

**ИНТЕРПРЕТАЦИЯ ИОНОГРАММ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ
В ПРИБЛИЖЕНИИ СФЕРИЧЕСКИ-СЛОИСТОЙ ИОНОСФЕРЫ****INTERPRETATION OF OBLIQUE-INCIDENCE IONOGRAMS
UNDER THE ASSUMPTION OF A SPHERICALLY STRATIFIED IONOSPHERE****О.А. Ларюнин***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, laroleg@inbox.ru***А.В. Подлесный***Институт солнечно-земной физики СО РАН,
Иркутск, Россия, pav1986@rambler.ru***О.А. Романовский***Институт оптики атмосферы СО РАН,
Томск, Россия, roa@iao.ru***O.A. Laryunin***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, laroleg@inbox.ru***A.V. Podlesnyi***Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS,
Irkutsk, Russia, pav1986@rambler.ru***O.A. Romanovskii***Institute of Atmospheric Optics SB RAS,
Tomsk, Russia, roa@iao.ru*

Аннотация. Ионограммы наклонного зондирования показывают, что трек ионограммы может иметь форму носа с характерной многолучевостью, где максимум соответствует максимальной применимой частоте. Однако ионограммы, полученные при зондировании на коротких трассах, имеют классический вид и внешне не отличаются от ионограмм вертикального зондирования. На основе геометрикооптического (лучевого) подхода в изотропном приближении исследовано изменение структуры ионограммы при варьировании дальности зондирования вдоль Земли. Показано, что многолучевость в слоистой среде может иметь место при любой дальности распространения, отличной от нуля, однако на коротких трассах разрешить многолучевость в эксперименте не представляется возможным.

Рассмотрены также возможности применения приближения сферически-слоистой ионосферы при зондировании на длинных радиотрассах (порядка тысяч километров). Проведено сравнение дальностно-частотных характеристик (ДЧХ), синтезированных в случае горизонтально-неоднородной ионосферы, заданной вдоль трассы моделью IRI-2012, а также в случае сферически-слоистой ионосферы, для которой высотный профиль не зависит от горизонтальной координаты и соответствует профилю IRI-2012 в средней точке трассы. Выявлено, что, несмотря на значительные изменения электронной концентрации вдоль трассы, ДЧХ в указанных двух случаях совпадают с точностью до долей процента таким образом, что вид ионограммы практически полностью определяется окрестностью средней точки радиотрассы.

Ключевые слова: ионосфера, наклонное зондирование, ионограмма.

Abstract. Oblique sounding ionograms show that an ionogram trace can be of nose shape with typical multipath for which the maximum corresponds to maximum usable frequency. However, ionograms obtained from sounding at short paths are of classical type and do not differ from vertical sounding ionograms in appearance. On the basis of ray tracing in isotropic medium we examined changes in ionogram structure when varying the ground range. It is shown that in a stratified medium, multipath can take place at any nonzero ground range though at short paths, to resolve multipathing in an experiment seems to be impossible.

Some possibilities for using the assumption of spherically stratified ionosphere when sounding at long radio paths (of the order of few thousand kilometers) are also under consideration. We compared the distance-frequency characteristics (DFC) produced for horizontally-nonuniform ionosphere defined along the path by IRI-2012 model, as well as for spherical-stratified ionosphere for which the height profile does not depend on horizontal coordinate and agrees with IRI-2012 profile in the middle point of the path. Although the electron density profiles exhibit significant variations along the path, DFCs agree with each other up to fraction of the percent. In this case, the form of the ionogram practically in everything is defined by the vicinity of radio path middle point.

Key words: ionosphere, oblique ionospheric sounding, ionogram.

ВВЕДЕНИЕ

В ряде предшествующих работ рассматривается вопрос восстановления электронной концентрации

ионосферы по данным наклонного зондирования (НЗ) на длинных радиотрассах. Так, например, в работе [Котович и др., 2006] решается задача вос-

становления профиля электронной концентрации в средней точке трассы Хабаровск–Торы (длина трассы $D=2297$ км) по экспериментальным ионограммам. Используется метод Смита в предположении, что среда вдоль трассы сферически-слоистая. В работе [Михайлов, Грозов, 2013] предложен метод восстановления немоногоного высотного профиля электронной концентрации в средней точке трасс Хабаровск–Торы, Магадан–Торы ($D=3042$ км), Норильск–Торы ($D=2097$ км) по экспериментальным ионограммам также в предположении сферически-слоистой ионосферы.

Экспериментальные данные НЗ ионосферы показывают, что трек ионограммы может иметь форму носа с максимумом, соответствующим максимальной применимой частоте (МПЧ) [Подлесный и др., 2013]. Однако ионограммы, полученные при зондировании на коротких трассах, не содержат «носа» и качественно не отличаются от ионограмм вертикального зондирования (ВЗ). ВЗ можно рассматривать как предельный случай НЗ при расстоянии между передатчиком и приемником, стремящемся к нулю.

На рис. 1, а представлена типичная ионограмма ВЗ для спокойных ионосферных условий.

Под слабонаклонным (квазивертикальным) зондированием (СНЗ) обычно понимают зондирование на радиотрассах, длина которых не превышает 100–200 км (например, на трассе Усолье–Торы, длина которой составляет 120 км, рис. 1, б [Подлесный и др., 2013]). Можно видеть, что ионограмма СНЗ качественно не отличается от ионограммы ВЗ.

Однако при увеличении длины трассы до нескольких сот километров наблюдается изменение структуры ионограммы (рис. 1, в, длина трассы $D=540$ км): появляется «нос» — часть трека в окрестности МПЧ, где имеет место многолучевость. Два значения группового пути на одной частоте соответствуют так называемым нижнему и верхнему лучам. Для длинных трасс (рис. 1, з, $D=2097$ км) «нос» становится более выраженным. Термин МПЧ обычно используется для НЗ, тогда как при ВЗ говорят о критической частоте.

В связи с этим возникает закономерный вопрос: при каких длинах радиотрасс происходит качественный переход, при котором ионограммы меняют свой вид?

Целью работы является анализ структуры ионограммы в зависимости от длины радиотрассы, а также оценка правомерности приближения сферически-слоистой ионосферы при численном синтезе.

СТРУКТУРА ИОНОГРАММЫ В ЗАВИСИМОСТИ ОТ ДЛИНЫ ТРАССЫ: ЧИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для пересчета высотно-частотной характеристики (ВЧХ) ВЗ $h'(f)$ в дальностно-частотную характеристику (ДЧХ) НЗ широко используется метод кривых передачи, или метод Смита в его версии, учитывающей сферичность Земли [Котович и др., 2006; Smith, 1939; Chen et al., 1992], что становится актуальным при распространении радиоволн на длинных трассах.

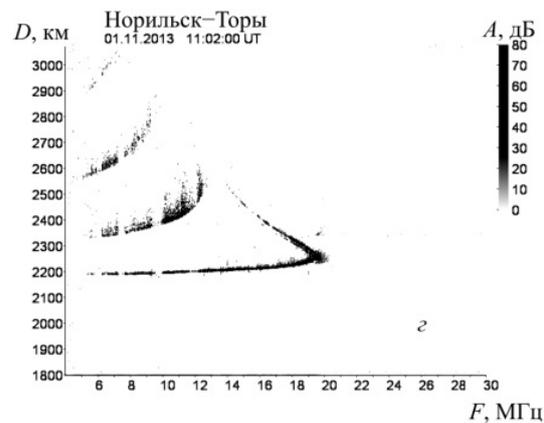
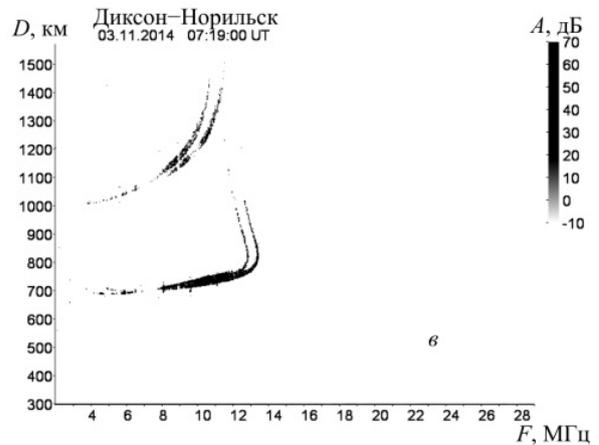
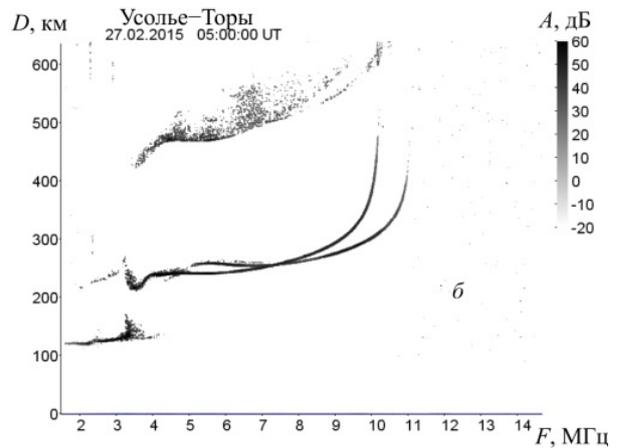
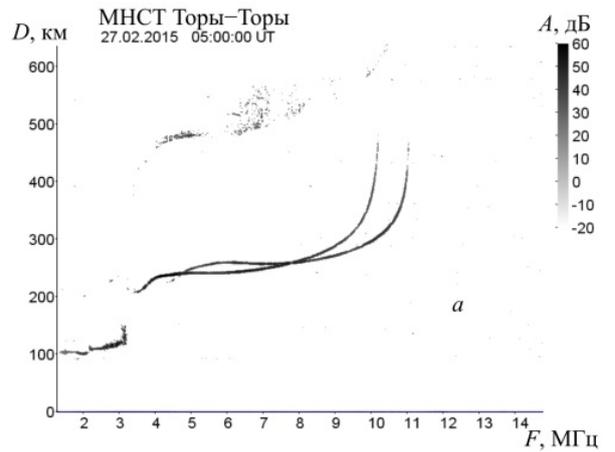


Рис. 1. Экспериментальные ионограммы вертикального (а) и наклонного (б, в, з) зондирования

Так, зависимость $h'(f)$ при ВЗ связана с углом $\varphi(f)$ падения на слой при НЗ по закону

$$\varphi(f) = \arctg \left[\frac{\sin\left(\frac{D}{2R}\right)}{1 + \frac{h'(f)}{R} - \cos\left(\frac{D}{2R}\right)} \right], \quad (1)$$

где D — дальность зондирования, R — радиус Земли.

Частота наклонного зондирования $f_{НЗ}(f)$, при которой луч отражается на той же высоте, что и луч при ВЗ на частоте f , определяется следующим образом:

$$f_{НЗ}(f) = \frac{k(D)f}{\cos \varphi(f)}, \quad (2)$$

где $k(D)$ — коэффициент сферичности Земли как функция дальности трассы.

Зависимость $k(D)$, согласно [Wieder, 1955], представляет собой возрастающую функцию: например, при $D=500$ км $k=1.003$, а при $D=2000$ км $k=1.065$.

Групповой путь распространения сигнала при НЗ задается выражением

$$P'_{НЗ}(f) = 2R \frac{\sin(\Omega(f) - \varphi(f))}{\sin \varphi(f)},$$

где

$$\Omega(f) = \arcsin \left(\frac{R + h'(f)}{R} \sin \varphi(f) \right). \quad (3)$$

Соотношения (1)–(3) в совокупности с функцией $k(D)$ позволяют для заданной дальности D построить зависимость $P'_{НЗ}(f)$ по функции $h'(f)$, полученной при ВЗ.

Рассмотрим модельный монотонный профиль электронной концентрации (рис. 2, а). На рис. 2, б представлена соответствующая ионограмма ВЗ, синтезированная в изотропном приближении с шагом 0.01 МГц.

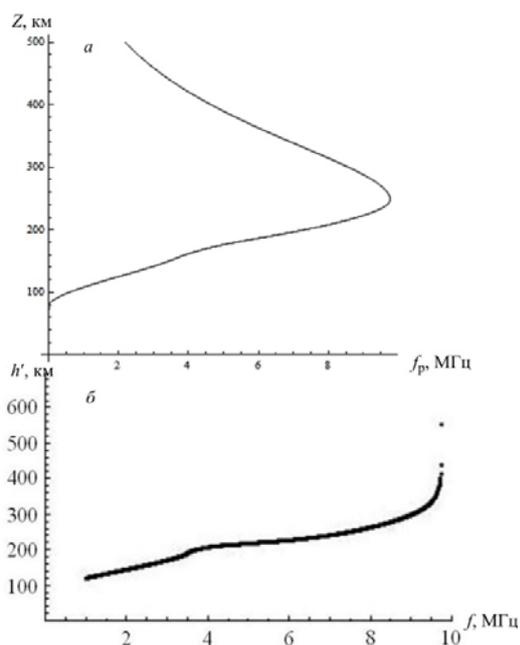


Рис. 2. Модельный профиль электронной концентрации (а) и синтезированная ВЧХ ВЗ (б)

Ионограмму (в виде набора точек) удобно представить как функцию $h'(f)$, используя интерполяцию кубическими сплайнами. При этом окрестность критической частоты целесообразно экстраполировать функцией с вертикальной асимптотой, для чего была выбрана гипербола вида $h'(f)=u+1/(a+bf)$ с асимптотой, проходящей через точку $f_{кр}=-f/b$.

Данная экстраполяция позволит более точно находить «последнюю точку» [Котович и др., 2006] при расчете ДЧХ. Гипербола указанного вида содержит три неизвестных параметра и, соответственно, однозначно определяется по трем точкам, в качестве которых выбираются три последние точки синтезированной ионограммы (f_1, h'_1) , (f_2, h'_2) и (f_3, h'_3) . Получившаяся в результате нелинейная система трех уравнений сводится к численному решению следующего уравнения относительно параметра b :

$$h'_3 - h'_1 = \frac{1}{a(b) + bf_3} - \frac{1}{a(b) + bf_1}, \quad (4)$$

где

$$a(b) = \frac{1}{2} \times \left[\sqrt{b^2 (f_1 + f_2)^2 - 4(b^2 f_1 f_2)} + b \frac{h'_2 - h'_1}{f_2 - f_1} - b(f_1 + f_2) \right].$$

Так, расчеты дают критическую частоту $f_{кр}=9.767$ МГц (рис. 3, штрихи) при последней точке на ионограмме ВЗ (рис. 2, б) 9.760 МГц.

На рис. 3 совместно с ВЧХ ВЗ показаны пересчитанные ДЧХ для дальностей 200, 300 и 500 км соответственно. Можно видеть, что при $D=200$ км «нос» уже визуализируется, а при $D=500$ км он ярко выражен.

Очевидно, что при малых дальностях распространения (десятки километров) выделить «нос» будет невозможно: либо не позволит разрешающая способность экрана визуализации экспериментальной ионограммы, либо ширина «носа» не будет превышать шага ионозонда по частоте. Понимая под шириной «носа» Δf разность между МПЧ и частотой $f_{п.}$ соответствующей последней точке ДЧХ (см. рис. 3, в), построим зависимость Δf от дальности распространения D и найдем, при каких значениях дальности разность Δf превышает характерный шаг ионозонда по частоте, например, 20 кГц (рис. 4).

Искомая зависимость носит квазилинейный характер, при этом ширина «носа» начинает превышать шаг ионозонда по частоте при дальности около 113 км.

ПРИБЛИЖЕНИЕ СФЕРИЧЕСКИ-СЛОИСТОЙ ИОНОСФЕРЫ НА ДЛИННЫХ ТРАССАХ

Так как на расстояниях порядка тысяч километров ионосфера значительно меняется, возникает необходимость исследовать правомерность сферически-слоистого приближения. Будем задавать распределение электронной концентрации на основе модели IRI-2012 [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html; Bilitza et al., 2012] с учетом гори-

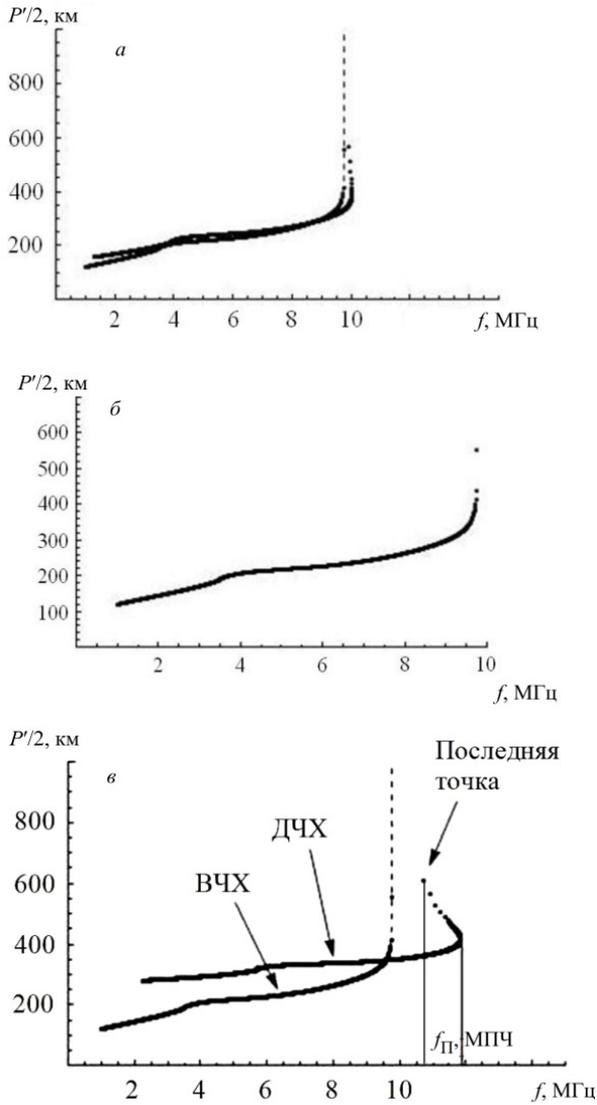


Рис. 3. Дальностно-частотные характеристики для дальностей распространения: а — 200 км; б — 300 км; в — 500 км. Кривая со штрихами — ВЧХ, синтезированная для ВЗ

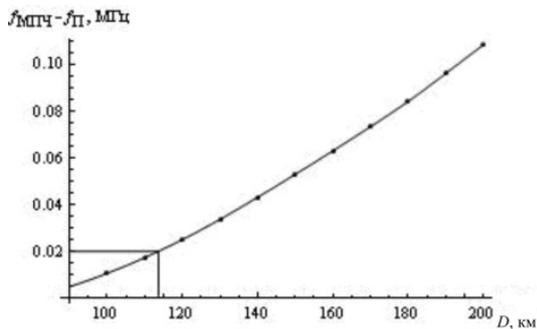


Рис. 4. Зависимость ширины «носа» от дальности распространения радиосигнала

горизонтальных градиентов вдоль трассы. Сглаживание по пространственным координатам выполняется с помощью кубической сплайн-интерполяции, которая обеспечивает непрерывность электронной концентрации и ее первой производной по координатам. Поставим задачу следующим образом: для заданной трассы (например, Норильск–Торы) сравним

синтезированные ДЧХ для случаев горизонтально-неоднородной среды (модель IRI) и сферически-слоистой ионосферы, когда высотный профиль не меняется вдоль трассы и представляет собой профиль IRI в средней точке данной трассы.

На рис. 5, а представлена типичная картина распределения электронной концентрации, когда высотный профиль в средней точке трассы является промежуточным между профилями на концах трассы. Отметим, что приведенный профиль IRI в с. Торы (рис. 5, а) хорошо согласуется с экспериментальными данными ВЗ (рис. 5, б) в Иркутске (расстояние Иркутск–Торы составляет 104 км): метод Хуанга–Райниша здесь дает высоту максимума профиля 254 км при критической частоте 10.64 МГц, тогда как для профиля IRI (рис. 5, а) точка максимума находится на высоте 257 км при критической частоте 10.41 МГц.

На рис. 6 представлены фрагменты ДЧХ, синтезированные для случаев как горизонтально-неоднородной, так и сферически-слоистой ионосферы с профилем, соответствующим средней точке трассы Норильск–Торы (рис. 5, а). Две дальностно-частотные характеристики (рис. 6, а) представлены на одном графике, однако различие между ними не визуализируется.

На рис. 6, б показаны верхний и нижний лучи, соответствующие частоте 23 МГц: для случая сферически-слоистой ионосферы траектории симметричны относительно центра трассы (сплошные линии), а в горизонтально-неоднородной среде (штрихи) имеет место асимметрия. Несмотря на визуальное различие

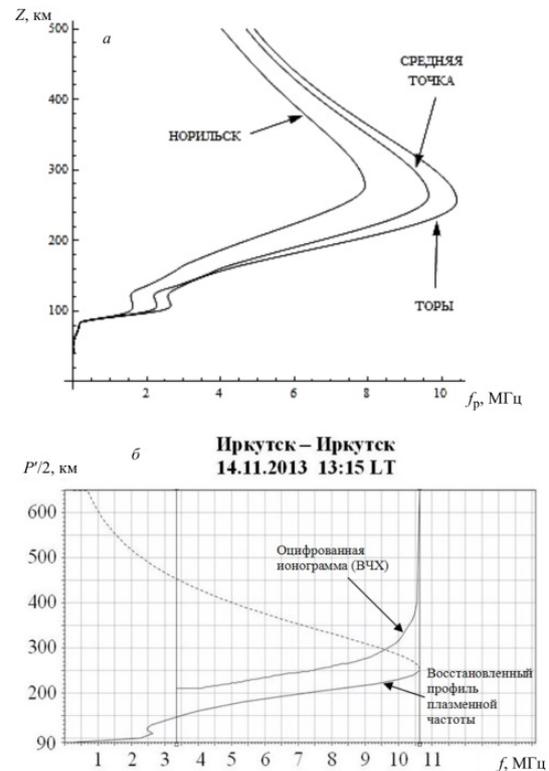


Рис. 5. Профили плазменной частоты на концах трассы Норильск–Торы и в ее средней точке 14 ноября 2013 г., 06:15 UT: а — модель IRI-2012; б — дигизонд DPS-4, Иркутск

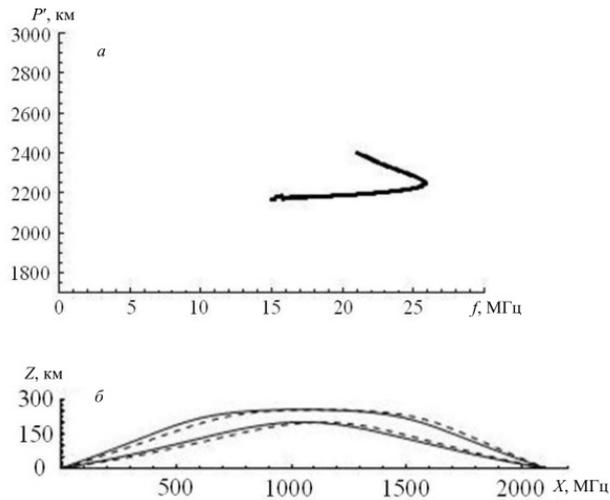


Рис. 6. Фрагменты ДЧХ, синтезированные для случаев сферически-слоистой и горизонтально-неоднородной ионосферы (а). Верхний и нижний лучи для частоты 23 МГц (б): сплошная линия — сферически-слоистая ионосфера, штриховая линия — горизонтально-неоднородная среда (IRI-2012)

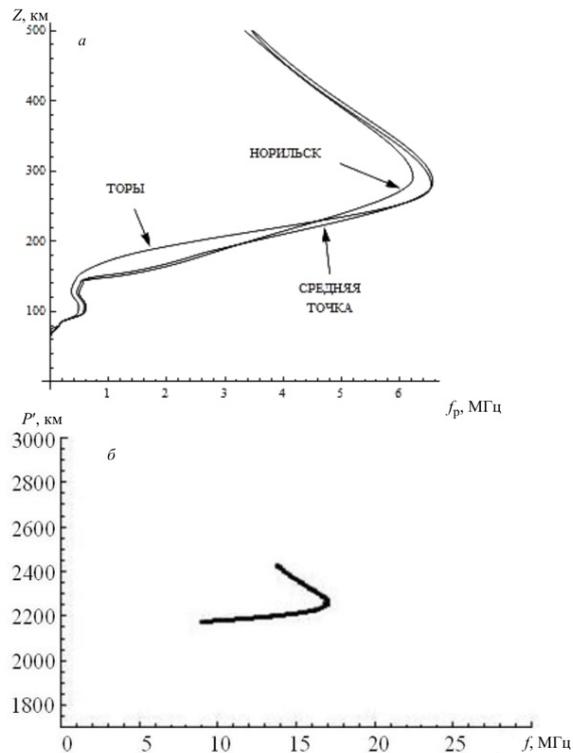


Рис. 7. Распределение электронной концентрации 1 ноября 2013 г., 11:00 UT: а — профили плазменной частоты; б — синтезированные ДЧХ

расхождение траекторий, групповой путь в обоих случаях практически совпадает (см. таблицу).

Групповой путь распространения сигнала

$f=23$ МГц	P' , км, горизонтально-неоднородная среда IRI-2012	P' , км, сферически-слоистая среда	Относительная погрешность, %
Нижний луч	2203.21	2203.85	0.03
Верхний луч	2343.96	2340.84	0.13

Аналогичным образом было рассмотрено распределение электронной концентрации 1 ноября

2013 г. в 11:00 UT, которое можно отнести к нетипичным (рис. 7). Видно, что точки максимума для профилей IRI в с. Торы и в средней точке трассы практически совпадают.

В данном случае, равно как и в рассмотренном выше (рис. 6), профиль IRI в с. Торы хорошо соответствует профилю, полученному методом Хуанга-Райниша при ВЗ в Иркутске, однако синтезированная ионограмма НЗ (рис. 7, б) несколько отличается от экспериментальной (см. рис. 1, з): МПЧ различается более чем на 2 МГц. Аналогичная ситуация имеет место и в предыдущем случае: возможно, модель IRI неточно описывает электронную концентрацию на высоких широтах.

Однако верификация модели IRI не является целью настоящей работы; главный вывод состоит в том, что ДЧХ, синтезированные как для горизонтально-неоднородной ионосферы, так и для ионосферы сферически-слоистой с профилем, соответствующим средней точке трассы, опять практически совпали (рис. 7, б): их различие не визуализируется и носит тот же порядок величины, что и приведенный в таблице.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Экспериментальные данные НЗ ионосферы показывают, что трек ионограммы может иметь форму носа с максимумом, соответствующим МПЧ. На ионограммах такого рода проявляется многолучевость в определенном диапазоне частот. Однако ионограммы, полученные при зондировании на коротких трассах, не содержат «носа» и по виду не отличаются от ионограмм ВЗ. С помощью метода Смита было исследовано изменение трека ионограммы при увеличении дальности распространения. Показано, что «нос» может иметь место при любой дальности распространения, отличной от нуля. Однако на коротких трассах (порядка 100 км) для выделения «носа» не хватает разрешающей способности приборов.

Были рассмотрены возможности применения приближения сферически-слоистой ионосферы при зондировании на длинных радиотрассах (порядка тысяч километров). Проведено сравнение дальностно-частотных характеристик, синтезированных в случаях: а) горизонтально-неоднородной ионосферы, заданной вдоль трассы моделью IRI-2012; б) сферически-слоистой ионосферы, для которой высотный профиль не зависит от горизонтальной координаты и соответствует профилю в средней точке трассы согласно модели IRI-2012. Выявлено, что, несмотря на значительные изменения электронной концентрации вдоль трассы, ДЧХ в этих случаях совпадают с достаточно хорошей точностью: различие в групповом пути на фиксированной частоте не превышает доли процента. Таким образом, решающую роль при НЗ играет окрестность средней точки трассы, и методы восстановления высотного профиля электронной концентрации по экспериментальным ионограммам НЗ будут давать достаточно хорошие результаты в средней точке.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-05-00259.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Котович Г.В., Ким А.Г., Михайлов С.Я. и др. Определение критической частоты f_oF2 в средней точке трассы по данным наклонного зондирования на основе метода Смита // Геомагнетизм и аэронавигация. 2006. Т. 46, № 4. С. 547–551.

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.

Подлесный А.В., Брынько И.Г., Куркин В.И. и др. Многофункциональный ЛЧМ ионозонд для мониторинга ионосферы // Гелиогеофизические исследования. 2013. № 2 (4). С. 24–31.

Bilitza D., Brown S.A., Wang M.Y., et al. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum // *J. Atmos. Sol-Terr. Phys.* 2012. V. 86. P. 99–106.

Chen J., Bennett J.A., Dyson P.L. Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* 1992. V. 54, N 3/4. P. 323–331.

Smith N. The relation of radio sky-wave transmission to ionosphere measurements // *Proc. Inst. Radio Engrs.* 1939. V. 27, N 5. P. 332–347.

Wieder B. Some results of a sweep-frequency propagation experiment over an 1150 km east-west path // *J. Geophys. Res.* 1955. V. 60, N 4. P. 395–409.

URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html (accessed July 15, 2015).

REFERENCES

Bilitza D., Brown S.A., Wang M.Y. et al. Measurements and IRI model predictions during the recent solar minimum. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* 2012, vol. 86, pp. 99–106.

Chen J., Bennett J.A., Dyson P.L. Synthesis of oblique ionograms from vertical ionograms using quasi-parabolic segment models of the ionosphere. *J. Atmosph. Terr. Phys.* 1992, vol. 54, no. 3/4, pp. 323–331.

Kotovich G.V., Kim A.G., Mikhailov S.Ya., et al. Determining the f_oF2 critical frequency at the path midpoint from oblique sounding data based on the Smith method. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2006, vol. 46, no. 4, pp. 517–521.

Mikhailov S.Ya., Grozov V.P. Recovery of the nonmonotonic altitude profile of the plasma frequency based on the ionospheric oblique sounding data. *Radiophysics and Quantum Electronics.* 2013, vol. 56, no. 7, pp. 443–457.

Podlesny A.V., Bryn'ko I.G., Kurkin V.I., et al. Multifunctional LFM ionosonde for monitoring the ionosphere. *Geliogeofizicheskie issledovaniya* [Heliogeophysical Research]. 2013, no. 2 (4), pp. 24–31 (in Russian).

Smith N. The relation of radio sky-wave transmission to ionosphere measurements. *Proc. Inst. Radio Engrs.* 1939, vol. 27, no. 5. pp. 332–347.

Wieder B. Some results of a sweep-frequency propagation experiment over an 1150 km east-west path. *J. Geophys. Res.* 1955, vol. 60, no. 4, pp. 395–409.

URL: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html (accessed July 15, 2015).