

## **Оценка критической частоты слоя $F2$ ионосферы на трассе наклонного зондирования**

В. Ю. Ким

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им Н.В. Пушкова Российской академии наук, ИЗМИРАН*

*108840, г. Москва, г. Троицк, Калужское ш. 4*

*E-mail: [ykim@izmiran.ru](mailto:ykim@izmiran.ru)*

*Представлена методика определения критической частоты слоя  $F2$  ионосферы по данным наклонного зондирования. Разработан алгоритм расчета МПЧ на основе решения многофакторной вариационной задачи, включающей расчет траекторных характеристик распространения и параметров фокусировки радиоволн. Показано, что критическая частота ионосферы в области над серединой трассы может оцениваться с погрешностью менее 3 %. Ключевые слова: ионосфера, наклонное зондирование, максимально применимая частота (МПЧ)*

### **Estimation of the ionosphere critical frequency $F2$ layer at oblique sounding path**

V. Yu. Kim

IZMIRAN

*The technique of ionosphere critical frequency of  $F2$  layer finding by data of oblique sounding are presented. Algorithm are developed have based on multifactor variation problem, including ray tracing characteristics calculation and focusing parameter. The critical frequency can be estimated of the ionosphere on half-path area with errors less than 3 % are shown.*

*Keywords: ionosphere, oblique sounding, radio path, maximum observed frequency (MOF)*

### **Введение**

В задачах прогнозирования распространения радиоволн в ионосфере широко применяется международная модель ионосферы IRI [1], [2], [3]. Важным и актуальным является вопрос о погрешности расчетов МПЧ и способов коррекции модели IRI для повышения точности прогноза. В работе [1] было показано, что при использовании модели IRI-2012 для прогноза суточных ходов параметров ионосферы может приводить к погрешности в 20 % при расчете МПЧ. В [2] показано, что при коррекции IRI-2012 по данным вертикального зондирования (ВЗ) в передающем пункте погрешность прогноза МПЧ составила 7.2 %, а при использовании данных ВЗ в середине трассы погрешность снизилась до 5.9 %. В работе [3] для улучшения оперативного прогноза использовался прогнозный ход максимальных наблюдаемых частотой (МНЧ) на трассе наклонного зондирования (НЗ) и было получено, что погрешность прогноза МПЧ не превышает 10%.

При исследовании влияния восходных явлений в ионосфере на распространение радиоволн [4], а также для повышения точности прогноза МПЧ, актуально повышение точности методов дистанционного зондирования ионосферы. В данной работе развивается методика оценки критической частоты ионосферы  $foF2$  в средней точке трассы НЗ с использованием ионограммы ВЗ в пункте приема сигналов НЗ. Методика основана на численном решении модельной обратной задачи НЗ, включающей

траекторный синтез ионограмм НЗ для расчета МНЧ и учет результатов анализа ионограмм ВЗ.

### Методика траекторных расчетов для поиска МПЧ

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.

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 ионосфере существуют хорошо разработанные алгоритмы, которые в рамках ГО позволяют рассчитывать весь набор характеристик радиоволн в ионосфере [5].

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  $T(x_0, y_0, z_0)$  попадает в точку приема  $R(x_1, y_1, z_1)$  на дальности  $D(f_M) = D_0$ .

В процессе анализа ионограмм при поиске МНЧ важную роль играет оценка уровня сигнала в пункте приема, который при  $f \sim$  МНЧ находится вблизи границы «мертвой зоны». В этой зоне поле радиоволн характеризуется фокусировкой на каустике [4], и это можно учесть при разработке методики расчета МНЧ. Для учета фактора фокусировки при численном моделировании можно использовать методику приближенного расчета интенсивности поля радиоволн, предложенную в [6] для оценки влияния искусственной неоднородности на распространение радиоволн.

Поскольку обычно для траекторного расчета ионограмм НЗ используются поисковые алгоритмы попадания луча в точку приема, то для приемлемой точности оценки МНЧ следует выбрать допустимую погрешность  $\Delta d$  при вычислении дальности скачка  $D$ . Погрешность расчета  $\Delta d$  можно оценить исходя из следующих факторов, связанных с анализом параметров реальных ионограмм. Основным измеряемым параметром при НЗ является групповая задержка зондирующего сигнала  $t_{gp}$ , имеющая обычно погрешность измерения  $\Delta t_{gp} \sim 50$  мкс, что соответствует погрешности по дальности  $\sim 7.5$  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 частотах  $f >$  МНЧ быстро спадает и пункт приема оказывается в “мертвой зоне”. На реальных ионограммах при  $f = f_{\text{МНЧ}}$  интенсивность сигнала  $W(t_{gp})$  имеет максимальное значение при  $D \sim D_0$ , поэтому можно использовать эту особенность поведения величины  $W$  как дополнительный фактор при расчете МНЧ.

Для учета поведения величины  $W(t_{gp})$  при траекторном поиске МНЧ можно проводить вдоль траектории луча расчет фактора геометрической фокусировки поля по формуле

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

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

$$W(t_{zp}) = 1/J(t_{zp}), \quad (2)$$

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

$$J(t_{zp}) = \frac{D(x, y, z)}{D(t, k_{0x}, k_{0y})}, \quad (3)$$

Тогда фактор фокусировки  $\Psi(t_{zp})$  можно рассчитывать по формуле

$$\Psi(t_{zp}) = J(t_{zp})/J_0, \quad (4)$$

где  $J_0$  - якобиан расходимости лучей в свободном пространстве. Здесь величину  $J_0$  вдоль луча будем оценивать формулой

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

тогда для фактора фокусировки вместо (4) получим формулу

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

Ясно, что в свободном пространстве  $\Psi(t_{zp}) = 1$ .

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 угла  $\alpha_0$ ;

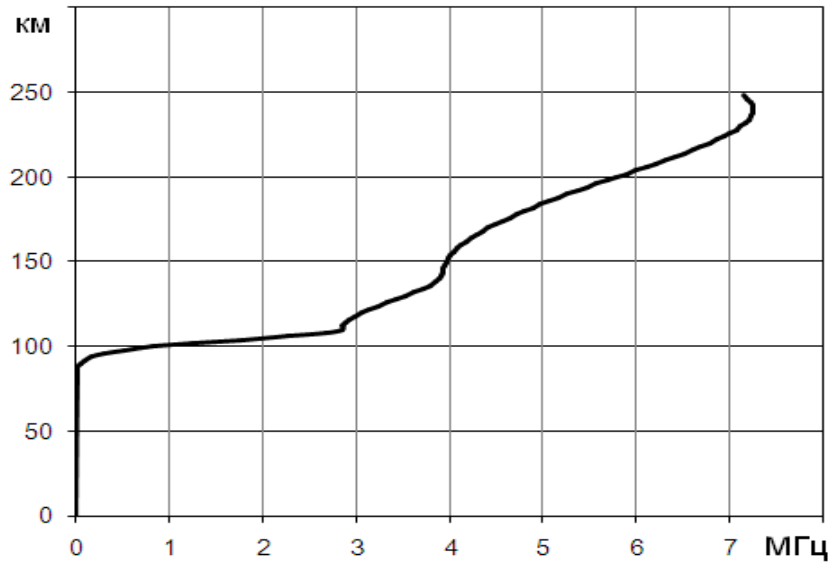
2. Фактор фокусировки  $\Psi(\alpha_0)$  достигает максимума на дальности  $D(\alpha_0) \approx D_0$ .

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  $\alpha_0$ , при котором выполнится условие 1 и  $D(\alpha_0) \approx D_0$ . С учетом этих критериев был разработан комплексный алгоритм поиска МНЧ на однокачковой трассе НЗ ионосферы.

### Результаты численного моделирования

Модельные расчеты проводились с использованием глобальной аналитической модели ионосферы [7], которая была разработана для исследования сверхдальнего распространения радиоволн. Аналитическое задание высотного профиля  $fo(h)$  позволяет сравнительно просто изменять основные параметры ионосферы в её различных слоях без потери гладкой непрерывности составляющих его функций и это обеспечивает высокую точность траекторных расчетов. Модель ионосферы полагалась сферически-слоистой неоднородной средой, а основными варьируемыми параметрами были высота максимума  $hm$  и величина критической частоты  $foF2$ . Например, для описания вечернего подъема высоты максимума слоя на величину  $\Delta h$  достаточно прибавить  $\Delta h$  к значениям оси ординат  $h$ . Для описания роста  $foF2$  можно просто умножить  $fo$  на некоторую константу и это будет моделировать пропорциональный рост плазменной частоты  $fo$  (или электронной концентрации  $N_e$ ) на высотах ионосферного слоя.

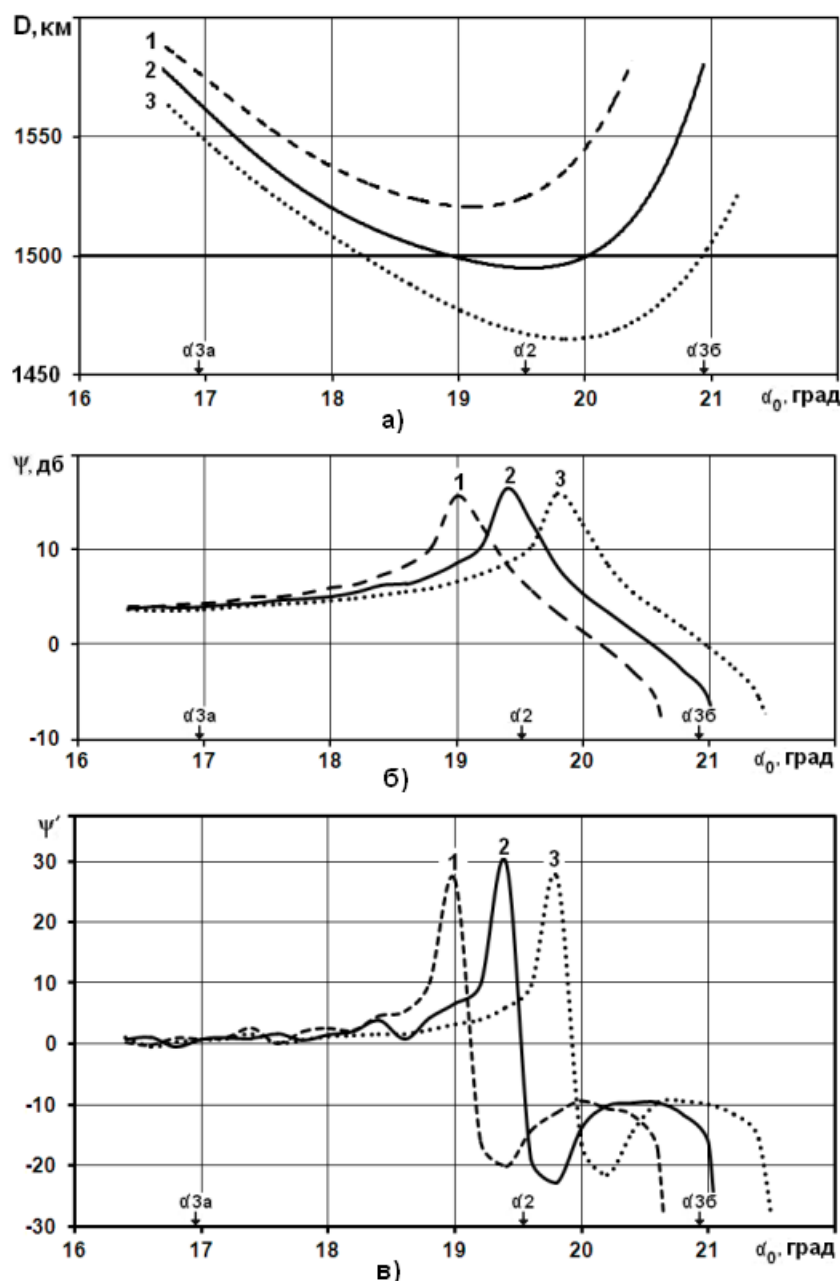


**Рис.1. Модельный профиль  $h(f)$ :  $foF2 = 7.2$  МГц,  $hmF2 = 240$  км,  $foF1 = 3.9$  МГц,  $hmF1 = 142$  км,  $foE = 2.9$  МГц,  $hmE = 110$  км.**

Отработки численной методики поиска МНЧ проводилась с помощью модельных расчетов для односкачковой трассы длиной  $D_0 = 1500$  км, ориентированной по меридиану. Полагалось также, что в области отражения зондирующих радиоволн на высоте  $\sim 250$  км гирочастота электронов  $f_g = 1.3$  МГц, а угол наклона вектора магнитного Земли к местной вертикали задавался равным  $19^\circ$ . Расчеты проводились с использованием аналитического профиля  $h(f)$ , показанного на рис. 1, 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 рис. 2 представлен пример, иллюстрирующий процедуру поиска МНЧ для волны “обыкновенной” поляризации. На рис. 2-а) показаны графики дистанционно-угловых характеристик (ДЧХ)  $D(\alpha_0)$  для частот  $f_1 = 16.6$  МГц (кривая 1),  $f_2 = 16.4$  МГц (кривая 2),  $f_3 = 16.2$  МГц (кривая 3). На рис. 2-б) показаны графики фактора фокусировки  $\Psi(\alpha_0)$  для частот  $f_1 = 16.6$  МГц (кривая 1),  $f_2 = 16.4$  МГц (кривая 2) и  $f_3 = 16.2$  МГц (кривая 3). На рис. 2-в) представлены графики производной  $\Psi'(\alpha_0)$  на соответствующих частотах. На рис. 2-а) видно, что на частоте  $f_1 = 16.6$  МГц (кривая 1) для всех  $\alpha_0$  имеем  $D(\alpha_0) > D_0$ , при этом максимальное значение фокусировки  $\Psi(\alpha_0) = 16$  дБ достигается при  $\alpha_0 = 19^\circ$ . рис. 2-б), (кривая 1). Это значит, что точка наблюдения находится в “мертвой зоне” для частоты  $f_1$ . На ДЧХ для частоты  $f_2 = 16.4$  МГц, рис. 2-а), (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 рис. 2-б), (кривая 2), видно, что максимум фокусировки  $\Psi(\alpha_0) \approx 17$  дБ достигается для углов выхода  $\alpha_0 \approx \alpha_2$  (показано стрелкой на оси  $\alpha_0$ ). Кроме того на рис. 2-в), (кривая 2), можно видеть, что функция  $\Psi'(\alpha_0)$  переходит через нулевое значение к отрицательным значениям при  $\alpha_0 \approx \alpha_2$ . 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 можно

заключить, что значение МНЧ для данной модельной трассы равно  $\text{МНЧ-О} = f_2 = 16.4$  МГц.

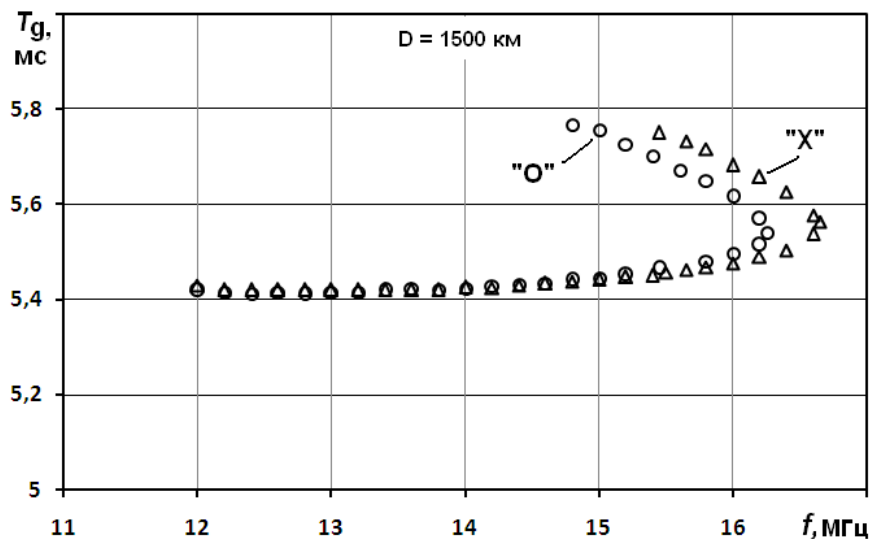


**Рис. 2.** Расчетные графики зависимости от угла  $\alpha_0$ : а) – дальности  $D(\alpha_0)$ ; б) – фактора  $\Psi(\alpha_0)$ ; в) величины  $\Psi'(\alpha_0)$ ; для зондирующих частот:  $f_1 = 16.6$  МГц (кривая 1);  $f_2 = 16.4$  МГц (кривая 2);  $f_3 = 16.2$  МГц (кривая 3)

Для частоты  $f_3 = 16.2$  МГц на рис. 2-а), (кривая 3), видно, что график ДЧХ 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. 2-б), (кривая 3), видно, что максимум  $\Psi(\alpha_0) \approx 16$  дБ при углах  $\alpha_0 \approx 20^\circ$ , однако при этом величина  $\Delta D(\alpha_0)$

достигает значения  $\Delta D(\alpha_0) \approx 30$  км и поэтому частота  $f_3 = 16.2$  МГц не может быть принята как значение МНЧ.

На рис.3 представлена ионограмма НЗ для рассматриваемой трассы НЗ с модельным прифилем  $h(f_0)$ , показанным на рис. 1. Ионограмма была рассчитана на дискретной сетке частот, здесь размер значков соответствует погрешности расчетов групповой задержки сигналов  $T_g$ , т.е. величине  $\Delta T_g = \pm 20$  мкс.



**Рис. 3. Расчетная ионограмма для трассы НЗ с  $D = 1500$  км. Ионограмма для “О” компоненты показана кружочками, для “Х” компоненты – треугольными значками.**

Расчет МНЧ для “О” волны дал значение МНЧ-О = 16.25 МГц, а для “Х” волны - значение МНЧ-Х = 16.65 МГц. Тогда для величины МПЧ рассматриваемой трассы получим МПЧ = МНЧ-Х = 16.7 МГц с погрешностью не более  $\Delta f = \pm 0.05$  МГц (т.е.  $\sim 0.6\%$ ) МГц и это вполне сопоставимо с погрешностью оценки МПЧ при анализе реальных ЛЧМ ионограмм НЗ.

На рис. 4. представлены результаты численных расчетов МНЧ-О при различных вариациях параметров  $foF2$  и  $hm$  модельных профилей  $h(f_0)$  ионосферы. На рис. 4-а) видно, что при фиксированной высоте  $hm = 240$  км с возрастанием  $foF2$  величина МНЧ ожидаемо растет почти линейно. При фиксированном значении  $foF2 = 7.24$  МГц, рис. 4-б) с ростом  $hm$  величина МНЧ падает и эта зависимость также имеют почти линейный характер. Аналогичные зависимости были получены для волны “Х” - поляризации. Полученные зависимости МНЧ от основных параметров профилей  $h(f_0)$  могут быть использованы для решения обратной задачи оценки величины  $foF2$  по ионограммам НЗ.

### **Оценка $foF2$ на экспериментальной трассе НЗ Финляндия-Москва**

Разработанная методика была применена для оценки величины  $foF2$  в экспериментах по наклонному ЛЧМ зондированию ионосферы на трассе Финляндия-Москва 23.03.2016 г. В г. Москве в ИЗМИРАН (55.5N 37.3E) проводилась регистрация сигналов НЗ от ЛЧМ-иозонда, расположенного в г. Соданкюла (67.4N 26.6E) в Финляндии.

Для решения модельной обратной задачи в качестве априорной информации использовались результаты анализа ионограммы ВЗ, регистрируемой в пункте приема сигналов НЗ. На рис. 5 показаны ионограмма и модельные профили, которые

использовались при модельных расчетах. Исходная ионограмма ВЗ, снятая в 09:00 UT 23.03.2016 г. в ИЗМИРАН, показана на рис. 5-а). Модельные профили  $h(f_o)$  показаны на рис. 5-б), где сплошной линией (кривая 1) показан модельный профиль  $h(f_o)$  исходной ионограммы ВЗ, а точками (кривая 2) показан скорректированный модельный профиль  $h(f_o)$ .

Основные параметры исходного модельного профиля  $h(f_o)$  на рис. 5-б), (кривая 1), были заданы следующие:  $f_oF2 = 8$  МГц,  $hmF2 = 268$  км,  $f_oF1 = 4.3$  МГц,  $hmF1 = 177$  км,  $f_oE = 3.2$  МГц,  $hmE = 110$  км. Эти параметры соответствуют параметрам профиля на рис. 5а (сплошная линия) и которые приводятся в комментариях к ионограммам ионозонда ПАРУС-А на сайте ИЗМИРАН. При расчете лучевых траекторий угол наклона вектора магнитного Земли к местной вертикали в средней точке трассы брался равным  $17^\circ$ .

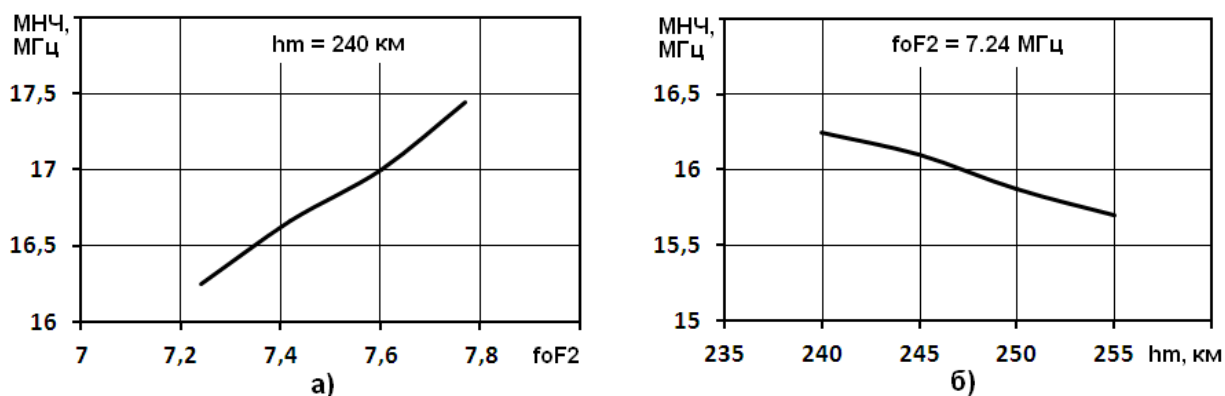


Рис. 4. Зависимость МНЧ от вариаций параметров профиля  $h(f_o)$ ; а) – зависимость МНЧ от вариаций  $f_oF2$ ; б) – зависимость МНЧ от вариаций  $hm$

Скорректированный модельный профиль  $h(f_o)$ , показанный кривой 2 на рис. 5-б), был получен путем минимизации разницы между расчетным значением МНЧ-О и экспериментально наблюдаемым значением МНЧ-ОЭ, т.е. величины

$$\Delta f_{\text{МНЧ}} = \sqrt{f^2_{\text{МНЧ-О}} - f^2_{\text{МНЧ-ОЭ}}}.$$

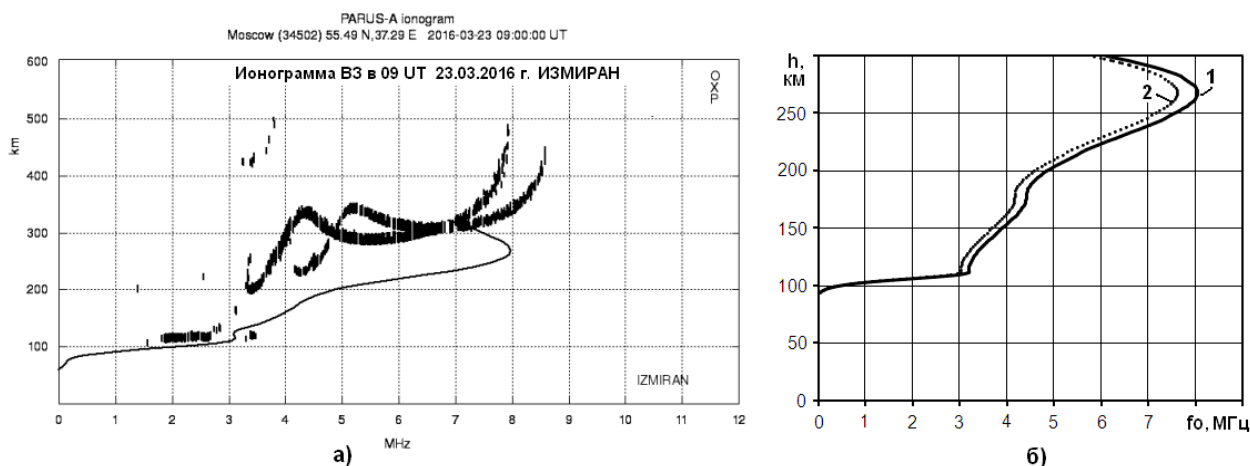
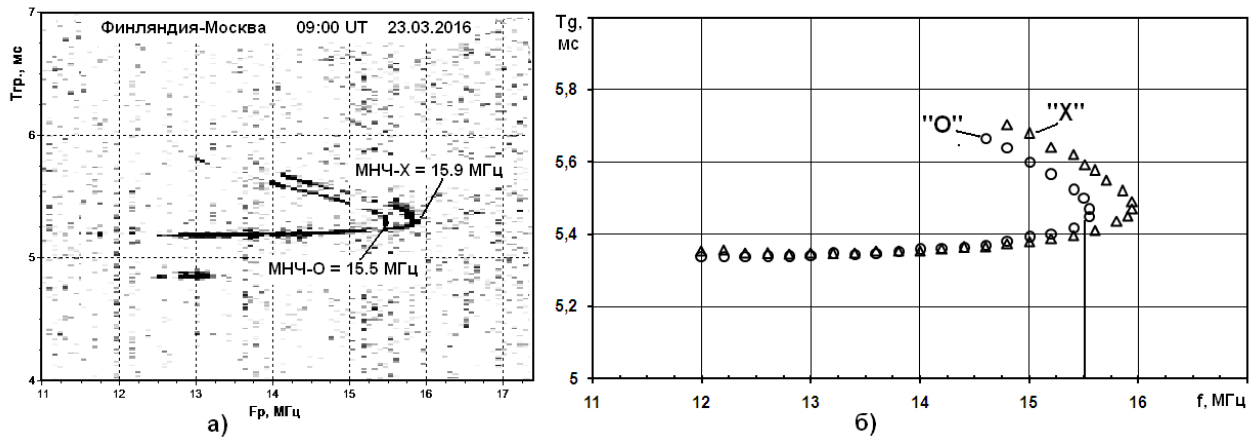


Рис. 5. Ионограмма ВЗ и модельные профили  $h(f_o)$ : а) – фрагмент ионограммы ВЗ, снятой в ИЗМИРАН в 09:00 UT 23.03.2016 г.; б) – модельные профили  $h(f_o)$ , кривая 1 соответствует профилю  $h(f_o)$  на рис а), кривая 2 - скорректированный модельный профиль  $h(f_o)$ .

В рассмотренном случае коррекция модельного профиля  $h(f_0)$  состояла в изменении параметра  $foF2$  от значения  $foF2 = 8$  МГц к значению  $foF2 = 7.6$  МГц.

На рис. 6 представлены ионограммы НЗ: а) - фрагмент экспериментальной ЛЧМ НЗ 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.



**Рис. 6. Сравнение экспериментальной и модельной 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.**

На рис. 6-б) представлена модельная ионограмма, которая была рассчитана по скорректированному профилю модельному профилю  $h(f_0)$ , рис. 5-б), (кривая 2), и здесь было получено, что значение МНЧ-О = 15.55 МГц, а значение МНЧ-Х = 15.9 МГц. В рассмотренном случае погрешность расчетов МНЧ составляла величину  $\Delta f \sim 0.05$  МГц и это соответствует инструментальной точности метода ЛЧМ-зондирования. Сравнение расчетных и экспериментальных МНЧ дает оценку для невязки  $\Delta f_{\text{МНЧ}} \leq 0.1$  МГц и тогда для относительной погрешности получим величину  $\delta f \sim 1.3$  %. Такое значение  $\delta f$  можно считать оценкой 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  $\sim 200$  км к юго-западу от средней точки трассы НЗ). Видно, что погрешность оценки величины  $foF2$  для средней точки трассы не превышает значение  $\Delta foF2 \sim 0.1$  МГц. Поэтому в рассмотренном случае получим, что величина относительной погрешности  $\delta foF2$  при оценке величины  $foF2$  для средней точки трассы НЗ составляет  $\delta foF2 \sim 2.6$  %.

Таким образом можно заключить, что разработанная методика решения модельной обратной задачи позволяет проводить оценку параметра  $foF2$  для середины трассы НЗ с точностью не хуже 3 %.

### Выводы

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  $h(f_0)$ , что позволило разработать методику оценки величины  $foF2$  для середины трассы НЗ.



Проведенное на примере экспериментальной трассы НЗ Финляндия-Москва решение модельной обратной задачи позволило получить оценку величины  $foF2$  для средней точки трассы с относительной погрешностью не более 3%.

Разработанная методика дистанционной оценки  $foF2$  по ионограммам НЗ может быть использована для регионального мониторинга ионосферы, а также для повышения точности корректировки модели ионосферы IRI.

### Литература

1. Крашенинников И. В., Павлова Н. М., Ситнов Ю. С. Модель IRI в задаче прогнозирования ионосферного прохождения радиоволн в условиях высокой солнечной активности // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 6, С. 774-782.
2. Анишин М.М., Радио Л.П. Опыт применения ионосферной модели IRI-2012 для прогнозирования МПЧ на ВЧ-трассах // Гелиогеофизические исследования. 2015. Выпуск 11. С. 13–18.
3. 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.
4. Ким В.Ю., Ружин Ю.Я. Экспериментальное исследование влияния движения зоны терминатора в сопряженной области ионосферы на наклонное распространение ВЧ радиоволн. Труды XXVII Всероссийской открытой научной конференции «Распространение радиоволн». [Электронный ресурс]: научное электронное издание. Калининград. Изд. БФУ им. И. Канта. 2021. С. 327-331
5. 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.
6. Ким В.Ю. О расчете интенсивности радиоволн, распространяющихся в области искусственного возмущения ионосферы / Взаимодействие декаметровых радиоволн с ионосферой. М.: ИЗМИРАН. 1985. С. 40–53.
7. Гуревич А.В., Фищук Д.И., Цедилина Е.Е. Трехмерная аналитическая модель распределения электронной концентрации спокойной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 1973. Т 13. № 1. С. 31–40.