



УДК 550.388.1

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ КРИТИЧЕСКОЙ ЧАСТОТЫ ИОНОСФЕРЫ НА ОДНОСКАЧКОВОЙ ТРАССЕ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В. Ю. Ким¹¹Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н. В. Пушкова РАН, г. Троицк, г. Москва, Россия

Представлена новая методика определения критической частоты ионосферы $foF2$ по данным наклонного зондирования. Разработан алгоритм расчета МПЧ на основе решения многофакторной вариационной задачи, включающей расчет траекторных характеристик и параметров фокусировки радиоволн. На основе исследования зависимости величины МНЧ от основных параметров трехслойной ионосферы разработана методика решения модельной обратной задачи определения величины $foF2$ для середины трассы НЗ. Путем сопоставления расчетов с экспериментальными данными показано, что критическая частота ионосферы в области над серединой трассы может оцениваться с погрешностью менее 3%.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: ИОНОСФЕРА, НАКЛОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ, МАКСИМАЛЬНАЯ ПРИМЕНИМАЯ ЧАСТОТА

DOI 10.5425/2304-7380_2023_40_81

<https://elibrary.ru/tzbqqt>

1. ВВЕДЕНИЕ

Проблемы инструментальной диагностики ионосферы остаются актуальными как для физики верхней атмосферы (ионосферы), так и для развития методов прогноза распространения радиоволн [1]. В задачах прогнозирования распространения радиоволн в ионосфере широко применяется международная модель ионосферы IRI [2], [3]. Важным и актуальным является вопрос о погрешности расчетов максимальной применимой частоты (МПЧ) для трасс наклонного зондирования (НЗ) и способов коррекции модели IRI для повышения точности прогноза. В работе [2] было показано, что при использовании модели IRI-2012 для прогноза суточных ходов параметров ионосферы может приводить к погрешности в 20 % при расчете МПЧ. В [3] показано, что коррекция модели IRI-2012 по данным вертикального зондирования (ВЗ) в передающем пункте погрешность прогноза МПЧ составляет 7.2 %, а при использовании данных ВЗ в середине трассы погрешность расчета может составлять 5.9 %. В работе [4] для улучшения оперативного прогноза использовался прогнозный ход максимальной наблюдаемой частоты (МНЧ) на трассе НЗ и было получено, что погрешность прогноза МПЧ не превышает 10%.

Дистанционное определение высотного распределения электронной концентрации $Ne(h)$ в ионосфере по данным НЗ решается путем инверсии ионограмм НЗ. Для решения обратной задачи НЗ

Электронная почта авторов для переписки:

Ким Валерий Юрьевич, e-mail: vkim@izmiran.ru

<https://elibrary.ru/tzbqqt>Адрес редакции журнала
«Гелиогеофизические исследования»:ФГБУ «ИПГ»
129128; Россия, Москва
ул. Ростокинская, 9.
e-mail: vestnik@ipg.geospace.ru

применяют различные приближенные методы, использующие для искомого профиля плазменной частоты $fo(h)$ модельные функции, которые позволяют получить решение для изотропной ионосферы [5], [6], [7]. Для интерпретации ионограмм НЗ оказывается достаточным использование сферически-слоистой модели ионосферы [8], а также использование метода Смита и его модификаций для определения критической частоты слоя $foF2$ ионосферы в средней точке трассы [9], при этом погрешность оценки $foF2$ может составлять величину $\sim 5\%$.

Задача оценки критической частоты $foF2$ в средней точке трассы НЗ имеет большое значение для региональных сетей мониторинга ионосферы [10], [11]. В этом отношении весьма перспективной является методика повышения информативности зондирования путем синхронной регистрации ВЗ и НЗ ионограмм, при которой используются импульсные ионозонды типа «Парус-А» [11].

В данной работе развивается методика оценки критической частоты ионосферы $foF2$ в средней точке трассы НЗ с использованием ионограмм ВЗ, измеряемых в передающем или приемном пунктах трассы. Методика основана на численном решении модельной обратной задачи НЗ, включающей траекторный синтез ионограмм НЗ в анизотропной ионосфере для расчета МПЧ и учет результатов анализа ионограмм ВЗ в одном из пунктов трассы.

2. МЕТОДИКА ТРАЕКТОРНЫХ РАСЧЕТОВ ДЛЯ ПОИСКА МПЧ И РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Расчет характеристик ВЧ радиоволн проводился в предположении, что пространственные масштабы неоднородной структуры ионосферы значительно превышают длину волны зондирующих радиоволн и применимо приближение геометрической оптики (ГО). Численное моделирование включало расчет траекторных параметров радиоволн, включая расчет дальности скачка, групповой задержки радиосигнала и оценку интенсивности радиоволн. Для компьютерного моделирования распространения КВ в анизотропной ионосфере существуют хорошо разработанные алгоритмы, которые в рамках ГО позволяют рассчитывать весь набор характеристик радиоволн в ионосфере [12].

Задачей численного моделирования было исследование влияния параметров ионосферы на величину МПЧ на трассе НЗ, что позволит получить количественную оценку связи вариаций параметров ионосферы и вариаций МПЧ. Для реальных трасс величина МПЧ определяется максимальной наблюдаемой частотой (МНЧ) для “необыкновенной” компоненты радиоволны (МНЧ-Х), регистрируемой в пункте приема сигналов НЗ.

Как известно, задача расчета МНЧ на трассе НЗ с дальностью D_0 сводится к поиску такой максимальной рабочей частоты наклонного зондирования f , при которой траектория луча, выходящего из точки излучения T с координатами (x_0, y_0, z_0) и направляющими компонентами волнового вектора (k_{0x}, k_{0y}, k_{0z}) , попадает в точку приема $R(x_1, y_1, z_1)$ на дальности $D(f_M) = D_0$.

В процессе анализа ионограмм НЗ при поиске МНЧ важную роль играет оценка уровня сигнала в пункте приема, который при $f \sim$ МНЧ находится вблизи границы т.н. «мертвой зоны». Вблизи этой зоны поле радиоволн характеризуется фокусировкой на каустике [12], и это можно учесть при разработке методики расчета МНЧ. Для учета фактора фокусировки при численном моделировании можно использовать методику приближенного расчета интенсивности поля радиоволн, которая была предложена в [13] для оценки влияния искусственной неоднородности на распространение радиоволн при нагреве ионосферы мощными ВЧ радиоволнами.

Поскольку для траекторного расчета ионограмм НЗ обычно используются поисковые алгоритмы попадания луча в точку приема, то для приемлемой точности оценки МНЧ следует выбрать допустимую погрешность Δd при вычислении дальности скачка D . Для оценки погрешности расчета Δd можно исходить из некоторых факторов, связанных с анализом параметров реальных ионограмм. Одним из основных измеряемых на частоте f параметром при НЗ является групповая задержка зондирующего сигнала t_{gp} , имеющая обычно погрешность измерения $\Delta t_{gp} \sim 50$ мкс. Это соответствует погрешности по дальности ~ 7.5 км, поэтому можно с запасом положить $\Delta d < 7.5$ км.

Другим важным оцениваемым при анализе ионограмм НЗ параметром является интенсивность регистрируемого сигнала $W(t_{gp})$, которая на экспериментальных ионограммах вблизи МНЧ при $f \approx f_{\text{МНЧ}}$ быстро нарастает и имеет максимальное значение при $D \sim D_0$. Эту особенность поведения величины W можно использовать как дополнительный фактор при траекторном определении МНЧ на трассе НЗ.

Для учета поведения величины $W(t_{gp})$, при траекторном поиске МНЧ можно вдоль траектории

луча проводить расчет фактора фокусировки поля радиоволны по формуле

$$\Psi = W_0(t_{zp})/W(t_{zp}) \quad (1)$$

где $W_0(t_{zp})$ – интенсивность поля радиоволны в свободном пространстве на эквивалентном расстоянии, равном групповому пути сигнала $P = ct_{zp}$. Без учета размерного калибрующего множителя можно в (1) положить:

$$W_0(t_{zp}) = 1/J_0(t_{zp}) \quad (2)$$

где $J_0(t_{zp})$ – якобиан расходимости в свободном пространстве и

$$W(t_{zp}) = 1/J(t_{zp}) \quad (3)$$

где $J(t_{zp})$ – якобиан расходимости, рассчитываемый вдоль траектории луча по формуле

$$J(t_{zp}) = \frac{D(x, y, z)}{D(t_{zp}, k_{0x}, k_{0y})} \quad (4)$$

Величину J_0 вдоль траектории луча можно оценивать формулой

$$J_0(t_{zp}) = cP^2 \quad (5)$$

тогда для фактора фокусировки вместо (1) получим формулу

$$\Psi(t_{zp}) = c^3 t_{zp}^2 / J(t_{zp}) \quad (6)$$

Эта формула будет верна всюду на траектории, кроме малой окрестности вблизи каустики, где якобиан $J(t_{zp})$ стремится к нулю, а величина $\Psi(t_{zp})$ стремится к бесконечности. Поэтому здесь необходимо использовать специальную процедуру, не допускающую попадания траектории луча в точку сингулярности функции $\Psi(t_{zp})$. Для этого можно применить предложенную в [13] процедуру усреднения поля волны в пределах зоны Френеля и ограничить рост интенсивности поля при подходе траектории луча к точке приема на дальности D_0 . Рисунок 1 (из работы [13]) иллюстрирует процедуру такого усреднения интенсивности поля волны при приближении траектории луча к окрестности каустики. Здесь штриховой кривой показан ход относительной интенсивности поля для точного решения на простой каустике в виде известной функции Эйри в зависимости от величины $\Delta\tau$ – времени задержки относительно момента, когда величина $J(t_{zp}) \approx 0$.

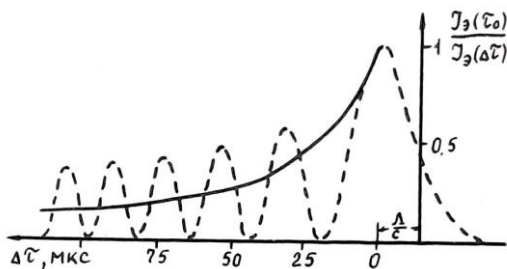


Рис. 1. График зависимости нормированной интенсивности поля от величины $\Delta\tau$, [13]. Сплошная кривая – интенсивность усредненного поля; штриховая кривая – функция Эйри

Сплошной кривой показан ход относительной интенсивности усредненного поля при подходе траектории луча к точке $\Delta\tau = 0$. Положение первого нуля функции Эйри характеризует размер зоны Френеля вблизи точки наблюдения и приводит к оценке значения $\Delta\tau \approx 20$ мкс, что дает для размера зоны Френеля оценку ~ 6 км. При этом погрешность оценки интенсивности не превысит фактора 2 на самой каустике, что в нашем случае вполне допустимо, т. к. здесь не ставится задача расчета поля на каустике и, соответственно, на частоте МНЧ. Для нахождения значения $\Delta\tau = 0$ при численном расчете траектории в [13] была предложена простая процедура, основанная на расчете якобиана $J(t_{zp})$ и его производных, из которых для нас будет

достаточно использовать первую производную $\Psi'(t_{zp})$. При численном расчете величин $\Psi(t_{zp})$ и $\Psi'(t_{zp})$ на траектории луча с конечным шагом Δt_{zp} легко находится некоторое значение t_{zp} , при котором на следующем шаге $t_{zp} = t_{zp} + \Delta t_{zp}$ величина $\Psi' \alpha_0$ скачком меняет знак. Если для величины Δt_{zp} выбрать, например, значение $\Delta t_{zp} \approx 10$ мкс (что соответствует ≈ 3 км по дальности), то этого будет вполне достаточно для попадания траектории в зону Френеля вблизи точки D_0 .

Таким образом, процедура поиска МНЧ состоит в том, что проводится поиск такой рабочей частоты f , для которой выполняются следующие условия:

- 1). Траектория луча имеет дальность $D(\alpha_0) = D_0 \pm \Delta d$, что достигается варьированием вертикального угла выхода луча α_0 .
- 2). Фактор фокусировки $\Psi \alpha_0$ достигает максимума на дальности $D(\alpha_0) \approx D_0$.
- 3). Производная фактора фокусировки $\Psi' \alpha_0$ вблизи дальности D_0 меняет знак с положительного на отрицательный.

При этом условие 3) более точно укажет на оптимальный угол выхода α_0 , при котором выполнится условие 1) и $D(\alpha_0) \approx D_0$. С учетом этих критериев был разработан комплексный алгоритм расчета МНЧ на однокачковой трассе НЗ ионосферы, с помощью которого проводилось численное моделирование влияния параметров высотного профиля ионосферы на величину МНЧ.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ЧИСЛЕННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Модельные расчеты проводились с использованием глобальной аналитической модели ионосферы $Ne(h)$ [14], разработанной для исследования сверхдальнего распространения радиоволн и в которой помимо трех основных слоев E , $F1$ и $F2$ может моделироваться межслоевая долина между E - и $F1$ -слоями. Аналитическое задание высотного профиля электронной концентрации $Ne(h)$ позволяет сравнительно просто изменять основные параметры ионосферы в её различных слоях без потери гладкой непрерывности составляющих его функций и это обеспечивает достаточно высокую точность траекторных расчетов.

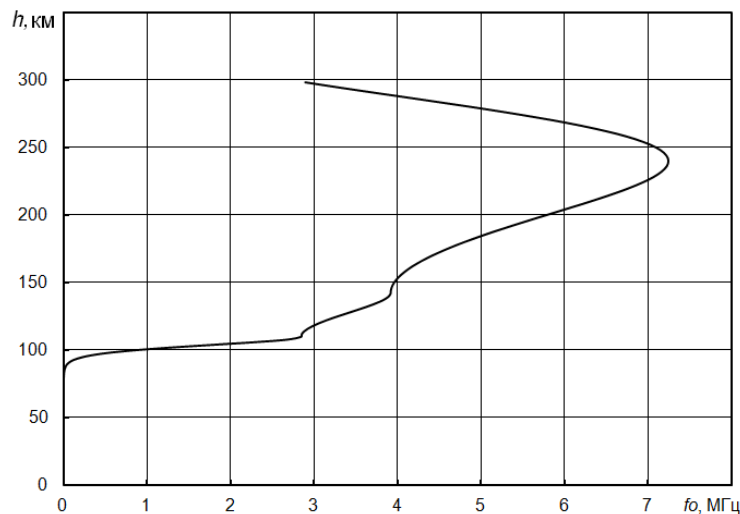


Рис. 2. Модельный профиль $h(f)$: $foF2 = 7.2$ МГц, $hmF2 = 240$ км, $foF1 = 3.9$ МГц, $hmF1 = 142$ км, $foE = 2.9$ МГц, $hmE = 110$ км

При исследовании частотных характеристик распространения радиоволн на трассах НЗ для задания параметров ионосферы вместо $Ne(h)$ удобнее использовать соответствующий профиль плазменной частоты $fo(h)$. Модель ионосферы полагалась сферически-слоистой неоднородной средой, в которой высотный профиль $fo(h)$ задается с помощью шести основных параметров: $foF2$ – критическая частота слоя $F2$; $hmF2$ – высота максимума слоя $F2$; $foF1$ – максимальная частота слоя $F1$; $hmF1$ – высота максимума слоя $F1$; foE – максимальная частота слоя E ; hmE – высота максимума слоя E . Пример такого 3-слойного профиля для дневной невозмущенной ионосферы представлен на рис. 2.

Отработка численной методики поиска МНЧ проводилась путем модельных расчетов для однокачковой трассы длиной $D_0 = 1500$ км, ориентированной по меридиану. Величина гирочастоты электронов в области отражения зондирующих радиоволн на высоте ~ 250 км полагалась равной $f_g = 1.3$ МГц, а угол наклона вектора магнитного Земли к местной вертикали задавался равным 19° . Численные расчеты проводилось с использованием аналитического высотного профиля $h(f_o)$, показанного на рис. 2, параметры которого являются типичными для дневной среднеширотной ионосферы: $foF2 = 7.2$ МГц, $hmF2 = 240$ км, $foF1 = 3.9$ МГц, $hmF1 = 142$ км, $foE = 2.9$ МГц, $hmE = 110$ км.

На рисунке 3 представлен пример, иллюстрирующий процедуру поиска МНЧ для волны “обыкновенной” поляризации путем расчета дистанционно-угловой характеристики (ДУХ) и величин $\Psi\alpha_0$ и $\Psi'\alpha_0$ на трех близких частотах $f_1 = 16.6$ МГц, $f_2 = 16.4$ МГц и $f_3 = 16.2$ МГц.

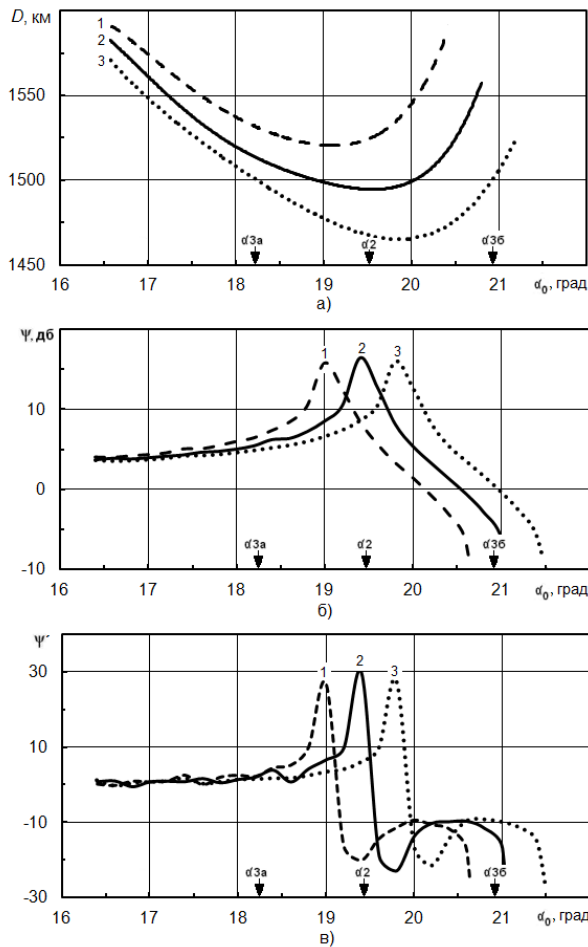


Рис. 3. Расчетные графики зависимости траекторных характеристик от угла α_0 : а) – дальности $D(\alpha_0)$; б) – фактора фокусировки $\Psi(\alpha_0)$; в) величины $\Psi'(\alpha_0)$; для зондирующих частот: $f_1 = 16.6$ МГц (кривая 1); $f_2 = 16.4$ МГц (кривая 2); $f_3 = 16.2$ МГц (кривая 3)

$\Psi\alpha_0$ на рис. 2б (кривая 3), можно заключить, что интенсивность нижнего луча с углом $\alpha_0 \approx \alpha_3$ примерно на 4 дБ больше интенсивности верхнего луча с углом $\alpha_0 \approx \alpha_3$.

На рисунке 3 представлена синтезированная ионограмма НЗ для рассматриваемой трассы НЗ с модельным профилем $h(f_o)$, показанным на рис. 2. Ионограмма была рассчитана на дискретной сетке частот, здесь размер значков соответствует величине погрешности расчетов групповой задержки сигналов Tg , которая в данных расчетах имела значение $\Delta Tg = \pm 20$ мкс. Расчет МНЧ для “О” волны дал значение МНЧ-О = 16.25 МГц, а для “Х” волны - значение МНЧ-Х = 16.65 МГц.

На графике ДУХ для частоты $f_2 = 16.4$ МГц, рис. 3а, (кривая 2), траектории с углом выхода $\alpha_0 \approx \alpha_2$ проходят достаточно близко к дальности $D_0 = 1500$ км, при этом погрешность расчета дальности $D(\alpha_0)$ была $\Delta D(\alpha_0) \approx 2$ км. На рисунке 3б (кривая 2) видно, что максимум фокусировки $\Psi\alpha_0 \approx 17$ дБ достигается при углах выхода $\alpha_0 \approx \alpha_2$ (показано стрелкой на оси α_0). При этом функция $\Psi'\alpha_0$, кривая 2 на рис. 2в, переходит через ноль к отрицательным значениям при значении $\alpha_0 \approx \alpha_2$. Ход функции $\Psi\alpha_0$ при $\alpha_0 > \alpha_2$ показывает, что интенсивность сигнала быстро падает при уходе точки наблюдения дальше в “мертвую зону”. Поэтому по совокупности рассмотренных признаков в ходе графиков $\Psi\alpha_0$ и $\Psi'\alpha_0$ можно заключить, что значение МНЧ для данной модельной трассы равно МНЧ-О = $f_2 = 16.4$ МГц.

График ДУХ для частоты $f_3 = 16.2$ МГц на рис. 3а (кривая 3), пересекает линию дальности $D_0 = 1500$ км дважды – при углах выхода $\alpha_0 \approx \alpha_{3a}$ и $\alpha_0 \approx \alpha_{3b}$. На графике фактора фокусировки $\Psi\alpha_0$, рис. 3б, (кривая 3), видно, что максимум $\Psi\alpha_0 \approx 16$ дБ приходится на значение угла $\alpha_0 \sim 20^\circ$. Однако, при этом величина $\Delta D(\alpha_0)$ приблизительно достигает значения $\Delta D(\alpha_0) \approx 30$ км и поэтому частота $f_3 = 16.2$ МГц не может быть принята как значение МНЧ. Отметим здесь, что точки пересечения кривой ДУХ (кривая 3) и линии D_0 соответствуют точкам на ионограмме НЗ, причем по значениям фактора фокусировки

Тогда для величины МПЧ рассматриваемой трассы получим $МПЧ = МНЧ-X = 16.7 \text{ МГц}$ с погрешностью не более $\Delta f = \pm 0.05 \text{ МГц}$ (т. е. $\sim 0.6\%$) МГц и это вполне сопоставимо с погрешностью оценки МПЧ, получаемой при анализе реальных ЛЧМ ионограмм НЗ.

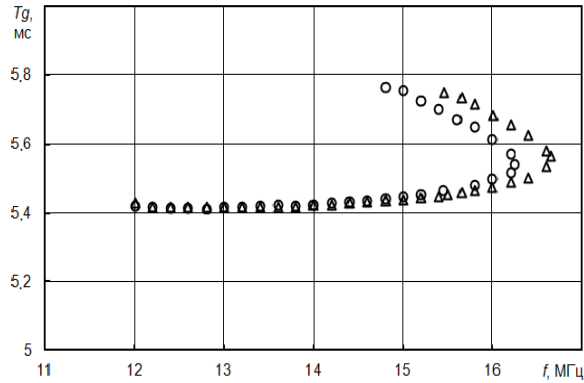


Рис. 4. Расчетная ионограмма для трассы НЗ с $D = 1500 \text{ км}$.
Ионограмма для “О” компоненты показана кружками, для “Х”
компоненты – треугольными значками

С помощью описанной методики расчета МНЧ были проведены модельные расчеты по исследованию влияния параметров аналитической модели на величину МНЧ. Расчеты проводились для односкачковой трассы НЗ, параметры которой описаны выше. Траекторные расчеты при поиске МНЧ проводились для волны «Х»-поляризации, результаты расчетов при различных вариациях параметров модельных профилей $h(fo)$ ионосферы представлены на рисунках 5, 6 и 7.

На рисунке 5 представлены графики зависимости МНЧ от критической частоты $foF2$ и максимальной частоты $foF1$. На рисунке 5а варьировалась величина $foF2$ при фиксированных значениях других параметров профиля $h(fo)$: $hm = 295 \text{ км}$, $hmE = 115 \text{ км}$, $hmF1 = 120 \text{ км}$, $foE = 3 \text{ МГц}$, $foF1 = 3.5 \text{ МГц}$. Видно, что с возрастанием $foF2$ величина МНЧ ожидаемо растет почти линейно. На рисунке 5б показана зависимость МНЧ от вариаций foE при фиксированных значениях других параметров слоя: $hm = 280 \text{ км}$, $hmE = 115 \text{ км}$, $hmF1 = 120 \text{ км}$, $foE = 3 \text{ МГц}$, $foF2 = 11 \text{ МГц}$. Видно, что с возрастанием величина МНЧ почти линейно убывает $foF1$, в противоположность зависимости МНЧ от $foF2$.

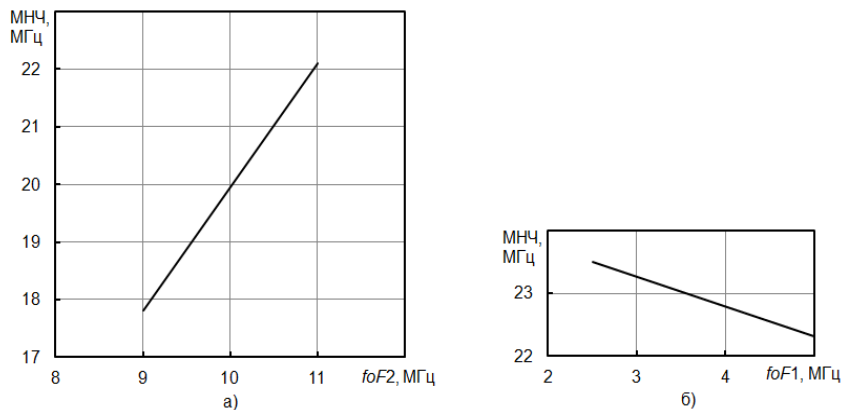


Рис. 5. Зависимость МНЧ от вариаций параметров профиля $h(fo)$; а) –
зависимость МНЧ от вариаций $foF2$; б) – зависимость МНЧ от вариаций
 $foF1$

На рисунке 6 представлены графики зависимости МНЧ от высот максимумов слоев $F1$ и $F2$. График зависимости МНЧ от высоты hm слоя $F2$, показанный на рис. 6а, был получен при фиксированных значениях других параметров профиля $h(fo)$: $hmE = 115 \text{ км}$, $hmF1 = 120 \text{ км}$, $foE = 3 \text{ МГц}$, $foF1 = 3.5 \text{ МГц}$, $foF2 = 11 \text{ МГц}$. Видно, что с ростом hm величина МНЧ линейно падает.

На рис. 5б показан график зависимости МНЧ от высоты $hmF1$ и здесь МНЧ растет почти линейно с ростом величины $hmF1$. При этом были зафиксированы другие параметры профиля $h(fo)$: $hmE = 115$ км, $hm = 280$ км, $foE = 3$ МГц, $foF1 = 4$ МГц, $foF2 = 10$ МГц.

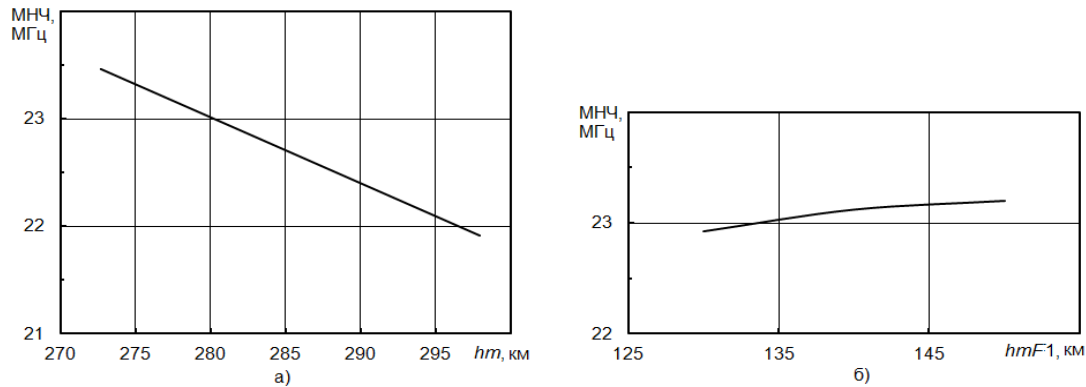


Рис. 6. Зависимость МНЧ от вариаций параметров профиля $h(fo)$: а) – зависимость МНЧ от вариаций hm ; б) – зависимость МНЧ от вариаций $hmF1$

Зависимость МНЧ от вариаций параметров E -слоя представлена на рис. 7. На рисунке 7а показана зависимость МНЧ от максимальной частоты слоя foE при фиксированных значениях других параметров профиля $h(fo)$: $hmE = 105$ км, $hmF1 = 150$ км, $hm = 270$ км, $foF1 = 3.6$ МГц, $foF2 = 11$ МГц. Видно, что МНЧ слабо зависит от foE и имеет незначительный понижающий тренд, который не превышает по величине ~ 0.05 МГц. График зависимости МНЧ от вариаций величины hmE , показанный на рис. 7б, был получен при фиксированных значениях других параметров профиля $h(fo)$: $hmF1 = 150$ км, $hm = 270$ км, $foE = 3$ МГц, $foF1 = 3.6$ МГц, $foF2 = 9.5$ МГц. Здесь видно, что величина МНЧ почти не зависит от hmE и может лишь незначительно меняться на величину менее ~ 0.04 МГц.

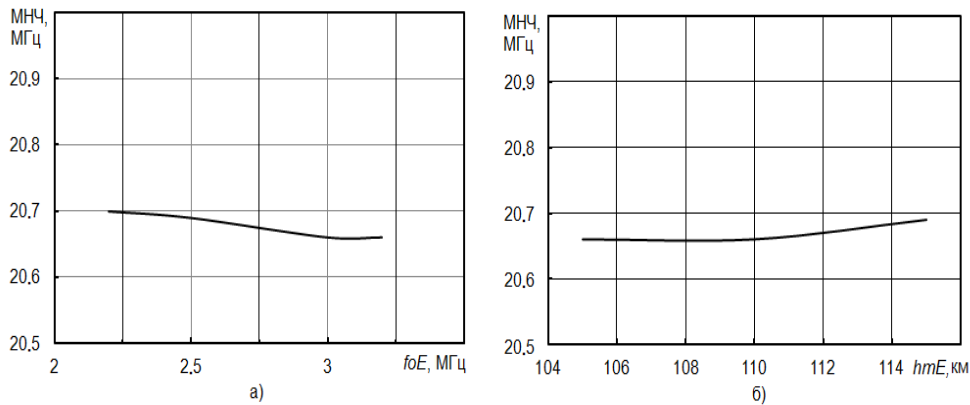


Рис. 7. Зависимость МНЧ от вариаций параметров слоя E : а) – зависимость МНЧ от вариаций foE ; б) – зависимость МНЧ от вариаций hmE

Результаты моделирования показывают, что наибольшее влияние на МНЧ трассы оказывает величина критической частоты $foF2$ с коэффициентом роста МНЧ $k_2 \approx 2$. Зависимость МНЧ от величины $foF1$ оказывается обратной и имеет значение коэффициента убывания МНЧ $k_1 \approx -1$. Влияние параметров высоты максимумов слоев hm и $hmF1$ также различаются: для слоя $F2$ коэффициент убывания МНЧ оценивается как $\gamma_2 \approx -0.06$ МГц/км, а для слоя $F1$ имеем коэффициент роста МНЧ $\gamma_1 \approx 0.01$ МГц/км. Для параметров слоя E моделирование показало, что при известных из практики ионосферных наблюдений вариаций значений foE и hmE , величина МНЧ изменяется мало и находится в пределах погрешности измерения МНЧ. Полученное различие вкладов различных параметров профиля $h(fo)$ в расчет МНЧ можно использовать при решении модельной обратной задачи для определения $foF2$ в средней точке трассы.

Будем считать, что значения параметров foE , hmE , $foF1$ и $hmF1$ известны из данных ВЗ в пункте приема и, в силу сферически-слоистой структуры ионосферы, являются таковыми и в средней точке

трассы. Аналогично будем считать, что высота максимума ионосферы hm в средней точке трассы известна, а искомой величиной является значение критической частоты $foF2$ в средней точке трассы.

Тогда обратная задача поиска $foF2$ в средней точке трассы сводится к минимизации разницы между расчетным значением МНЧ и экспериментально наблюдаемым значением МНЧ-Э, т. е. величины

$$\Delta f_{\text{МНЧ}} = \sqrt{(f_{\text{МНЧ}} - f_{\text{МНЧ-Э}})^2} \quad (7)$$

где $f_{\text{МНЧ}}$ – расчетное значение МНЧ, $f_{\text{МНЧ-Э}}$ – экспериментальное значение МНЧ.

Таким образом, численный алгоритм поиска $foF2$ в средней точке трассы состоит в вариационном поиске минимума величины $f_{\text{МНЧ}}$ по формуле (7), при котором начальное значение $f_{\text{МНЧ}}$ вычисляется при значении $foF2$, полученном путем ВЗ в пункте приема.

4. ОЦЕНКА $foF2$ НА ЭКСПЕРИМЕНТЕЛЬНОЙ ТРАССЕ НЗ СОДАНКЮЛА-МОСКВА

Методика решения модельной обратной задачи была применена для оценки величины $foF2$ в средней точке трассы Соданкюла-Москва в экспериментах по наклонному зондированию ионосферы 23.03.2016 г. В пункте приема Москва в ИЗМИРАН (55.5 N 37.3 E) проводилась регистрация сигналов НЗ от передатчика ЛЧМ-ионозонда, расположенного в г. Соданкюла (67.4 N 26.6 E), Финляндия. При решении модельной обратной задачи в качестве априорной информации использовались результаты анализа ионограмм ВЗ, регистрируемых в ИЗМИРАН. На рисунке 8 показаны ионограмма ВЗ и модельные профили, которые использовались при расчетах. Исходная ионограмма ВЗ, зарегистрированная в 09:00 UT 23.03.2016 г., представлена на рис. 8а), там же сплошной линией показан восстановленный из ионограммы профиль $h(f_o)$ для пункта приема.

Модельные расчетные профили $h(f_o)$ показаны на рис. 8б), где сплошной линией (кривая 1) показан модельный профиль $h(f_o)$ для исходной ионограммы ВЗ, а точками (кривая 2) показан скорректированный модельный профиль $h(f_o)$ для средней точки трассы. Основные параметры исходного модельного профиля $h(f_o)$ на рис. 5б, (кривая 1), были заданы следующие: $foF2 = 8$ МГц, $hmF2 = 268$ км, $foF1 = 4.3$ МГц, $hmF1 = 177$ км, $foE = 3.2$ МГц, $hmE = 110$ км. Эти параметры соответствуют параметрам исходного профиля на рис. 8а (сплошная линия) и которые приводятся в комментариях к ионограммам ионозонда ПАРУС-А на сайте ИЗМИРАН.

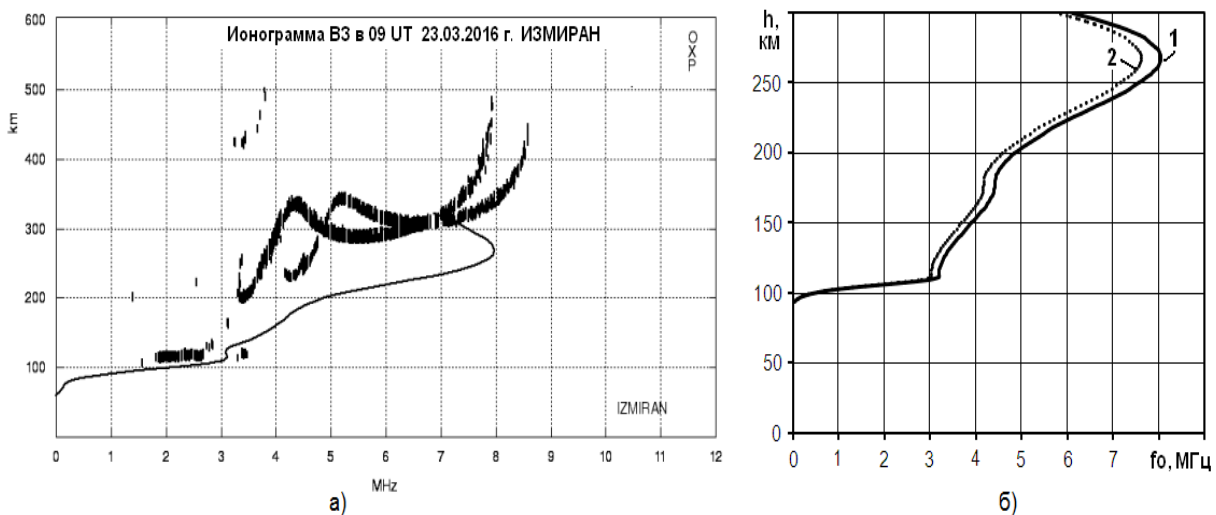


Рис. 8. Ионограмма ВЗ и модельные профили $h(f_o)$: а) – фрагмент ионограммы ВЗ, снятой в ИЗМИРАН в 09:00 UT 23.03.2016 г.; б) – модельные профили $h(f_o)$, кривая 1 соответствует профилю $h(f_o)$ на левой панели а), кривая 2 - скорректированный модельный профиль $h(f_o)$

Скорректированный модельный профиль $h(f_o)$ (кривая 2 на рис. 8б) был получен в результате решения модельной обратной задачи НЗ. В рассмотренном случае коррекция исходного модельного

профиля $h(f_o)$ для средней точки трассы состояла в изменении параметра $foF2$ от значения $foF2 = 8$ МГц к значению $foF2 = 7.6$ МГц.

На рисунке 9 представлены ионограммы НЗ: а) – фрагмент экспериментальной ионограммы ЛЧМ на трассе Финляндия-Москва, измеренной в 09:00 UT 23.03.2016 г.; б) – модельные ионограммы. На экспериментальной ионограмме видно, что значение МНЧ-ОЭ = 15.5 МГц, а значение, МНЧ-ХЭ = 15.9 МГц. Модельные ионограммы на рис. 9-б) были рассчитаны по скорректированному модельному профилю $h(f_o)$ на рис. 8-б), (кривая 2). Здесь получено, что значение МНЧ-О = 15.55 МГц, а значение МНЧ-Х = 15.9 МГц. В рассмотренном случае погрешность расчетов МНЧ составляет величину $\Delta f \sim 0.05$ МГц и это соответствует инструментальной точности метода ЛЧМ-зондирования. Сравнение расчетных и экспериментальных МНЧ дает оценку для величины невязки $f_{\text{МНЧ}} \leq 0.1$ МГц, тогда для относительной погрешности оценки МНЧ получим величину $\delta f \sim 1.3$ %. Такое значение δf можно считать оценкой методической погрешности решения обратной задачи НЗ.

Полученная здесь оценка величины $foF2 = 7.6$ МГц для середины трассы Финляндия-Москва близка к значению $foF2 \sim 7.5$ МГц, которое наблюдалось в 09:00 UT на ионограммах ВЗ в обсерватории Воейково, СПФ ИЗМИРАН, (Воейково находится на расстоянии ~ 200 км к юго-западу от средней точки трассы НЗ). Если предположить, что в средней точке трассы трассы Финляндия-Москва близка величине $foF2$, наблюдаемой в обсерватории Воейково, то относительную погрешность $\delta foF2$ оценки величины $foF2$ для средней точки трассы можно оценить как $\delta foF2 \sim 1.3$ %. Поэтому в рассмотренном случае, учитывая погрешность экспериментальной оценки МНЧ, получим, что полная величина относительной погрешности оценки величины $foF2$ для средней точки трассы НЗ составляет $\delta foF2 \sim 2.6$ %.

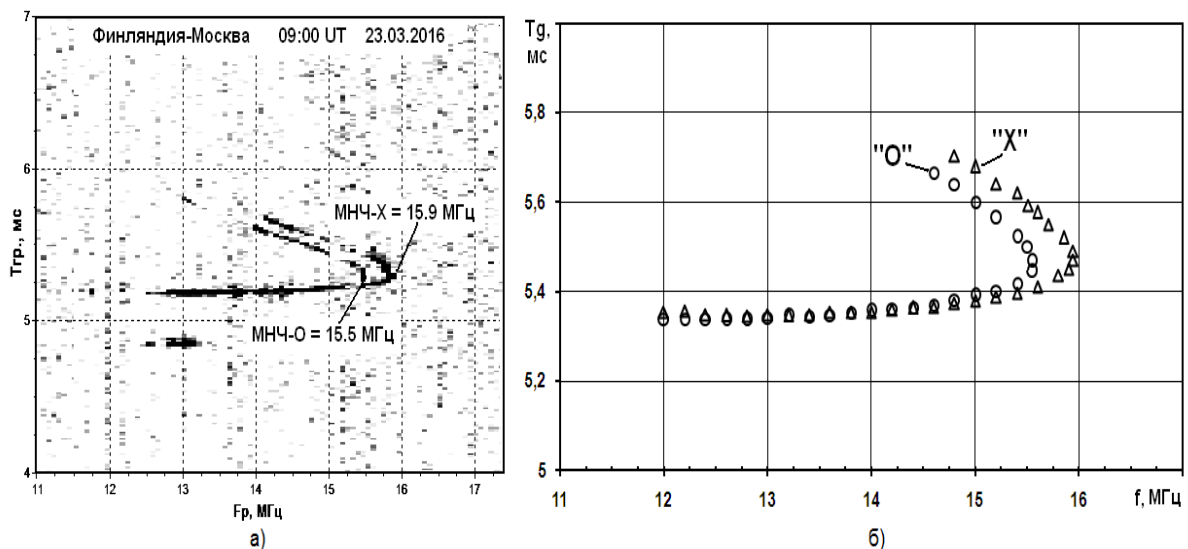


Рис. 9. Сравнение экспериментальной и расчетной ионограмм: а) – фрагмент ионограммы НЗ на трассе Финляндия — Москва, измеренной в 09:00 UT 23.03.2016 г.; б) – модельные ионограммы для “О”-волны (кружочки) и для “Х”-волны

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Как известно, методики решения обратных задач зондирования ионосферы основываются на алгоритмах решения прямой задачи расчета характеристик распространения радиоволн в неоднородной ионосфере. Корректность и точность решения обратной задачи зависит от априорной информации, которая используется для задания ионосферы и для решения задачи распространения радиоволн.

Приближение сферически-слоистой модели ионосферы для решения обратной задачи НЗ может использоваться в условиях спокойной ионосферы на трассах длиной до 2000 км, как это показано в работах [8], [9]. При этом оценка точности методики, проведенная путем сравнения с экспериментальными данными на однокачковой трассе НЗ, показала, что погрешность составляет порядка 5%. В работе [9] для более точной оценки $foF2$ было предложено использовать параметры верхнего луча ионограммы НЗ, а именно задержку и частоту сигнала в т. н. «последней» точке

наблюдаемого трека верхнего луча. Однако измерение параметров сигнала НЗ в этой «последней» точке может быть затруднено из-за малого уровня принимаемого сигнала. С другой стороны, в расчетах ДЧХ необходимо учитывать анизотропию ионосферы ввиду того, что измерение МНЧ при использовании современных ЛЧМ-зондов имеет погрешность ~ 0.05 МГц, а использование в расчетах изотропного приближения дает смещенную оценку МНЧ ~ 0.3 МГц.

Другим важным аспектом постановки обратной задачи является используемая модель высотного хода $Ne(h)$ или высотного профиля плазменной частоты $h(f_o)$. При выборе модели профиля $h(f_o)$ оправдано использование таких модельных функций, которые допускают аналитический расчет ДЧХ в приближении изотропной ионосферы. В условиях среднеширотной дневной ионосферы необходимо использование трехслойной модели профиля $h(f_o)$, в котором есть слои E , $F1$ и $F2$. В работе [7] высотный профиль задавался в виде 3-х слоев Чепмена и было получено, что методическая погрешность решения обратной задачи не превышала 0.1%. В данной работе также использована аналитическая трехслойная модель $Ne(h)$ [14], в которой профиль $h(f_o)$ зависит в основном от 6 параметров - критической частоты и высоты максимума в каждом слое. Путем численного моделирования был исследован вклад каждого слоя в расчетное значение МНЧ на трассе НЗ и получено, что в наибольшей степени МНЧ зависит от критической частоты f_oF2 . Если в приемном пункте трассы НЗ по ионограмме ВЗ получены значения всех 6 параметров профиля $h(f_o)$, то, в силу сферически-слоистой модели ионосферы, эти параметры, за исключением величины f_oF2 , можно приписать и профилю в средней точке трассы. Таким образом, задача определения величины f_oF2 может быть сведена к минимизации невязки $f_{\text{МНЧ}}$ по формуле (7).

Представленная методика решения обратной задачи может рассматриваться как первый этап решения задачи в дальнейшем может быть усовершенствована. Следующим этапом, уточняющим полученное на первом этапе решение, может быть расчет МНЧ с учетом отклонения от сферически-слоистой структуры ионосферы путем введения градиента f_oF2 вдоль трассы НЗ в соответствии с профилем $h(f_o)$ на рис. 8б, кривая 2.

При оценке погрешности решения обратной задачи важно учитывать инструментальную точность измерения характеристик радиоволн на трассе НЗ. При расчете ДЧХ для трассы НЗ достаточно использование лучевого приближения при расчете траекторных характеристик, при котором, например, точность расчета дальности Δd скачка можно ограничить с учетом размера зоны Френеля в точке приема. Величина Δd может быть связана также с точностью измерения задержки, которая при ЛЧМ-зондировании может быть ~ 50 мкс, что приводит к выбору $\Delta d < 15$ км. Такой критерий выбора Δd дает, например, для трассы НЗ с $D = 2000$ км, оценку погрешности расчета ДЧХ $< 1\%$.

Оценивая погрешности измерения ионограмм НЗ по отношению к методике расчета траекторных параметров можно сказать, что погрешность расчетов ДЧХ и МНЧ вносит значительно меньший вклад в общую погрешность решения обратной задачи. Экспериментальная проверка на трассе НЗ Соданкюла-Москва показала, что разработанная методика решения модельной обратной задачи позволяет проводить достаточно быструю оценку параметра f_oF2 для середины трассы НЗ с точностью порядка 3 %.

Предлагаемая методика была апробирована для условий равноденствия и спокойных ионосферных условиях, поэтому для дальнейшего развития методики целесообразно провести экспериментальное исследование на сети трасс НЗ в различные сезоны года и различных геофизических условиях. При постановке таких исследований на сети трасс важно обеспечить режим более частой (например, 5 мин) регистрации одновременно ионограмм НЗ и ВЗ, [11]. При этом необходимо создать ряд контрольных пунктов ВЗ в средних точках трасс, как это делалось в [9]. Такие исследования позволят изучать пространственно-временную структуру ионосферы и более адекватно оценивать время стационарности получаемых решений обратной задачи и соответствующих значений критической частоты f_oF2 в регионе.

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Разработана методика расчета МНЧ на трассах НЗ, основанная на решении краевой вариационной задачи с учетом двух факторов – геометрии траектории и параметров фокусировки луча. Путем численного моделирования ионограмм НЗ были исследованы вариации величины МНЧ в зависимости от вариаций основных параметров профиля $h(f_o)$, что позволило разработать

приближенную методику решения модельной обратной задачи по определению величины $foF2$ для середины трассы НЗ. Дальнейшее развитие методики может быть связано с привлечением двухскачковой моды, что позволит получить оценку величины $foF2$ в других частях трассы НЗ.

Проведенное на примере экспериментальной трассы НЗ Соданкюла — Москва решение модельной обратной задачи позволило получить оценку величины $foF2$ для средней точки трассы с относительной погрешностью не более 3%. Повышения точности решения модельной обратной задачи возможно при использовании данных ВЗ, полученных одновременно в приемном и передающем пунктах трассы НЗ.

Разработанная методика дистанционной оценки $foF2$ по ионограммам НЗ может быть использована для регионального мониторинга ионосферы и исследования нестационарных процессов на высотах максимума слоя $F2$. Методика также может применяться для повышения точности корректировки модели ионосферы IRI в задачах краткосрочного прогноза условий распространения радиоволн.

ЛИТЕРАТУРА

1. Калинин Ю.К., Алтатов В.В., Ретин А.Ю., Щелкалин А.В. Вопросы вертикального и наклонного зондирования ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2018. Вып. 20. С. 87–123.
2. Крашенинников И. В., Павлова Н. М., Ситнов Ю. С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрномия. 2017. Т. 57, № 6, С. 774–782.
3. Анишин М.М., Радио Л.П. Опыт применения ионосферной модели IRI-2012 для прогнозирования МПЧ на ВЧ-трассах // Гелиогеофизические исследования. 2015. Вып. 11. С. 13–18.
4. Ильин Н.В., Бубнова Т.В., Грозов В.П. Пензин М.С., Пономарчук С.Н. Оперативный прогноз МПЧ радиотрасс по текущим данным наклонного зондирования ионосферы непрерывным ЛЧМ-сигналом // Солнечно-земная физика. 2018. Т. 4. № 3. С. 103–113. - DOI <https://doi.org/10.12737/szf-43201811>.
5. Крашенинников И.В., Лобачевский Л.А., Лянной Б.Е., Снеговой А.А. Оценка высотного распределения электронной концентрации по ионограмме наклонного зондирования ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1983. Т. 23, № 5, С. 727–732.
6. Крашенинников И.В. Обратная задача НЗ в классе функций с непрерывным высотным градиентом электронной концентрации / Взаимодействие высокочастотных радиоволн с ионосферой. М.: ИЗМИРАН. 1989. С. 122–128.
7. Михайлов С.Я., Грозов В.П. Реконструкция немонотонного высотного профиля плазменной частоты по данным наклонного зондирования ионосферы // Изв. ВУЗов. Радиофизика. 2013. Т. 56. № 7. С.443–457.
8. Ларюнин О.А., Подлесный А.В., Романовский Ю.А. Интерпретация ионограмм наклонного зондирования в приближении сферически - слоистой ионосферы // Солнечно-земная физика. 2015. Т.1, №4. С.66-81.
9. Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я., Грозов В.П., Михайлов Я.С. Определение критической частоты $foF2$ в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэрномия. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.
10. Борисова Т.Д., Благовещенская Н.Ф., Калинин А.С. Прогнозирование условий распространения декаметровых радиоволн в арктическом регионе. // Проблемы Арктики и Антарктики. 2017. № 3 (113). С. 78–86.
11. Литвинов С.В., Паньшин Е.А., Качановский Ю.М., Алексеева А.В. Проведение работ по исследованию расширения функциональных возможностей ионозонда «Парус-А» государственной сети Росгидромета // Гелиогеофизические исследования. 2019. Вып. 21. С. 32–39.
12. Крюковский А.С., Лукин Д.С., Кирьянова К.С. Метод расширенной бихарактеристической системы при моделировании распространения радиоволн в ионосферной плазме // Радиотехника и электроника. 2012. Т. 57. № 9. С. 1028–1034.
13. Ким В.Ю. О расчете интенсивности радиоволн, распространяющихся в области искусственного возмущения ионосферы / Взаимодействие декаметровых радиоволн с ионосферой. М.: ИЗ-МИРАН. 1985. С. 40–53.
14. Гуревич А.В., Фишук Д.И., Цедилина Е.Е. Трехмерная аналитическая модель распределения электронной концентрации спокойной ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. 1973. Т 13. № 1. С. 31–40.

METHODOLOGY FOR ESTIMATING THE CRITICAL FREQUENCY OF THE IONOSPHERE AT ONE HOP OBLIQUE SOUNDING PATH

Kim V. Yu.

A new technique of ionosphere critical frequency of $F2$ layer finding by data of oblique sounding are presented. Algorithms developed have based on multifactor variation problem, including ray tracing characteristics calculation and focusing parameter. Based on the study of the dependence of the MOF value on the main parameters of the three-layer ionosphere, a method for solving the model inverse problem of determining the value of $foF2$ for the middle of the route has been developed. By comparing calculations with experimental data, it is shown that the critical frequency of the ionosphere in the region above the middle of the route can be estimated with an error of less than 3%.

KEYWORDS: IONOSPHERE, OBLIQUE SOUNDING, RADIO PATH, MAXIMUM OBSERVED FREQUENCY (MOF)