

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

*На правах рукописи*  
УДК 550.388.2+537.874.2

Голикова Елена Владимировна

**Отражение радиосигналов от слоистых  
структур в атмосфере и ионосфере**

Специальность: 25.00.29 — физика атмосферы и гидросферы

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Москва 2008

Работа выполнена на кафедре физики атмосферы физического факультета Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова.

Научный руководитель: доктор физико-математических наук,  
профессор Куницын Вячеслав Евгеньевич

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,  
академик Маслов Виктор Павлович,

доктор физико-математических наук  
Гаврилов Борис Георгиевич

Ведущая организация: Институт земного магнетизма, ионосферы и  
распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова  
Российской Академии Наук

Защита состоится «17» апреля 2008 г. в \_\_\_\_ часов на заседании  
диссертационного совета Д 501.001.63 при Московском государственном  
университете имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, Москва,  
Ленинские горы, дом 1, стр. 2, Физический факультет, аудитория \_\_\_\_.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова.

Автореферат разослан «\_\_» марта 2008 г.

Ученый секретарь  
Диссертационного совета Д 501.001.63  
кандидат физико-математических наук

В.Б. Смирнов

## Общая характеристика работы

**Актуальность темы.** Задача распространения радиоволн в слоистой ионосфере имеет большое значение для расчета радиотрасс и для методов дистанционного зондирования ионосферной плазмы. Основным средством решения данной задачи долгое время были асимптотические методы, основанные на приближении геометрической оптики [1, 2, 3], что позволяло прогнозировать отражение радиоволн для плавно меняющихся профилей электронной концентрации. Однако такой подход к решению данной задачи не применим при наличии тонких слоев, больших градиентов электронной концентрации, недостаточен для интерпретации многих экспериментальных данных, связанных с волновыми явлениями, и т. д.

С ростом современных компьютерных технологий стало возможным использовать эффективные численные методы, позволяющие решать задачи моделирования отражения радиосигналов от слоев, содержащих шум, от тонких спорадических слоев, слоев с разрывами функции плотности электронной концентрации и ее производных. Первые результаты по расчету поля электромагнитной волны получены в работах [4, 5, 6] на основе численного решения краевых задач. Однако в первых работах были проведены расчеты лишь для тонких (несколько длин волн) ионосферных слоев. Численные результаты по отражению радиосигналов и расчету ионограмм для произвольных слоев были впервые получены в работах [7, 8, 9]. Важной проблемой при этом является неустойчивость вычислений.

Ионосферный слой имеет большую ширину, выраженную в длинах волн. Существенным моментом при разработке численных методов расчета коэффициентов отражения и прохождения является обеспечение устойчивости вычислений. Эта проблема особо ощутима при расчете коэффициентов отражения и прохождения волны от ионосферы на частотах ниже критической. Решение может убывать с экспоненциальной скоростью либо в случае туннельного прохождения (когда за барьер просачивается экспоненциально малая доля энергии волны), либо в случае сильного поглощения, когда решение также быстро затухает. В связи с этим традиционные методы, основанные на численном решении краевых задач для уравнений, описывающих поле волны, непригодны для расчета отражения от толстого ионосферного слоя.

Таким образом, стало актуальным разработка устойчивых численных методов, позволяющих моделировать различные волновые эффек-

ты и соотносить их с экспериментальными данными. Для расчета произвольных слоев были предложены другие подходы к решению задачи отражения радиоволн, в частности, переход к новым переменным [7, 8], использование точных решений в случае представления потенциала в виде набора дельта-функций или набора прямоугольников [10, 11]. Данные подходы позволили переформулировать задачу и добиться ее устойчивости. В работах [12, 13] получены аналитические выражения для обобщенных коэффициентов отражения и прозрачности произвольной сферически-многослойной изотропной ионосферы и проведено моделирование сигнала, отраженного от многослойной ионосферы.

В последние годы резкое увеличение возможностей современных компьютеров позволило провести широкомасштабное сравнение методов расчета коэффициента отражения, в том числе методов, считавшихся неэффективными. В диссертации исследуются области применимости различных методов для моделирования отражения радиоволн от произвольного ионосферного профиля большой толщины (в длинах волн) при вертикальном зондировании. Предложен оптимальный численный метод для данной задачи и на его основе проводится численное моделирование отражения радиоволн от ионосферы и нижней атмосферы, а также расчеты искажения формы отраженных радиоимпульсов.

**Цели работы.** Сравнение численных методов расчета коэффициента отражения радиоволн на примере толстых немонотонных слоев. Выбор эффективного численного метода решения прямой задачи расчета коэффициента отражения радиоволн от слоистых структур в атмосфере и ионосфере. Исследование распространения радиоволн в ионосфере с учетом неоднородной тропосферы на модельных профилях показателя преломления. Расчет коэффициента отражения радиоволн от нижней атмосферы при наклонном распространении волн, близком к горизонтальному. Численное моделирование отражения радиоимпульсов от различных ионосферных профилей, в том числе с учетом случайного поля неоднородностей.

**Методы исследования.** Основными методами математического моделирования, разработанными в данной диссертации, являются численные методы, реализованные в виде комплексов программ.

**Научная новизна.** Проведен анализ и сопоставление методов расчета коэффициента отражения на примере толстых немонотонных слоев.

Выявлен устойчивый численный метод, позволяющий рассчитывать отражения радиоволн от немонотонных ионосферных слоев, произвольной толщины (в длинах волн). Впервые проведено численное моделирование распространения радиоволн в ионосфере с учетом неоднородной тропосферы. Получены результаты расчетов коэффициента отражения радиоволн от нижней атмосферы при наклонном распространении. Продемонстрировано отражение радиоимпульсов от многослойной ионосферы с различными типами слоев электронных концентраций. Получены результаты численного моделирования ионограмм вертикального зондирования для ионосферных слоев с учетом мелкомасштабных возмущений в ионосфере.

**Практическая ценность.** Предложен численный метод, позволяющий эффективно решать задачи радиозондирования ионосферы и атмосферы. Ионограммы, полученные путем численного эксперимента, представляют интерес для уточнения параметров ионосферы по данным радиозондирования.

#### **Положения, выносимые на защиту:**

1. Результаты анализа и сопоставления известных численных методов расчета коэффициента отражения на примере толстых немонотонных ионосферных слоев. Выбран эффективный численный метод решения прямой задачи, основанный на приближении потенциала набором прямоугольников. Метод позволяет проводить устойчивые вычисления для различных ионосферных профилей большой толщины.
2. Результаты расчетов коэффициента отражения радиоволн от модельных высотных профилей показателя преломления атмосферы. Рассчитана производная фазы коэффициента отражения с учетом нижней атмосферы. Показано, что основной вклад в вариации коэффициента отражения вносят профили, содержащие большие градиенты показателя преломления на границах и разрывы функции показателя преломления.
3. Результаты расчетов коэффициента отражения радиоволн от нижней атмосферы при наклонном распространении. Показано, что влияние неоднородных структур тропосферы становится значительным

при наклонном распространении радиоволн, близком к горизонтальному (для углов порядка  $89^\circ$ ). Увеличение угла падения радиоволны приводит к возрастанию амплитуды и частотного масштаба осцилляций. Наблюдаемые волновые интерференционные эффекты соответствуют отражению радиоволны от неоднородных структур тропосферы.

4. Результаты численного моделирования ионограмм вертикального зондирования для ионосферных слоев сложной структуры. Появление на ионограммах следов от многократного переотражения импульса в области долины характерно для профилей, содержащих большие градиенты электронной концентрации на границах, разрывы функции плотности электронной концентрации и ее производных, а также тонкие спорадические слои. Уменьшение толщины спорадического слоя и разрыв первой производной электронной концентрации на его границах приводит к существенному увеличению диапазона полупрозрачности.
5. Результаты численного моделирования ионограмм вертикального зондирования, демонстрирующих зависимость структуры отраженных сигналов от величины мелкомасштабных возмущений в ионосфере. При достаточно большой амплитуде неоднородностей наблюдается диффузное отражение, обусловленное вертикальной неоднородностью ионосферы.

**Апробация работы.** Результаты диссертации доложены на научных конференциях, симпозиуме:

- VII Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам «Ломоносов-2000». Москва, 2000.
- LII Научная сессия, посвященная Дню Радио. Москва, 2001.
- XX Всероссийская конференция по распространению радиоволн. Нижний Новгород, 2002.
- Международный симпозиум «Атмосферная радиация» (МСАР-2006). Санкт-Петербург, 2006.
- XVIII сессия Российского акустического общества. Таганрог, 2006.

**Публикации.** Основные результаты диссертации изложены в 7 опубликованных работах, список которых приведен в конце автореферата.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 104 наименования. Объем диссертации составляет 111 страниц, включая 47 рисунков и таблицу.

## Содержание диссертации

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертационной работы, сформулированы основные цели, научная новизна и практическая ценность, перечислены защищаемые положения и кратко изложено содержание всех глав диссертации.

**В первой главе** рассматриваются задачи распространения волн в слоистых средах и методы их решения. Электрическое поле плоской гармонической волны описывается волновым уравнением, имеющим вид одномерного уравнения Гельмгольца

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + k^2 \varepsilon(x, \omega) E = 0, \quad (1)$$

где  $k = \frac{\omega}{c}$  – волновое число,  $\omega$  – циклическая частота волны,  $c$  – скорость света,  $\varepsilon$  – диэлектрическая проницаемость. В случае плоскостройной изотропной плазмы задача распространения электромагнитной волны сводится к решению одномерного стационарного уравнения вида

$$\frac{d^2 E}{dx^2} + (k^2 - q(x, \omega)) E = 0 \quad (2)$$

с потенциалом

$$q(x, \omega) = \frac{e^2 N(x)}{\varepsilon_0 m c^2 (1 + i\nu_{\text{эфф}}/\omega)}, \quad (3)$$

где  $N(x)$  – электронная концентрация,  $\varepsilon_0$  – диэлектрическая постоянная,  $e$  и  $m$  – заряд и масса электрона,  $\nu_{\text{эфф}}$  – эффективная частота соударений. При отсутствии поглощения потенциал (3) становится действительным и не зависит от частоты. Показатель преломления атмосферы  $n = \sqrt{\varepsilon}$  мало превышает единицу [14].

Граничные условия, соответствуют нормальному падению из свободного пространства на слоистую среду плоской волны, часть которой отражается и часть проходит через слой:

$$\begin{aligned} E(x, k) &= e^{ikx} + R(k)e^{-ikx} \quad \text{при } x \rightarrow -\infty, \\ E(x, k) &= T(k)e^{ikx} \quad \text{при } x \rightarrow \infty, \end{aligned} \quad (4)$$

где  $R(k)$  – комплексный коэффициент отражения содержит в себе как амплитуду, так и фазу отраженной волны,  $T(k)$  – комплексный коэффициент прохождения. Решением является нахождение коэффициентов отражения и прохождения, когда свойства среды известны.

Сделан обзор моделей, для которых можно найти точное решение одномерного волнового уравнения (2). Рассмотрены существующие на сегодняшний день различные подходы к решению задачи отражения радиоволн от произвольного ионосферного профиля с учетом волновых явлений. Приведен обзор работ по исследованию закономерности отражения радиоволн от различных ионосферных профилей.

**Во второй главе** рассматриваются приближенные методы решения одномерной задачи расчета комплексного коэффициента отражения. Одним из способов решения волнового уравнения (2) в случае плоско-слоистой изотропной плазмы является численное решение дифференциального уравнения первого порядка, полученного путем перехода к новой переменной  $V(x, k) = (dE(x, k)/dx)/E(x, k)$ :

$$\frac{dV}{dx} + V^2 + k^2 - q(x) = 0 \quad (5)$$

с граничным условием позади слоя ( $x = a$ )  $V(a, k) = ik$ . Аналогично, переход к усеченному потенциалу сводит волновое уравнение (2) к дифференциальному уравнению первого порядка вида

$$\frac{dR(x, k)}{dx} = -2ikR(x, k) - \frac{q(x)}{2ik} (1 + R(x, k))^2 \quad (6)$$

с граничным условием  $R(a, k) = 0$ .

Другим способом решения прямой задачи является использование точных решений, которые существуют в случае представления потенциала в виде набора дельта-функций  $q(x) = \sum_n q_n \delta(x - x_n)$  или набора прямоугольников. Тогда задача расчета коэффициента отражения сводится к вычислениям по рекуррентной формуле с граничным условием



$R_{n+1} = 0$ . Расчет коэффициента отражения методом прямоугольников проводится по рекуррентной формуле

$$R_n = \frac{(p_n - p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1}\Delta x_n} (p_n + p_{n+1})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1}\Delta x_n} (p_n - p_{n+1})}. \quad (7)$$

где  $\Delta x_n = x_{n+1} - x_n$ ,  $p_n = \sqrt{k^2 - q_n}$ .

Однако, при вычислении коэффициента отражения в области малых значений  $p_n$  возникают трудности. В этом случае предлагается коэффициент отражения рассматривать как  $R_n = -1 + \varepsilon_n$ , где  $\varepsilon_n$  – малая добавка, равная

$$\varepsilon_n = \frac{2p_n (1 + R_{n+1} e^{2ip_{n+1}\Delta x_n})}{(p_n + p_{n+1}) + R_{n+1} e^{2ip_{n+1}\Delta x_n} (p_n - p_{n+1})}.$$

Исследование точности вычислений рассматриваемых методов для моделирования отражения радиоволн от ионосферы при вертикальном зондировании проводилось путем численного эксперимента на примере полных ионосферных профилей (например слой  $F$ , величина потенциала которого составляет  $10^{11} - 10^{12}$ ). За величину потенциала принята безразмерная величина, равная произведению характерного значения потенциала  $Q$  на квадрат его характерной ширины  $a$ , т.е.  $Qa^2$ .

Алгоритмы численных решений дифференциальных уравнений первого порядка (уравнения (5) и (6)) основаны на методе Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядка точности. Точность и эффективность численного расчета проверялась повторным расчетом коэффициента отражения с меньшим шагом сетки. Отметим, что величина шага сетки бралась существенно меньше длины волны.

На рис. 1 представлена зависимость модуля погрешности расчета коэффициента отражения  $|\Delta R|$  от величины шага сетки  $h/\lambda$  (здесь и далее  $\lambda$  – длина волны) для гладкого унимодального (косинусного) слоя  $q(x) = Q(1 - \cos(2\pi x/a))/2$ . Порядок точности метода соответствует углу наклона кривой  $|\Delta R(h/\lambda)|$  в логарифмических координатах.

Приведенные результаты демонстрируют преимущество метода прямоугольников для данной задачи перед другими методами 2-го порядка точности. Сравнение численных методов показало, что методы, основанные на уравнениях (5) и (6), имеют близкие значения погрешности коэффициента отражения.

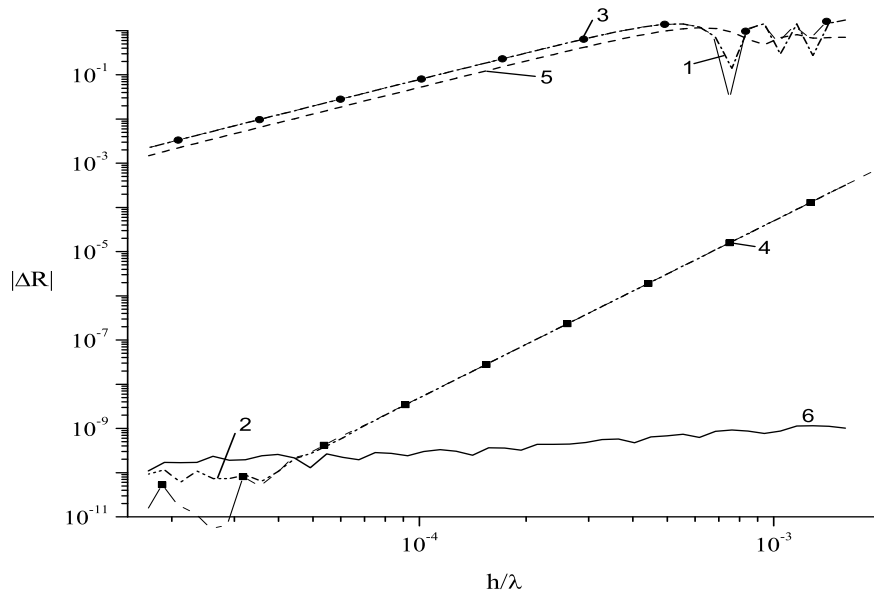


Рис. 1: Зависимость модуля погрешности расчета коэффициента отражения от величины шага для косинусного потенциала при  $Qa^2 = 10^{12}$ ,  $ka = 10^6$ : 1, 2 – метод Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядков для усеченного потенциала; 3, 4 – метод Рунге-Кутты 2-го и 4-го порядков для логарифмической производной; 5 – метод дельта-потенциалов; 6 – метод прямоугольников.

Оптимальный шаг сетки, необходимый для достижения погрешности коэффициента отражения не более 1% составляет  $h/\lambda \sim 10^{-2}$  для метода Рунге-Кутты второго порядка и для метода дельта-потенциалов,  $h/\lambda \sim 3 \cdot 10^{-2}$  для Рунге-Кутты четвертого порядка и  $h/\lambda \sim 10^{-1}$  для метода прямоугольников.

Таким образом, выявлены ограничения на величину шага сетки и продемонстрирована эффективность метода прямоугольников для данной задачи. Численный метод расчета коэффициента отражения, основанный на представлении потенциала набором прямоугольников, является устойчивым и простым в реализации.

**Третья глава** посвящена изучению задачи распространения радиоволн в ионосфере с учетом неоднородной тропосферы. Такие факторы как облака, дымки, слои повышенной влажности в температурных инверсиях могут вносить свой вклад в изменение коэффициента отражения. Для учета влияния тропосферы рассматриваются различные модельные высотные профили показателя преломления.

Получены результаты вычисления производной фазы коэффициента отражения для различных высотных профилей показателя прелом-

ления. Показано, что заметная разница проявляется на частотах ниже 50 кГц. На частотах порядка 10 МГц разница составляет не более 0,001%. Учет тропосферы приводит к изменению фазы коэффициента отражения на величину порядка  $\pi$ .

Промоделировано отражение радиоволн от неоднородных структур тропосферы при вертикальном зондировании. Основной вклад в изменении коэффициента отражения вносят профили, содержащие большие градиенты показателя преломления на границах и разрывы функции показателя преломления. Модуль коэффициента отражения для неоднородной тропосферы на частотах выше критической составляет величину порядка  $10^{-5}$ .

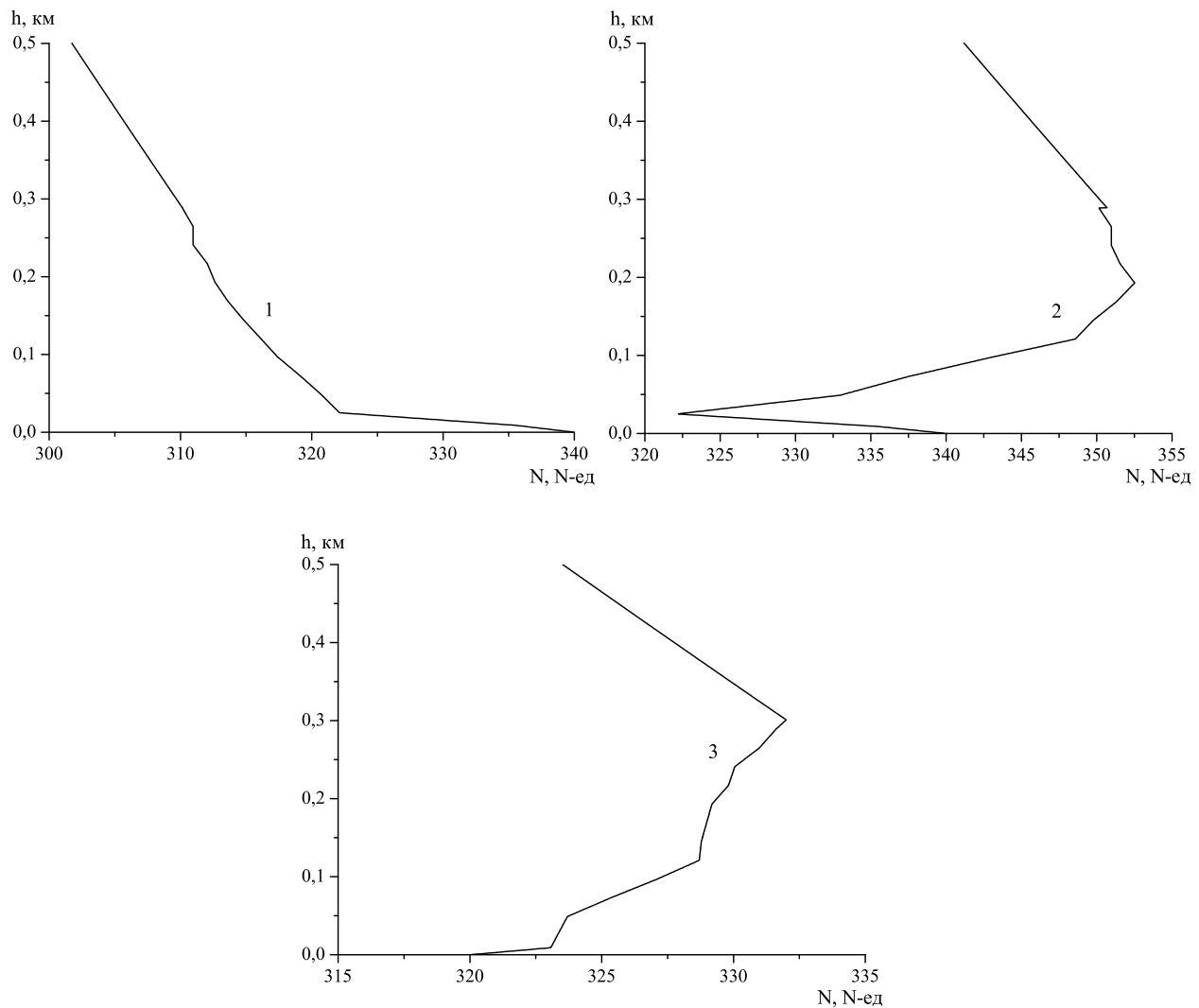


Рис. 2: Примеры экспериментальных высотных профилей показателя преломления воздуха для радиоволн в летний период [14, 15].

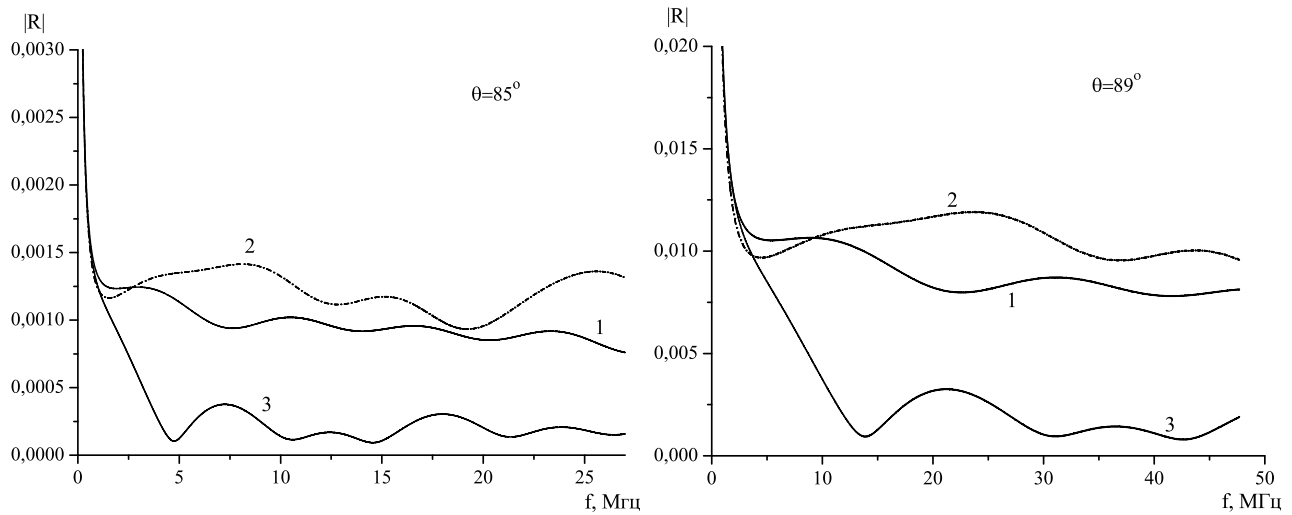


Рис. 3: Модуль коэффициента отражения при падении радиоволны на слой тропосферы под углом  $\theta = 85^\circ$  и  $\theta = 89^\circ$ .

Изучены основные особенности наклонного распространения радиоволн в приземном слое тропосферы на примере высотных профилей показателя преломления, полученных по данным метеонаблюдений (рис. 2) [14, 15].

Для построения вертикальных профилей показателя преломления воздуха использовались материалы наблюдений в слое воздуха 2 – 301 м в течение среднего с точки зрения метеорологических условий года. Выше этого слоя показатель преломления определялся по экспоненциальной модели до высоты атмосферы 80 км.

По реальным профилям показателя преломления тропосферы проведены вычисления модуля коэффициента отражения радиоволн для наклонного зондирования. На рис. 3 представлены результаты расчета модуля коэффициента отражения  $|R(f)|$  при падении радиоволны на слой тропосферы под углом  $\theta = 85^\circ$  и  $\theta = 89^\circ$ . Увеличение угла падения радиоволны  $\theta$  приводит к возрастанию частотного масштаба осцилляций и амплитуды колебаний. Величина модуля коэффициента отражения для  $\theta = 85^\circ$  имеет порядок  $10^{-3}$ , а для  $\theta = 89^\circ$  на порядок выше,  $10^{-2}$  (рис. 3). Чем более изрезанная форма профиля показателя преломления, тем сложнее вид имеет частотная зависимость коэффициента отражения.

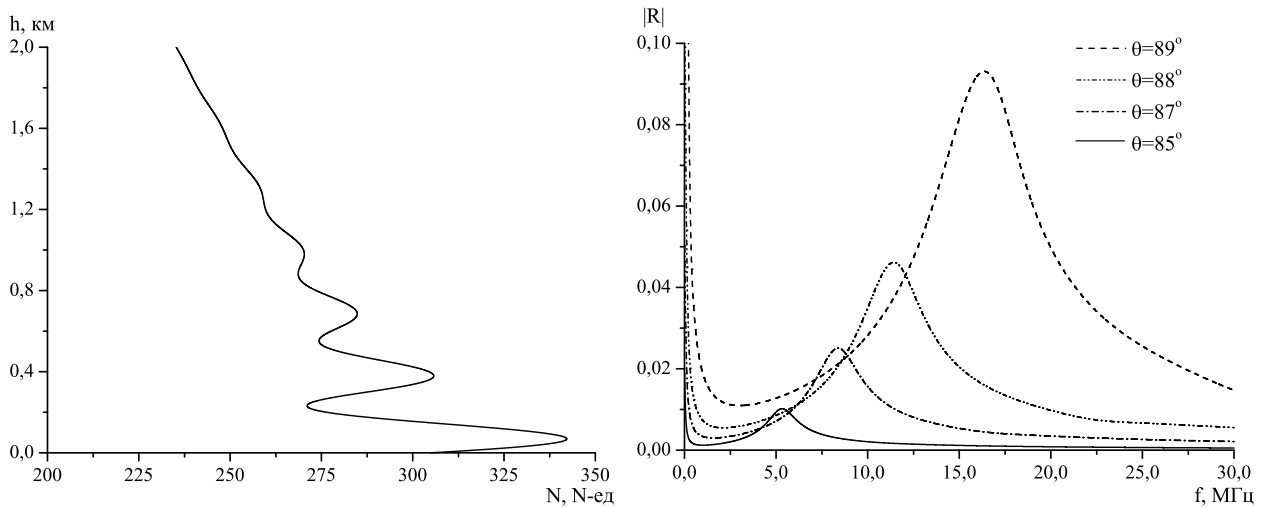


Рис. 4: Модельный высотный профиль показателя преломления воздуха в условиях температурных инверсий, модуль коэффициента отражения при разных углах падения радиоволны на слой тропосферы.

На рис. 4 приведены результаты расчета модуля коэффициента отражения  $|R(f)|$  при разных углах падения радиоволны на модельный высотный профиль показателя преломления воздуха в условиях температурных инверсий. Пик коэффициента отражения соответствует случаю, когда длина волны совпадает с характерным размером неоднородностей. Для угла  $\theta = 88^\circ$  максимум модуля коэффициента отражения лежит на частоте  $f_{\text{накл}} \approx 11.5$  МГц и соответствующая ей длина волны  $\lambda \approx 750$  м совпадает с протяженностью неоднородностей  $L \approx 800$  м (рис. 4).

Таким образом, на примере высотных профилей показателя преломления, полученных по данным метеонаблюдений, продемонстрировано влияние приземного слоя тропосферы при наклонном распространении радиоволн.

**В четвертой главе** рассматривается задача расчета формы отраженного сигнала при вертикальном зондировании. Для различных профилей электронной концентрации выполнено численное моделирование ионограмм вертикального зондирования ионосферы. В качестве моделей многослойной ионосферы рассматриваются как гладкие, так и разрывные профили электронной концентрации. Появление на ионограммах следов от многократного переотражения импульса в области долины, изменение асимптотики вблизи критических частот характерно для профилей с наличием тонких спорадических слоев и слоев разной формы.

В работе промоделирован профиль электронной концентрации со

спорадическим слоем, имеющим форму параболы (рис. 5 а). Особенностью параболического слоя является наличие разрыва первой производной электронной концентрации на его границах. Для спорадического слоя толщиной 500 м получена ионограмма вертикального зондирования (рис. 5 б). Ионограмма представляет собой двумерное распределение действующей высоты отражения  $h'$  сигнала от несущей частоты  $f$ . Амплитуда отраженного импульса прямо пропорциональна интенсивности черного цвета на ионограмме.

Первый след на действующей высоте 100 км соответствует сигналу, отраженному от спорадического  $E_s$ -слоя. Второй и третий по высоте следы представляют сигналы, отраженные от  $E$ - и  $F$ -слоев. Поскольку в данной задаче поглощение не учитывается, на ионограмме наблюдаются следы от многократного переотражения сигнала в области  $E_s - E$  долины (рис. 5 б). Уменьшение толщины спорадического слоя приводит к увеличению диапазона полупрозрачности. Большой диапазон полупрозрачности тонкого слоя может являться как следствием разрыва первой производной электронной концентрации, так и следствием большого градиента электронной концентрации. Таким образом, расчеты наглядно объясняют зависимость явлений, наблюдаемых при радиозондировании ионосферы, от известных свойств спорадических слоев.

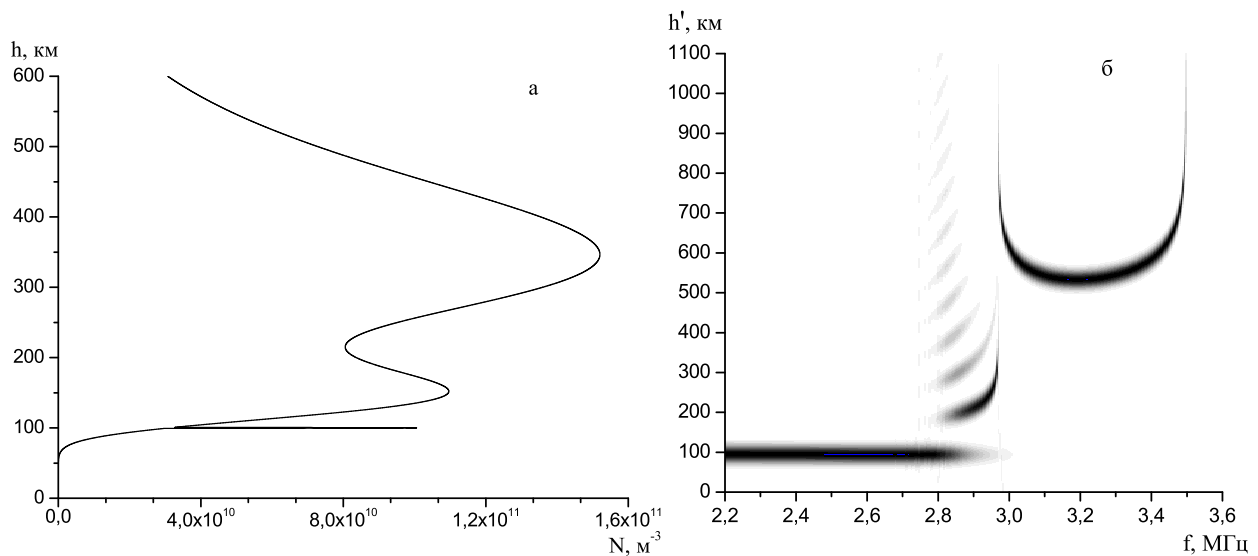


Рис. 5: Модельный профиль электронной концентрации ионосферы с тонким спорадическим слоем в виде параболы (а) и ионограммы вертикального зондирования для профиля со спорадическим слоем шириной 500 м (б).

В работе рассмотрены потенциалы со случайным полем неоднородности, которые соответствуют представлению о характерных особенностях возмущений в ионосфере. Для задания «шума» удобно выбрать следующий амплитудный пространственный спектр неоднородностей:

$$G(k_n) = \begin{cases} 0 & \text{при } 0 \leq k_n \leq k_0, \\ a \left( \frac{L}{2\pi} k_n \right)^3 + b \left( \frac{L}{2\pi} k_n \right)^2 & \text{при } k_0 \leq k_n \leq k_m, \\ \left( \frac{L}{2\pi} k_n \right)^{-\alpha} & \text{при } k_m \leq k_n, \end{cases}$$

где  $a$  и  $b$  – некоторые коэффициенты,  $L$  – интервал высот, на котором задан потенциал,  $k_n = \frac{2\pi n}{L}$  – волновое число, соответствующее  $n$ -й гармонике в спектре возмущений, константа  $\alpha = 3$  имеет смысл асимптотики энергетического спектра. Спектр исключает низкие частоты, соответствующие масштабам самих ионосферных слоев, в интервале  $k_0 \leq k_n \leq k_m$  аппроксимируется полиномом третьей степени, причем функция  $G(k_n)$  и ее первые производные в точках  $k_0$ ,  $k_m$  непрерывны. Созданное таким образом возмущение прибавляется к основному профилю потенциала.

Профили электронной концентрации с добавлением «шума» различной амплитуды при масштабе неоднородностей 125 м и асимптотики энергетического спектра  $\alpha = 3$  представлены на рис. 6. Величина «шума» составляет 0.5 – 7% от величины потенциала. Модельные ионограммы на рис. 7 наглядно демонстрируют зависимость структуры отраженных сигналов от величины неоднородностей.

Учет мелкомасштабных возмущений в ионосфере приводит к сложной структуре ионограмм. При достаточно большой амплитуде неоднородностей (рис. 6 б) наблюдается диффузное отражение (рис. 7 б), которое принято связывать с горизонтальной неоднородностью ионосферных слоев. Отметим, что диффузный характер отражения был получен нами в рамках модели плоскостройной ионосферы, исключительно за счет вариаций вертикального профиля ионосферы. Таким образом, оказывается, что диффузный характер сигналов вертикального зондирования можно объяснить наличием вертикальной неоднородности ионосферы.

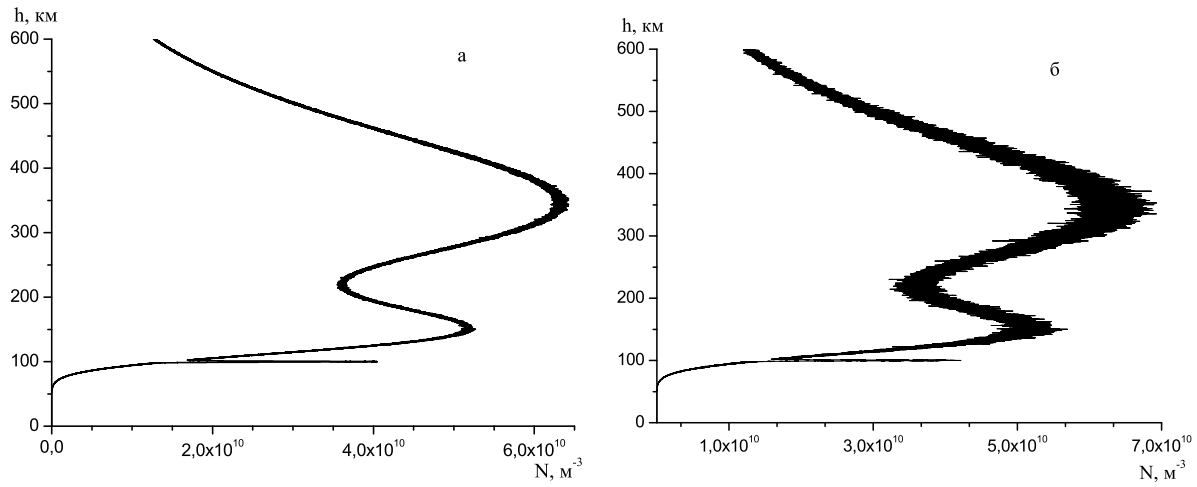


Рис. 6: Модельные профили электронной концентрации с добавлением «шума» различной амплитуды. Величина «шума» составляет 0.5% (а) и 7% (б) от величины потенциала.

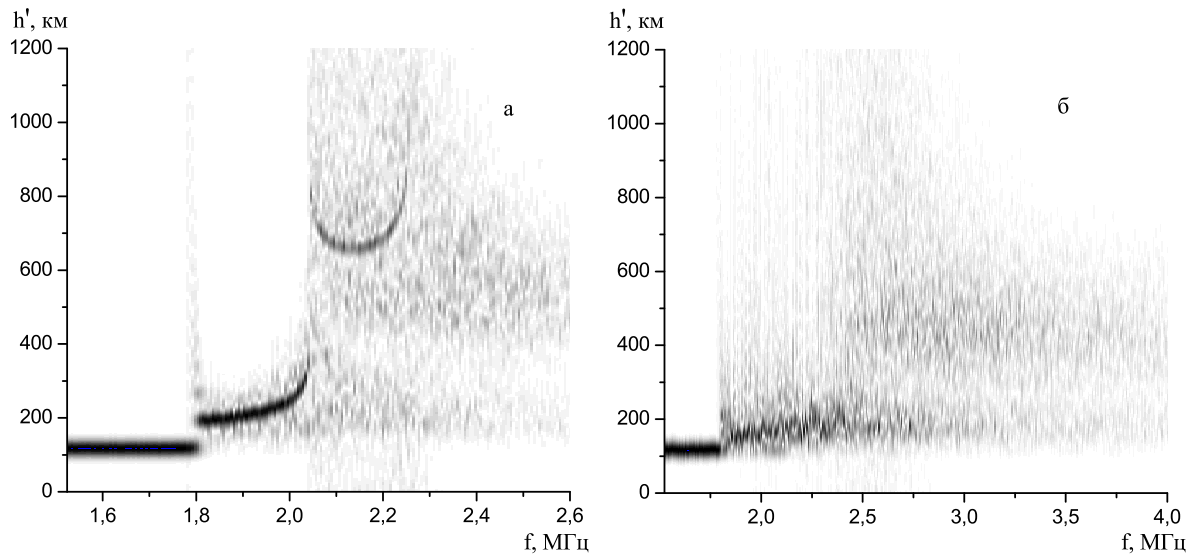


Рис. 7: Ионограммы вертикального зондирования с характерным масштабом колебаний неоднородностей 125 м. Величина «шума» составляет 0.5% (а) и 7% (б) от величины потенциала.

**В заключении** перечислены полученные результаты и кратко сформулированы основные выводы диссертационной работы.



## Основные результаты и выводы

1. Проведено исследование области применимости численных методов расчета коэффициента отражения для толстых немонотонных слоев. Предложен эффективный численный метод решения прямой задачи, основанный на приближении потенциала набором прямоугольников. Проведенные тестовые расчеты показали достаточно высокую точность численного решения задачи определения коэффициента отражения.
2. Про моделировано распространение радиоволн в ионосфере с учетом неоднородной тропосферы на модельных профилях показателя преломления. Рассчитана зависимость производной фазы коэффициента отражения по волновому числу при учете влияния тропосферы. Показано, что разница между величинами производной фазы коэффициента отражения с учетом и без учета тропосферы заметна на частотах ниже 50 кГц и составляет не более 0,001% на частотах порядка 10 МГц. Учет тропосферы приводит к изменению фазы коэффициента отражения на величину порядка  $\pi$  и модуля коэффициента отражения радиоволн на величину порядка  $10^{-4}$ . Исследовано влияние неоднородностей показателя преломления воздуха на отражение радиоволн при вертикальном распространении волн в атмосфере. Основной вклад в изменении коэффициента отражения вносят профили, содержащие большие градиенты показателя преломления на границах и разрывы функции показателя преломления.
3. На примере высотных профилей показателя преломления, полученных по данным метеонаблюдений, продемонстрировано влияние приземного слоя тропосферы при наклонном распространении радиоволн. Увеличение угла падения радиоволны приводит к возрастанию амплитуды и частотного масштаба осцилляций. Величина модуля коэффициента отражения  $|R(f)|$  при  $\theta = 89^\circ$  составляет порядка  $10^{-2}$ . Наблюдаемые волновые интерференционные эффекты соответствуют многократному отражению радиоволны от неоднородных структур тропосферы. При очень больших углах,  $\theta > 89^\circ$ , становятся различимы интерференционные эффекты, связанные с отражением радиоволны от всего слоя тропосферы.

4. Реализованы алгоритмы расчета формы отраженного сигнала при вертикальном зондировании ионосферы. Подход к расчету ионограмм, базирующийся на решении уравнения Гельмгольца, без использования каких-либо аналитических приближений, позволил учесть отражение от мелких неоднородностей, сравнимых с длиной волны, и промоделировать отражение при наличии случайного поля неоднородностей. Для различных профилей электронной концентрации выполнено численное моделирование ионограмм вертикального зондирования ионосферы. Появление на ионограммах следов от многократного переотражения импульса в области долины, изменение асимптотики вблизи критических частот характерно для профилей с наличием тонких спорадических слоев и слоев разной формы. Уменьшение толщины спорадического слоя и разрыв первой производной электронной концентрации на его границах приводит к увеличению диапазона полупрозрачности.
5. Получен диффузный характер следов на ионограммах при достаточно большом по амплитуде поле неоднородностей. Несмотря на то, что рассмотренная задача является одномерной по своей постановке (рассматривается плоскостроистая ионосфера), обнаруженная картина близка к той, которая наблюдается на реальных ионограммах и которая обычно объясняется поперечной неоднородностью отражающих слоев. Оказывается, что диффузное отражение можно объяснить также и слоистой (вертикальной) структурой неоднородностей.

## Список публикаций

- [1] *Голикова Е.В., Куницын В.Е., Нестеров И.А., Матвеев А.С.* Моделирование отражения радиосигналов от слоистой атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. №7. С. 794-804.
- [2] *Голикова Е.В., Куницын В.Е., Нестеров И.А.* Моделирование ионограмм вертикального зондирования для немонотонных ионосферных слоев // Геомагнетизм и аэрономия. 2008. Т.48. №1. С. 109-115.
- [3] *Голикова Е.В. (Бочкова Е.В.)* Сравнение точности методов расчёта коэффициента отражения электромагнитных волн от слоистой плазмы // VII Международная конференция студентов и аспирантов по фундаментальным наукам "Ломоносов-2000". Секция "Физика". 2000. С. 113-115.
- [4] *Голикова Е.В. (Бочкова Е.В.), Нестеров И.А.* Сравнение точности методов расчета комплексных коэффициентов отражения от слоистых сред // LII Научная сессия, посвященная Дню Радио. Тезисы докладов. М. 2001. Т.2. С. 283-285.
- [5] *Голикова Е.В. (Бочкова Е.В.), Куницын В.Е., Матвеев А.С., Нестеров И.А.* Моделирование отражения электромагнитных волн от слоистой ионосферы и нижней атмосферы // Труды XX всероссийской конференции по распространению радиоволн. Нижний Новгород. 2002.
- [6] *Нестеров И.А., Голикова Е.В., Куницын В.Е.* Распространение радиоволн в слоистой атмосфере и ионосфере // Международный симпозиум "Атмосферная радиация"(МСАР-2006). Сборник тезисов. Санкт-Петербург. 2006. С. 121.
- [7] *Голикова Е.В.* К вопросу о влиянии слоистой атмосферы на отражение волн от атмосферных слоев // XVIII сессия Российского акустического общества. Сборник трудов. 2006. Т.2. С. 179-183.

## Список цитируемой литературы

- [1] *Гинзбург В.Л.* Распространение электромагнитных волн в плазме. М.: Наука, 1967.
- [2] *Маслов В.П., Федорюк М.В.* Квазиклассическое приближение для уравнений квантовой механики. М.: Наука, 1976.
- [3] *Маслов В.П.* Асимптотические методы и теория возмущений. М.: Наука, 1988.
- [4] *Chessel C.I.* Results of numerical calculations of reflection and transmission coefficients for thin highly ionized layers and their application to sporadic-*E* reflections // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1971. V.33. P. 1803-1822.
- [5] *Miller K.L., Smith L.G.* Reflection of radio waves by sporadic-*E* layers // Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics. 1977. V.39. P. 899-911.
- [6] *Nygren T.* A simple method for obtaining reflection and transmission coefficients and fields for electromagnetic wave in a horizontally stratified ionosphere // Planet. Space Science. 1981. V.29. №5. P. 521-528.
- [7] *Куницын В.Е., Смородинов В.А., Усачев А.Б.* Отражение радиоволн от произвольного ионосферного слоя // Радиотехника и электроника. 1989. Т.33. №2. С. 233-240.
- [8] *Куницын В.Е., Усачев А.Б.* Отражение радиоволн от немонотонных ионосферных слоев // Изв. Вузов. Радиофизика. 1990. Т.33. №3. С. 267-274.
- [9] *Куницын В.Е., Усачев А.Б.* Расчет ионограмм вертикального зондирования слоистой ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1993. Т.33. №1. С. 145-148.

- [10] *Бочкова Е.В., Нестеров И.А.* Сравнение точности методов расчета комплексных коэффициентов отражения от слоистых сред // ЛII Научная сессия, посвященная Дню Радио. Тезисы докладов. М. 2001. Т.2. С. 283-285.
- [11] *Голикова Е.В., Куницын В.Е., Нестеров И.А., Матвеев А.С.* Моделирование отражения радиосигналов от слоистой атмосферы и ионосферы // Радиотехника и электроника. 2005. Т.50. №7. С. 794-804.
- [12] *Михайлов С.Я.* Отражение радиоволн от двухслойной изотропной ионосферы в областях критических частот // Радиотехника и электроника. 2002. Т.47. №10. С. 1169-1179.
- [13] *Михайлов С.Я.* Моделирование сигнала, отраженного от произвольной сферически-слоистой изотропной ионосферы // Солнечно-земная физика. 2005. Вып. 7. С. 100-109.
- [14] *Казаков Л.Я., Ломакин А.Н.* Неоднородности коэффициента преломления воздуха в тропосфере. М.: Наука, 1976.
- [15] *Паршуков В.А.* Влияние рефракции миллиметровых и сантиметровых волн в атмосфере на угол места источника излучения : Дис. ... канд. ф.-м. наук. М., 2004.