2.6 приведен результат расчёта дистанционно-угловых характеристик ДКВ для модели трёхслойной ионосферы.

Заключение к разделу 2: делается вывод о том, что ошибки расчёта углов излучения и приёма радиоволн разработанным методом практически не превышают 0.1° с выбранным шагом расчёта, равным 1 км. Такая точность вполне достаточна для прогнозов характеристик распространения ДКВ и решения практических задач, в том числе, для решения задач оптимизации диаграмм направленности (ДН) приёмо-передающих антенн.

В разделе 3 приведены описания алгоритмов и программной реализации для прогнозирования угловых характеристик ДКВ в горизонтально-неоднородной трёхслойной рассеивающей ионосфере.

В подразделе 3.1 Приведён анализ влияния рассеяния мелкими и крупными неоднородностями электронной концентрации на угловые характеристики распространения ДКВ.

В подразделе 3.2 дано описание модели трёхслойной ионосферы. Приведены математические выражения высотной зависимости плазменной частоты слоёв ионосферы $E, F1, F2$ (рисунок 5).

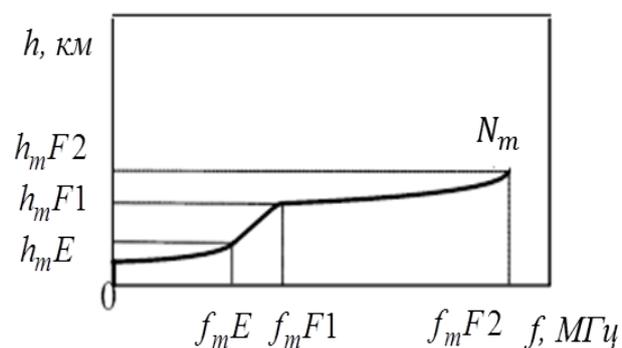


Рисунок 5 – Модель определения плазменных частот для ионосферных слоёв $E, F1, F2$

Модель трёхслойной ионосферы используется для того, чтобы установить высотную зависимость плазменной частоты $f_{\text{плаз}}(h)$ слоёв $E, F1, F2$ ионосферы. Согласно этой модели, в слоях E и

F2 плазменная частота нелинейно зависит от высоты, а в слое *F1* – линейно. Ниже представлены аналитические формулы модели трёхслойной ионосферы.

$$h_{mE} = 110 \text{ км}, \quad (10)$$

$$y_{mE} = 20 \text{ км} \quad (11)$$

$$h_{mF1}(h) = h_{mF2} \cdot \left(1 - 0,3 \cdot \sqrt{1 - 1,5 \cdot \left(\frac{f_{mE}}{f_{mF2}} \right)^2} \right), \quad (12)$$

$$y_{mF2} = h_{mF2} - h_{mF1}, \quad (13)$$

при $90 < h < 110$ км (слой *E*):

$$f_{\text{плаз}}(h) = f_{mE} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h - h_{mE}}{y_{mE}} \right)^2}; \quad (14)$$

при $110 \leq h \leq h_{mF1}$ (слой *F1*):

$$f_{\text{плаз}}(h) = f_{mE} \cdot (h \cdot 0,225 + h_{mF1} - 1,225 \cdot h_{mE}) / (h_{mF1} - h_{mE}); \quad (15)$$

при $h_{mF1} \leq h \leq h_{mF2}$ (слой *F2*):

$$f_{\text{плаз}}(h) = f_{mF2} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{h - h_{mF2}}{y_{mF2}} \right)^2}. \quad (16)$$

При учете градиента электронной концентрации в горизонтальном направлении ДКВ, закон Снеллиуса имеет вид интеграла:

$$n_k \cdot R_k \cdot \sin(\varphi_k) - n_{k-1} \cdot R_{k-1} \cdot \sin(\varphi_{k-1}) = - \int_{S(R_{k-1})}^{S(R_k)} \frac{\partial n}{\partial \theta} \cdot dS, \quad (17)$$

где $\frac{\partial n}{\partial \theta}$ – градиент коэффициента преломления; dS – элемент траектории.

Правая часть уравнения (17) рассчитывается приближено по формуле:

$$\int_{S(R_{k-1})}^{S(R_k)} \frac{\partial n}{\partial \theta} \cdot dS \approx \frac{\partial n}{\partial \theta} \cdot (S(R_k) - S(R_{k-1})) = \frac{\partial n}{\partial \theta} \cdot \Delta S, \quad (18)$$

где $\Delta S = S(R_k) - S(R_{k-1})$ – шаг расчета по траектории.

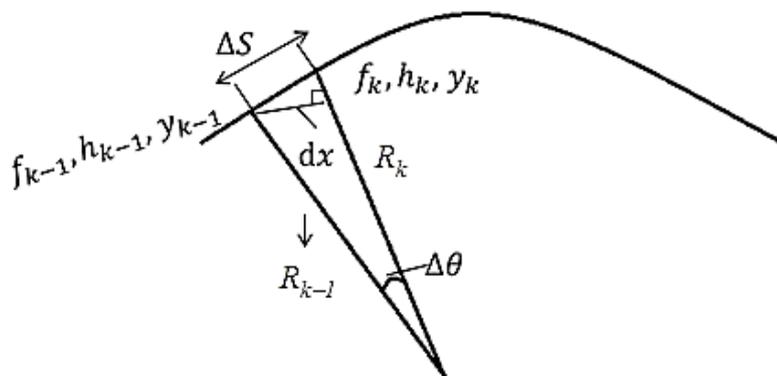


Рисунок 6 – Расчет градиента коэффициента преломления через каждый шаг движения радиоволн

С малым значением приращения центрального угла $\Delta\theta$ (рисунок 6) справедливо приближенное выражение:

$$\Delta\theta \approx \text{Sin}(\Delta\theta) = \frac{dx}{R_{k-1}}, \quad (19)$$

где dx – приращение дальности по одному шагу движения радиоволн в ионосфере, R_{k-1} – радиус между центром Земли и начальной точкой k -го шага движения радиоволн.

Для определения значения коэффициента преломления мы используем формулу:

$$n = \sqrt{1 - \left(\frac{f_{\text{плаз}}}{f}\right)^2}, \quad (20)$$

где f , $f_{\text{плаз}}$ – рабочая и плазменная частота соответственно.

Используя трехслойную модель ионосферы и формулу (20), значение коэффициента преломления можно рассчитать через значения критической частоты, высоты максимума, полутолщины слоя и высоты текущей точки:

$$\text{в слое E:} \quad n(h) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_m E}{f}\right)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{h - h_m E}{y_m E}\right)^2\right], \quad (21)$$

$$\text{в слое F1:} \quad n(h) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_m E}{f}\right)^2} \cdot \left(\frac{h \cdot 0.225 + h_m F1 - 1.225 \cdot h_m E}{h_m F1 - h_m E}\right)^2, \quad (22)$$

$$\text{в слое F2:} \quad n(h) = \sqrt{1 - \left(\frac{f_m F2}{f}\right)^2} \cdot \left[1 - \left(\frac{h - h_m F2}{y_m F2}\right)^2\right]. \quad (23)$$

С малым значением $\partial\theta$ и с учетом формулы (19), градиент коэффициента преломления можно рассчитать по формуле:

$$\frac{\partial n}{\partial \theta} \approx \frac{\Delta n}{\Delta \theta} = \frac{R_{k-1} \cdot [n(h_k) - n(h_{k-1})]}{dx}, \quad (24)$$

где $n(h_{k-1})$ и $n(h_k)$ – значения коэффициента преломления в начале и конце k -го шага движения радиоволн, соответствующие высотам h_{k-1} и h_k .

При расчете полагается, что критические частоты, высоты максимума и полутолщины слоёв ионосферы изменяются линейно от места передатчика до места приёма. Через каждый шаг движения радиоволн ΔS рассчитаны значения критических частот, высот максимума, и полутолщин слоёв $E, F1, F2$ по формулам:

$$f_m(x) = f_m(1) + \frac{x(f_m(2) - f_m(1))}{D}, \quad (25)$$

$$h_m(x) = h_m(1) + \frac{x(h_m(2) - h_m(1))}{D}, \quad (26)$$

$$y_m(x) = y_m(1) + \frac{x(y_m(2) - y_m(1))}{D}, \quad (27)$$

где $f_m(1)$, $h_m(1)$, $y_m(1)$ – критическая частота, высота максимума электронной концентрации и полутолщина слоя в пункте передачи; $f_m(2)$, $h_m(2)$, $y_m(2)$ – критическая частота, высота максимума и полутолщина слоя в пункте приёма; $f_m(x)$, $h_m(x)$, $y_m(x)$ – критическая частота, высота максимума и полутолщина в рассмотренной точке, x – расстояние от пункта передачи до рассмотренной точки.

На каждом шаге движения радиоволн рассчитываются значения критических частот ионосферных слоев E и $F2$ ($f_m E$, $f_m F2$) и высота максимума слоя $F2$ ($h_m F2$) и в конце каждого шага движения находится градиент коэффициента преломления $\partial n / \partial \theta$ по формуле (24).

Используя закон Снеллиуса вида (17), мы можем определить угол падения для следующего шага движения радиоволн:

$$\sin(\varphi_k) = \frac{n_{k-1} \cdot R_{k-1} \cdot \sin(\varphi_{k-1}) - \frac{\partial n}{\partial \theta} \cdot \Delta S}{n_k R_k}.$$

Отражение от ионосферы произойдет на высоте h_{omp} при $\varphi_{omp} = 90^\circ$.

Расчеты длин участков траекторий радиоволн в неионизированной среде и метод генерации случайных возмущений ионосферы такие же, как для среды однородной ионосферы, представлены в разделе 2.

В подразделе 3.3 дано описание программы расчётов углов прихода ДКВ и дано описание блок-схемы алгоритма расчета. В программе предусмотрены два режима расчета. Первый режим – это прогнозирование суточной вариации углов прихода мода ДКВ в пункт приёма. Второй режим – это прогнозирование углов излучения и приёма всех мод ДКВ, принятых в заданной области в заданное конкретное время. На рисунке 7 дается блок-схема алгоритма расчета углов прихода в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере.

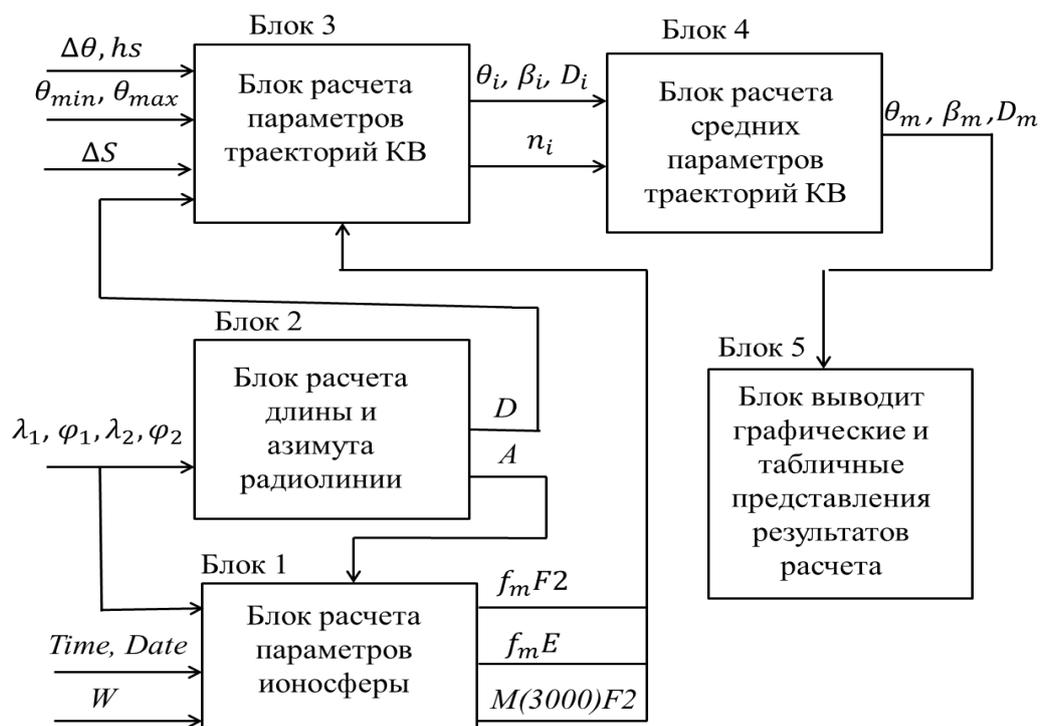


Рисунок 7 – Блок-схема программы

В качестве входных данных используются: дата D , время T , число Вольфа W , географические координаты передатчика λ_1, φ_1 и приёмника λ_2, φ_2 , коэффициент рассеяния S , минимальный и максимальный углы излучения $\theta_{min}, \theta_{max}$, шаг по углу $\Delta\theta$ (град), шаг по траектории dS (км). По входным данным в блоке 1 определяются параметры ионосферы ($f_0E, f_0F2, M(3000)F2$) вблизи передатчика и приёмника с использованием табличных параметров вертикального зондирования ионосферы, измеренных в дни и часы проведения экспериментов. Далее, определяются значения высот максимума в пунктах передачи и приёма по формуле, разработанной в работе [1*]:

$$h_m F2 = \frac{1490}{\sqrt{M(3000)^2 - 1}} - 176. \quad (28)$$

Выходные данные из блока 1 – это $f_0E(1), f_0F2(1), h_mF2(1)$ и $f_0E(2), f_0F2(2), h_mF2(2)$, соответственно, критические частоты слоя $E, F2$ и высота максимума электронной концентрации слоя $F2$ над пунктом передачи (обозначение цифрой 1 в скобках) и приёма (обозначение цифрой 2 в скобках).

В блоке 2 рассчитываются длина трассы и азимут радиолинии по заданным географическим координатам места передачи и приёма. Формулы расчета длины трассы D представлены ниже:

$$D = \theta_G \cdot R_E, \quad (29)$$

где центральный угол θ_G между приёмным и передающим пунктами рассчитывается по формуле:

$$\theta_G = \frac{\pi}{2} - \arctg\left(\frac{G}{\sqrt{1 - G^2}}\right), \quad (30)$$

$$G = \sin(\varphi_1) \cdot \sin(\varphi_2) + \cos(\varphi_1) \cdot \cos(\varphi_2) \cdot \cos(\lambda_2 - \lambda_1), \quad (31)$$

где $\varphi_1, \lambda_1; \varphi_2, \lambda_2$ – широта и долгота пункта передачи и приёма (в градусах).

Расчет азимута радиолинии:

$$\cos(A) = \frac{\sin(\varphi_2) - \cos(\theta_G) \cdot \sin(\varphi_1)}{\cos(\varphi_1) \cdot \sin(\theta_G)}; \quad (32)$$

$$\sin(A) = \frac{\cos(\varphi_2) \cdot \sin(\lambda_2 - \lambda_1)}{\sin(\theta_G)}. \quad (33)$$

Выходные данные из блока 2 – это длина трассы и азимут радиолинии.

В блоке 3 реализуются расчеты углов излучения и приёма ДКВ для каждого значения угла излучения по методу и алгоритму, представленным в подразделе 3.2 и разделе 2. Значения угла излучения изменяются от θ_{min} до θ_{max} с шагом $\Delta\theta$. Выходные данные из блока 3 – это массив данных углов излучения и приёма радиоволн, полученных в пункте приёма.

В блоке 4 рассчитаны средние значения углов излучения и приёма (n-числа попаданий):

$$\theta_{cp} = \frac{\sum_{k=1}^n \theta_k}{n}, \quad (34)$$

$$\beta_{\text{ср}} = \frac{\sum_{k=1}^n \beta_k}{n}. \quad (35)$$

В блоке 5 выполняется функция вывода данных расчетов. Результаты расчётов представлены в виде графиков и таблицы и их можно сохранить в текстовом документе или выводить на печать.

В подразделе 3.4 представлены описания интерфейса программы и режимов её работы. На рисунке 8 показан интерфейс программы.

В качестве входных данных используются: дата, время T , среднее число Вольфа W , соответствующее заданной дате, географические координаты передатчика и приёмника $\lambda_1, \varphi_1, \lambda_2, \varphi_2$, интенсивность рассеяния S (в градусах), минимальный и максимальный угол излучения $\theta_{\min}, \theta_{\max}$, шаг по углу $\Delta\theta$ (градус), шаг по траектории ΔS (км).

На рисунках 9 и 10 представлены выходные результаты прогнозирования углов прихода и излучения ДКВ в виде графиков и таблицы.

Для режима прогнозирования углов прихода ДКВ в пункте приёма в заданном интервале времени в дополнение к исходным данным, перечисленным выше, задаются еще следующие входные данные: название прогнозируемого мода, дата, начальное и конечное время $T1, T2$ (часы: минуты: секунды), в течение которых проводится прогнозирование.

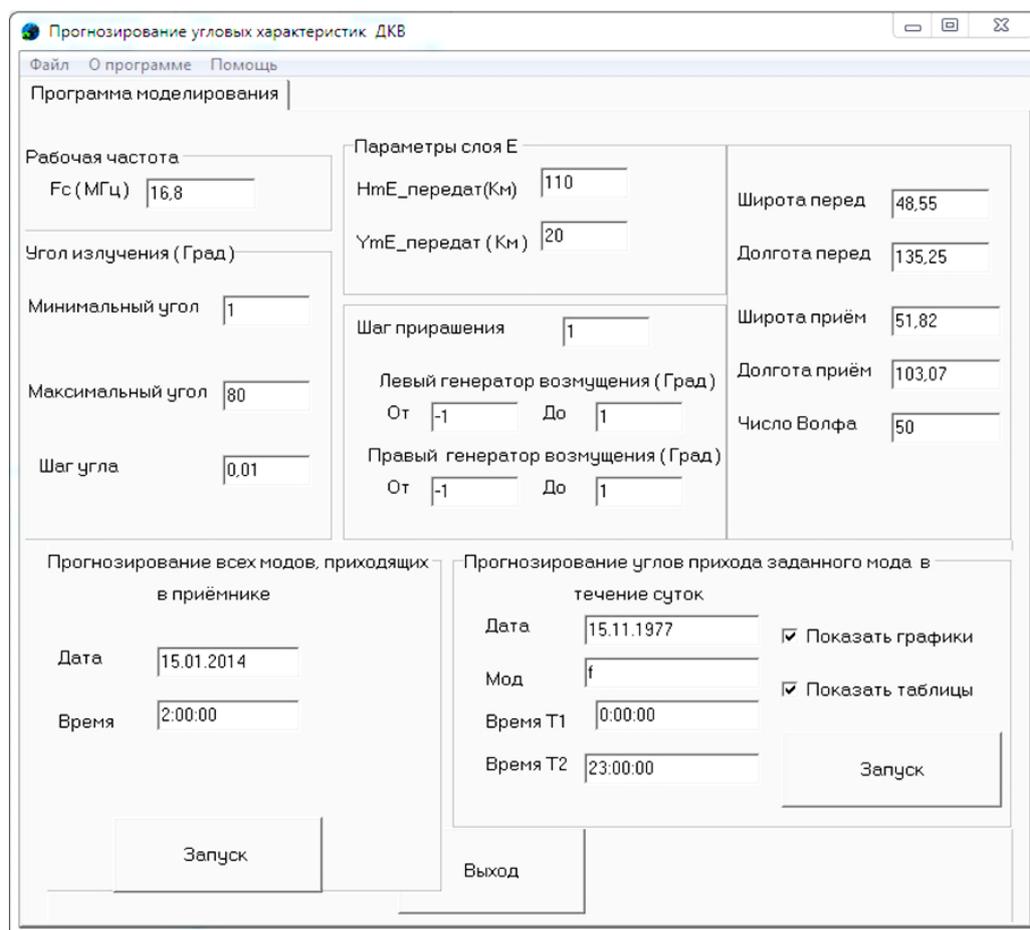


Рисунок 8 – Интерфейс программы прогнозирования углов прихода ДКВ

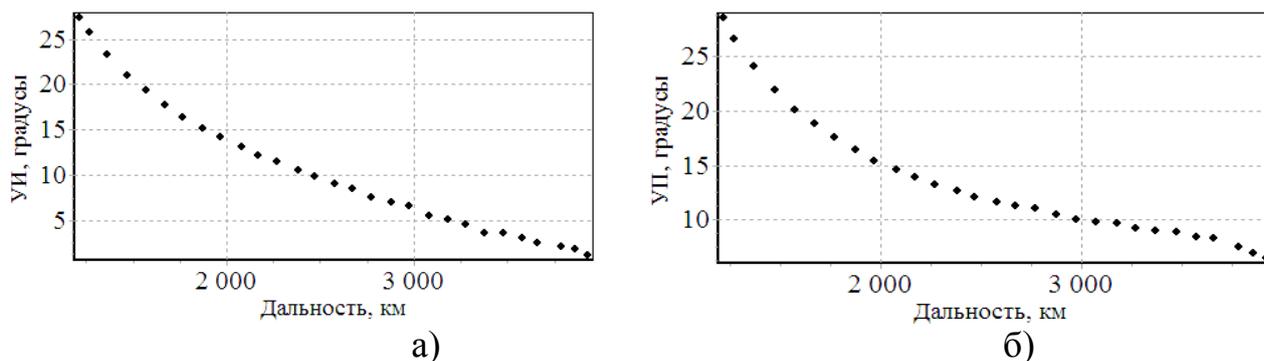


Рисунок 9 – Графики зависимости углов излучения(а) и прихода мода 1F2 от дальности (б)

После запуска программы автоматически получаются результаты прогнозирования углов прихода и излучения ДКВ в заданном интервале времени.

Результаты расчёта линии ДКВ связи	
Исходные данные:	
Координаты передатчика:	
Широта (град):	49,9
Долгота (град):	135,2
Координаты приёмника:	
Широта (град):	35
Долгота (град):	30
Дата:	24.05.2014
Время:	23:37:56
Рабочая частота (МГц):	12
Число Вольфа:	100
Высота рассеивания (км):	90
Параметр рассеивания (град):	1
Мин. угол излучения (град):	1
Макс. угол излучения (град):	80
Шаг по углу (град):	100
Результата расчётов:	
Параметры ионосферы:	
Длина трассы:	8 062,40

Рисунок 10 – Фрагмент результатов расчета

В заключении к разделу 3 делается вывод о том, что разработанная программа позволяет выполнять прогнозирование углов прихода ДКВ в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере.

Раздел 4 посвящен анализу возможностей применения разработанной программы на практике. Приведены сопоставления результатов измерений углов прихода ДКВ по трассе Хабаровск – Иркутск, Кипр – Ростов-на-Дону, Москва – Ростов-на-Дону, Минск – Ростов-на-Дону с результатами расчетов по разработанной программе, а также приведены примеры применения результатов прогноза угловых характеристик для оптимизации диаграмм приёмо-передающих антенн применительно к углам излучения и прихода ДКВ.

В подразделе 4.1 проведена оценка точности расчетов разработанного метода. Дана интерпретация результатов измерений углов прихода ДКВ по трассе Хабаровск – Иркутск.

Для реализации прогнозов углов прихода радиоволн вводятся следующие

исходные данные: географические координаты передатчика (Хабаровск) и приёмника (Иркутск), время проведения прогнозирования с 8 ч. до 16 ч. по местному времени в середине трассы Хабаровск – Иркутск, число Вольфа $W=50$, рабочая частота – 16.8 МГц, минимальный и максимальный углы излучения $\theta_{min}=1^\circ$, $\theta_{max}=80^\circ$, шаг углов $\Delta\theta = 0.01^\circ$, параметр интенсивности рассеяния $S = 1^0$, шаг по траектории $dS = 1$ км, прогнозируемый мод – 1F2.

С целью сопоставления в одной и той же системе координат построены еще и результаты расчётов углов прихода радиоволн по трассе Хабаровск –Иркутск, полученные по известному методу [4*], основанному на теореме эквивалентности между вертикальным и наклонным отражением радиоволн в ионосфере. Результаты измерений и расчета представлены на рисунке 11 а-е.

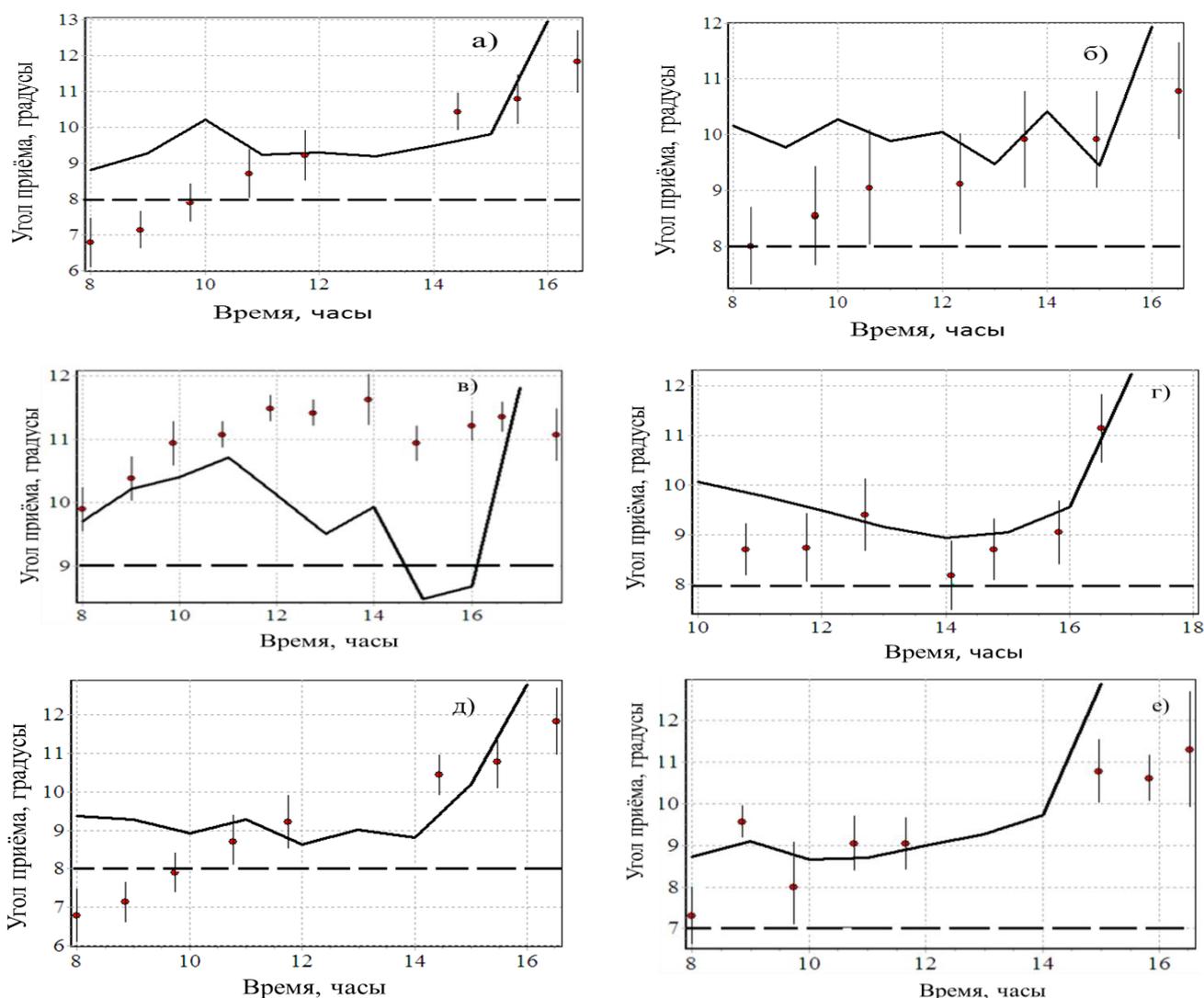


Рисунок 11 – Рассчитанные методом [4*] (штриховые кривые), разработанным методом (сплошные кривые) и результаты измерений (точечные кривые) зависимости угла прихода ДКВ от местного времени в середине трассы Хабаровск–Иркутск в январе (а), феврале (б), марте (в), октябре(г), ноябре (д), декабре (е)

Видно, что углы прихода радиоволн практически монотонно растут от утра к вечеру. Такие изменения объясняют регулярным (прогнозируемым) возраста-

нием плотности электронов с запада на восток утром и обратным изменением – вечером и влиянием случайных неоднородностей структуры ионосферы. При сравнении результатов измерений с результатами расчётов показано, что результаты прогнозирования углов прихода радиоволн, полученные по разработанному методу (сплошные кривые), лучше согласуются с результатами измерений, чем результаты, полученные по методу [4*].

В подразделе 4.2 приведены примеры использования программы для прогнозирования углов прихода ДКВ, распространяющихся между пунктами: Кипр – Ростов-на-Дону, Москва – Ростов-на-Дону, Минск – Ростов-на-Дону, Новосибирск – Москва, Уфа – Иркутск, Чита – Санкт-Петербург.

Для трассы Москва – Ростов-на-Дону приведены результаты расчета при рабочих частотах 4.996 МГц, 9.996 МГц, 14.996 МГц. На рисунке 12 представлены результаты расчета и измерений для частоты 4.996 МГц. Для прогнозирования заданы географические координаты Москвы и Ростова-на-Дону, дата; среднее число Вольфа W в ноябре и декабре 2014 г. получено из данных центра NASA.

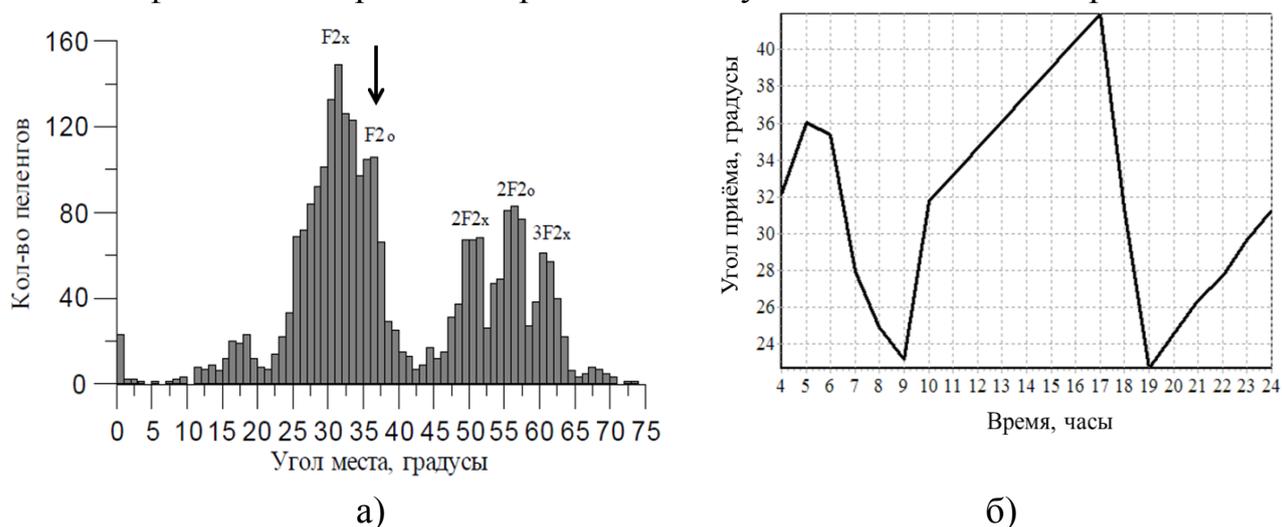


Рисунок 12 – Распределение углов прихода ДКВ на трассе Москва – Ростов-на-Дону, 23.11.2013, 5:00 мск – 6:00 мск, частота – 4.996 МГц (а) [5*] и суточная вариация углов прихода ДКВ на трассе Москва – Ростов-на-Дону в 23.11.2013 (б) по расчёту разработанным методом расчета

Из рисунка 12, б видно, что углы прихода ДКВ по расчету изменялись в течение суток в диапазоне от 22° до 42° . В частности, в интервале времени с 5:00 до 6:00 мск среднее значение углов прихода ДКВ равно 35° . Эти результаты прогнозирования согласуются с результатами измерений мода $F2_o$ – обыкновенная компонента мода $1F2$, что показано на рисунке 12, а (вертикальной стрелкой).

Заметим, что не наблюдался мод $2F2$ по прогнозированию с 05 до 06 ч для рабочей частоты 4.996 МГц, хотя по результатам эксперимента (рисунок 12, а) это мод наблюдался. Для обоснования этого факта проводился расчет значения максимальной применимой частоты мода $2F2$ ($MUF(2F2)$) для трассы Москва – Ростов-на-Дону по методу равных скачков [1*]. В результате расчета получено значение $MUF(2F2)$ с 5:00 мск до 6:00 мск $MUF(2F2)$, равное 3.95 МГц. По этим результатам расчета $MUF(2F2)$ следует, что теоретически при рабочей частоте 4.996 МГц невозможно наблюдать мод $2F2$ в интервале с 5 до 6 ч. Несмотря на это, на прак-

тике прохождения радиоволн с $f > MUF2F2$ возможно (как показано по результатам эксперимента на рисунке 12, а из-за влияния случайных неоднородностей ионосферы двух различных типов: 1) мелкомасштабных (характерный размер < 1 км) неоднородностей N , расположенных ниже отражающего радиоволны слоя, и крупномасштабных (размер > 100 км) неоднородностей, к которым можно отнести, так называемые, перемещающиеся возмущения ионосферы (ПИВ) [6*]. Благодаря этим неоднородностям, при рабочей частоте $f > MUF2F2$ можно наблюдать мод $2F2$ на пункте приёма.

В подразделе 4.2 дан пример прогнозирования временной зависимости углов излучения и прихода мода $1F2$ для трассы длиной 2300 км, а также результаты прогнозирования дистанционно-угловых характеристик всех модов распространения ДКВ по трассе длиной 8100 км.

В подразделе дано описание методики оптимизации работы приёмопередающих антенн и пример решения задачи оптимизации диаграммы направленности ромбической антенны для трассы Хабаровск – Иркутск.

Для проектирования приёмопередающих антенн рекомендуем выполняться следующие этапы:

1. Прогнозирование углов излучения и приёма ДКВ.
2. Выбор типа антенны декаметрового диапазона. Проводится проектирование антенны в соответствии с прогнозируемым углом прихода радиоволн и с оптимальной рабочей частотой.

Предполагается, что требуется проектировать антенны для системы ДКВ радиосвязи по трассе Хабаровск – Иркутск с рабочей частотой 16.8 МГц. Для решения этой задачи сначала по результатам прогнозирования средних углов прихода радиоволн в пункте приёма за 12 месяцев (таблица 2) найден средний угол приёма радиоволн в год.

Таблица 2 – Средние углы прихода ДКВ для трассы Хабаровск – Иркутск, рассчитанные разработанным методом (β_2) и известным методом [4*] (β_1)

Месяцы	январь	февраль	март	апрель	май	июнь
β_2 (град.)	10.2	10	10.5	11	13.7	13.2
β_1 (град.)	8	9	9	9	10	10
Месяцы	июль	август	сентябрь	октябрь	ноябрь	декабрь
β_2 (град.)	13.2	12.7	11.3	9.7	9.4	9.0
β_1 (град.)	9	9	9	8	8.4	7.2

Из таблицы 2 найдено среднее значение угла приёма радиоволн для трассы (β_2) Хабаровск – Иркутск за год, который равен 11.2° . По этому среднему прогнозируемому углу прихода радиоволн, из справочника [7*], выбирается ромбическая антенна РГ(65/4)×1 с максимумом главного лепестка ДН, который соответствует прогнозируемому углу прихода ДКВ. Из рисунка 13 видно, что задача синтеза оптимизированной приёмопередающей антенны для трассы Хабаровск–

Иркутск успешно решена, так как область максимума главного лепестка ДН даёт прогнозируемый угол прихода 11.2° .

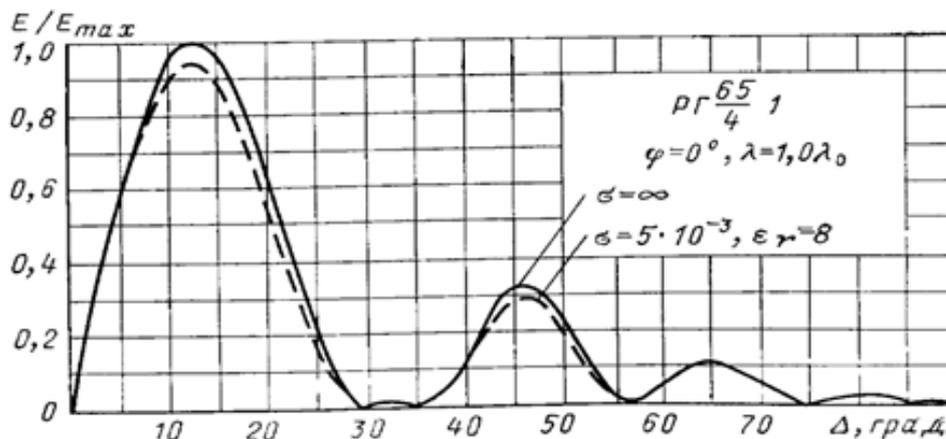


Рисунок 13 – Диаграмма направленности в вертикальной плоскости антенны $PG(65/4) \times 1$

В таблице 2 приведен известный угол приема β_1 , взятый из [4*]. Ему (β_1) соответствует приемная антенна $PG(70/6) \times 1.25$, отличающаяся большим размером. Из таблицы 2 видно, что количественное различие в углах не оптимизированной и оптимизированной антенн составляет до 46% ($13.2/9 \approx 1.46$).

В заключении к разделу 4 изложены выводы о возможности применения разработанной программы при решении практических задач, в том числе, при проектировании приёмно-передающих антенн, проектировании и эксплуатации системы радиосвязи и радиолокации.

В заключении перечислены основные результаты диссертационной работы:

1. Разработаны метод и алгоритм прогнозирования углов прихода ДКВ на основе применения модифицированного закона Снеллиуса с учетом влияния на характеристики распространения радиоволн горизонтального градиента электронной концентрации ионосферы вдоль трассы и случайных возмущений ионосферы в рамках принятой модели.

2. Показано, что метод построения траекторий ДКВ на основе применения модифицированного закона Снеллиуса с шагом расчета, равным 1 км, даёт результаты расчета угловых характеристик ДКВ с погрешностью не больше 0.1° .

3. Проведенные вычисления в рамках используемой модели случайных возмущений показывают, что на трассах длиной больше 2000 км влияние таких неоднородностей может увеличивать средние углы приема по сравнению со средними углами излучения.

4. Получены аналитические выражения для расчетов градиента коэффициента преломления в неоднородной ионосфере для модели трёхслойной ионосферы, на основе которых возможно построение траекторий декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере.

5. Разработано программное обеспечение, которое позволяет оперативно прогнозировать углы прихода ДКВ с достаточной для решения практических задач точностью.

6. Разработана методика оптимизации диаграмм направленности приёмо-передающих антенн, заключающаяся в выборе направления главного лепестка, учитывающая расчеты углов прихода ДКВ в вертикальной плоскости (количественное различие в углах места направления главного лепестка, рассчитанных известным методом и разработанным нами методом составляет до 46%).

7. В результате прогнозирования углов прихода ДКВ показано, что хорошая точность прогноза достигается на трассе длиной 931 км, при этом погрешность составляет менее 1° , а на трассе длиной 2300 км погрешность увеличивается до 2° , оставаясь, тем не менее, значительно лучше, чем точность, обеспечиваемая известными методами, которые не учитывают горизонтальные градиенты концентрации электронов.

8. Создан метод исследования ионосферного распространения радиоволн, который обеспечивает учёт горизонтальных градиентов критической частоты и высоты отражающего слоя, а также эффектов рассеяния радиоволн.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

В изданиях из перечня ВАК РФ:

1. Агарышев, А.И. Применение закона Снеллиуса для расчета траекторий радиоволн в регулярной рассеивающей ионосфере / А.И. Агарышев, **Нгуен Минь Жанг** // Вестник ИрГТУ. – 2013. – № 4. – С. 131–136.

2. **Нгуен Минь Жанг**. Прогноз угловых характеристик декаметровых радиоволн в неоднородной рассеивающей ионосфере / Нгуен Минь Жанг // Вестник ИрГТУ. – 2014. – № 11. – С. 217 – 221.

3. Агарышев, А.И. Метод расчета углов прихода декаметровых радиоволн в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере / А.И. Агарышев, **Жанг Н.М** // Известия ВУЗов. Физика. – 2016. – № 12/3 – С. 38 – 41.

4. Прогнозирование характеристик декаметровых радиоволн на неоднородной рассеивающей ионосфере / А.И. Агарышев, **Нгуен Минь Жанг**. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ №2015610215, заявка № 2014661368 от 10 ноября 2014 г., дата гос. регистрации в Реестре программ 12 января 2015 г.

В научных рецензируемых изданиях и сборниках трудов:

5. **Нгуен Минь Жанг**. Расчёт углов прихода декаметровых радиоволн на основе применения закона Снеллиуса / Нгуен Минь Жанг, А.И. Агарышев // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: материалы X и XI Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – С. 38 – 42.

6. **Нгуен Минь Жанг**. Программная реализация прогнозов декаметровых радиоволн через горизонтальную неоднородную рассеивающую ионосферу / Нгуен Минь Жанг, А.И. Агарышев // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: материалы XIII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. – С. 4–8.

7. **Нгуен Минь Жанг**. Разработка алгоритма и программы расчетов характеристик распространения декаметровых радиоволн в ионосфере на основе применения закона преломления Снеллиуса / Нгуен Минь Жанг // Современные про-

блемы радиоэлектроники и связи: материалы XII Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2013. – С. 5–13.

8. **Нгуен Минь Жанг.** Программная реализация прогнозов угловых характеристик декаметровых радиоволн в горизонтальной неоднородной рассеивающей ионосфере / Нгуен Минь Жанг, А.И. Агарышев // Распространение радиоволн: сб. докл. XXIV Всерос. науч. конф. (Иркутск, 9 июня–5 июля, 2014 г.): в 4 т.; под ред. Д.С. Лукина [и др.]. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН. – 2014. – Т. 3. – С. 21–24.

9. **Нгуен Минь Жанг.** Применение разработанной программы расчета для интерпретации результатов измерений углов прихода декаметровых радиоволн / Нгуен Минь Жанг // Современные проблемы радиоэлектроники и связи: материалы XIV Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2016. – С. 156–166.

10. Агарышев, А.И. Метод прогнозирования углов прихода декаметровых радиоволн при их распространении в горизонтально-неоднородной рассеивающей ионосфере / А.И. Агарышев, **Нгуен Минь Жанг** // XXV Всерос. открытая научная конференция «Распространение радиоволн», посвященная 80-летию отечественных ионосферных исследований РРВ-25. – Труды конференции, Томск, 4–9 июля 2016 г. / науч. ред. Г.Г. Матвиенко / Том II. – С. 284–288.

11. **Нгуен Минь Жанг.** Применение разработанной программы для расчета результатов измерений углов прихода коротких радиоволн / Нгуен Минь Жанг, А.И. Агарышев // Материалы XX Всерос. науч.-техн. конф. с международным участием «Современные проблемы радиоэлектроники». Красноярск, 4-5 мая 2017: Изд-во Сиб. федер. ун-та, 2017. – С. 77–82.

Цитируемая литература:

[1*]. Агарышев, А.И. Системы коротковолновой радиосвязи с подавлением многолучевости сигнала: монография / А.И. Агарышев и др. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2009. – 160 с.

[2*]. Сажин, В. И. Гибридное моделирование распространения декаметровых радиоволн: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03 / Сажин Виктор Иванович. – Иркутск, 2001. – 250 с.

[3*]. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере / Пер. с англ. под ред. А.А. Корчака. – М.: Мир, 1973. – 502 с.

[4*]. A simple HF propagation method for MUF and field strength: Document CCIR 6/288. – CCIR XVI-th Plenary Assembly. – Dubrovnik, 1986. – 34 p.

[5*]. Чайка, Е.Г. Использование данных текущей диагностики ионосферы в задаче КВ-пеленгации и однопозиционного место определения / Е.Г. Чайка, Г.Г. Вертоградов // Распространение радиоволн: Сб. докл. XXIV Всерос. науч. конф. (Иркутск, 29 июня – 5 июля, 2014 г.): в 4 Т.; под ред. Д.С. Лукина [и др.]. – Иркутск: ИСЗФ СО РАН, 2014, Т. 2. – С. 41–44.

[6*]. Katamzi, Z.T. Statistical analysis of travelling ionospheric disturbances using TEC observations from geostationary satellites / Z.T. Katamzi, N.D. Smith, C.N. Mitchell et. al. // J. Atmos. Terr. Phys. – 2012. – V. 74. – P. 64–80.

[7*]. Айзенберг, Г.З. Коротковолновые антенны: монография / Г.З. Айзенберг. – М.: Связьиздат, 1962. – 815 с.

Подписано в печать _____._____.2017. Формат 60 х 90 / 16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,75.
Тираж 100 экз. Зак. 134. Поз. плана 9н.

Отпечатано в Издательстве
ФГБОУ ВО «Иркутский национальный
исследовательский технический университет»
664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83