

ЗОНЫ ВЛИЯНИЯ ПИВ РАЗЛИЧНЫХ МАСШТАБОВ НА ИОНОГРАММЫ НАКЛОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ИОНОСФЕРЫ

А.В. Софьин

Институт солнечно-земной физики СО РАН, Иркутск, Россия
radio-sof@rambler.ru

SPATIAL DOMAINS OF VARIOUS-SCALE TIDS' INFLUENCE ON IONOGRAMS OF OBLIQUE-INCIDENCE IONOSPHERIC SOUNDING

A.V. Sofyin

Institute of Solar-Terrestrial Physics SB RAS, Irkutsk, Russia
radio-sof@rambler.ru

Аннотация. В рамках геометрикооптического приближения проведено исследование влияния перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на ионограммы наклонного зондирования ионосферы. Выявлены характерные пространственные масштабы, амплитудные характеристики ПИВ и области пространства, в которых неоднородности вызывают существенные искажения ионограмм в виде быстроменяющихся образований Z-типа на экспериментальных ионограммах.

Ключевые слова: ионосфера, наклонное зондирование, перемещающиеся ионосферные возмущения

Abstract. We examined the impacts of TIDs on ionograms of oblique-incidence ionospheric sounding within the geometric-optical approximation. We detected characteristic spatial scales, amplitude characteristics of ionospheric disturbances and typical spatial domains, in which ionospheric disturbances cause significant distortions of ionograms in the form of rapidly changing Z-type features on experimental ionograms.

Keywords: ionosphere, oblique-incidence sounding, traveling ionospheric disturbances

ВВЕДЕНИЕ

Искажения ионограмм наклонного зондирования (НЗ) ионосферы в виде характерных образований Z-типа, вызванные влиянием перемещающихся ионосферных возмущений (ПИВ) на траекторные характеристики коротковолнового радиосигнала, известны давно (см., например, [Munro, 1950; Heisler, 1958]). С использованием различных аналитических моделей пространственной структуры ионосферных неоднородностей объяснены качественные особенности формы образований Z-типа на ионограммах в зависимости от параметров ПИВ [Вертоградов и др., 2008; Cooper, Cumback, 1986; Harris et al., 2012]. Актуальной остается задача восстановления типа источника возмущения, поскольку проявления отмеченных выше образований Z-типа на ионограммах часто имеют нерегулярную временную зависимость.

Целью данной работы является определение предельных пространственных масштабов ПИВ, амплитуд возмущения и пространственных областей, в которых ПИВ оказывает заметное воздействие на ионограммы односкачковых трасс.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Моделирование распространения коротких радиоволн проводилось в рамках геометрикооптического приближения без учета магнитного поля Земли и поперечных градиентов ионосферной плазмы. Распределение электронной концентрации вдоль трассы распространения задавалось в рамках приближения сферически-слоистой ионосферы, где высотный профиль электронной концентрации рассчитывался по модели IRI-2012. Ионосферные возмущения при моделировании задавались зависимостью от про-

странственных координат в виде закона Гаусса [Софьин и др., 2020]:

$$N_e(\theta, r) = N_0(r - R) \times \left(1 + \delta \exp \left\{ - \left[\frac{R\theta - x_c}{a_x} \right]^2 - \left[\frac{r - R - z_c}{a_z} \right]^2 \right\} \right),$$

где $N_e(\theta, r)$ — электронная концентрация, $N_0(r - R)$ — электронная концентрация в невозмущенной ионосфере, заданная согласно модели IRI-2012, R — радиус Земли, δ — относительная амплитуда ПИВ, x_c и z_c — координаты центра неоднородности, a_x и a_z — пространственные масштабы возмущения.

Перед началом вариаций варьирования параметров неоднородности a_x , a_z и δ параметры x_c и z_c выбирались по принципу максимизации таких характеристик как размах возмущения по частоте Δf и размах возмущения по групповой задержке $\Delta P'$. Согласно расчетам, ПИВ оказывает наибольшее воздействие на ДЧХ, когда x_c равно половине длины трассы (рис. 1).

При варьировании продольного масштаба ПИВ a_x для обеих трасс были выбраны значения параметров неоднородности $\delta = 0.44$ и $a_z = 20$ км, при которых на ДЧХ наблюдаются хорошо развитые образования Z-типа. Значение a_x , при котором воздействие на ДЧХ имеет максимальный эффект, составляет 400 км, при этом дальнейшее увеличение параметра не приводит к изменениям на ионограмме. Далее такие значения a_x будут обозначаться как максимальный продольный масштаб. Минимальный масштаб a_x , при котором образование Z-типа переходит в пологую ступеньку, для трассы Норильск–Торы составляет 60 км, а для трассы Магадан–Торы — 120 км.

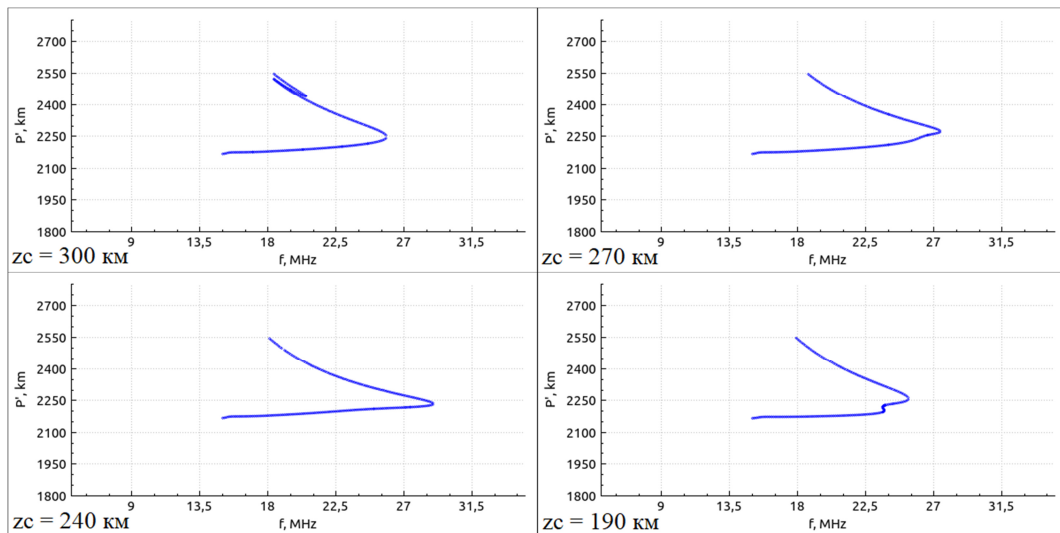


Рис. 1. Смоделированные ДЧХ радиотрассы Норильск–Торы. Параметры неоднородности: $\delta = 0.2$, $a_x = 400$ км, $a_z = 20$ км, $x_c = 1050$ км

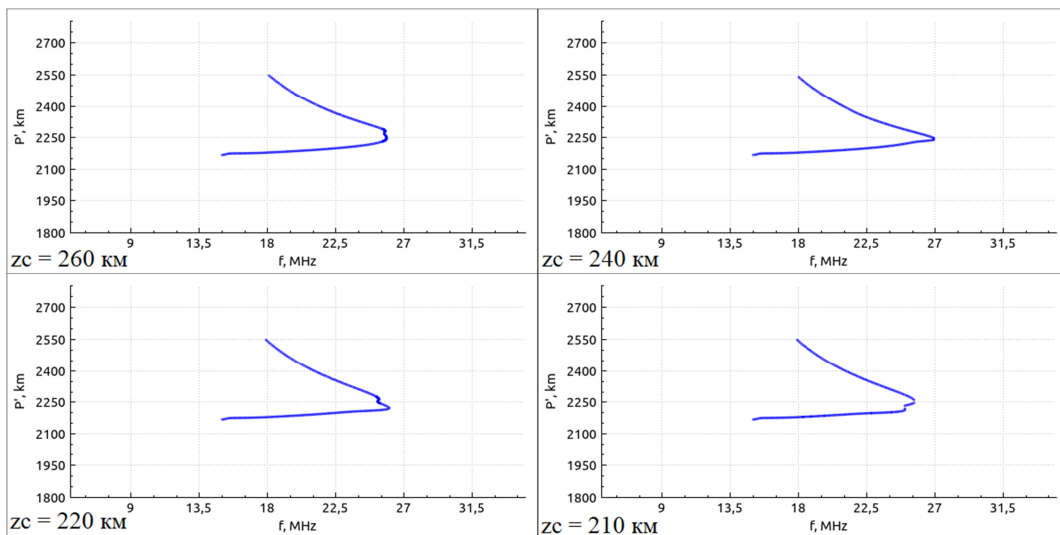


Рис. 2. Смоделированные ДЧХ радиотрассы Норильск–Торы. Параметры неоднородности: $\delta = 0.05$, $a_x = 400$ км, $a_z = 10$ км, $x_c = 1050$ км

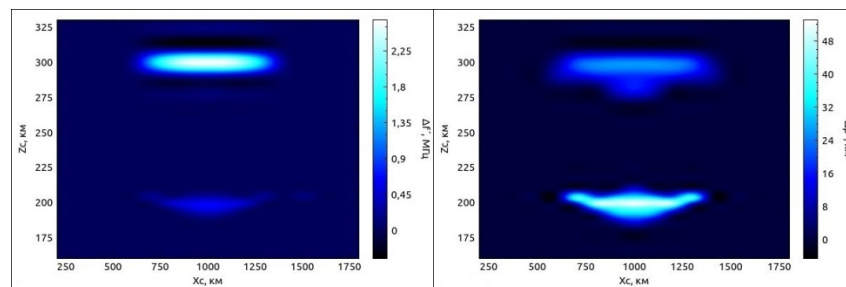


Рис. 3. Зависимость Δf и ΔP от пространственных координат центра неоднородности. Амплитуда возмущения $\delta = 0.2$

При варьировании вертикального масштаба неоднородности a_z на его минимальное значение для трасс длиной 2000 и 3000 км было наложено ограничение в 20 км. При значениях $a_z < 20$ км и амплитуде $\delta \geq 0.2$ возмущение на ДЧХ преобразуется в расщепление, подобное образованию расслоения F-области ионосферы. В ходе расчетов были установлены максимальные значения параметра $a_z = 30$ км, при котором Z-образование вырождается в ступеньку, для радиотрассы Норильск–Торы и Магадан–Торы.

Получены минимальные значения относительной амплитуды возмущения δ . Для вариации данного параметра были выбраны такие значения пространственных масштабов, чтобы эффект воздействия ПИВ на ДЧХ был максимален. Путем расчетов было установлено минимальное значение $\delta = 0.05$ для трасс Норильск–Торы и Магадан–Торы (рис. 2).

На основании предыдущих модельных расчетов для определения пространственных областей влияния ПИВ на ионограммы для радиотрассы Но-

рильск–Торы были выбраны продольный масштаб неоднородности $a_x = 400$ км, вертикальный масштаб $a_z = 20$ км и амплитуда возмущения $\delta = 0.44$. Анализ реальных ионограмм для радиотрассы Норильск–Торы за ноябрь 2013 г. показал, что групповой путь односкачкового распространения сигнала не превышает 2550 км, поэтому сигналы, групповой путь которых превышает $P'_{\max} = 2550$ км, не учитывались в расчетах.

На рис. 2 изображены результаты расчетов областей, в которых ПИВ амплитудой $\delta = 0.2$ вызывает искажения на ДЧХ в виде образований Z-типа, а также цветом указаны значения параметров Δf и $\Delta P'$ соответственно [Софьин, Куркин, 2021]. Для обоих параметров максимальное значение получается при $x_c = 1050$ км, что объясняется прохождением луча через всю эффективную зону влияния неоднородности. Ширина зоны Δx , где сохраняется присутствие Z-петли, около 600 км. Однако для Δf высоты наибольшего воздействия неоднородности располагаются в районе от 290 км до 310 км (Δf меняется от 2 МГц до 2.7 МГц, что составляет от 7.75 до 10.27 % от $f_{\text{МПЧ}}$), а для $\Delta P'$ — в пределах 190–210 км ($\Delta P'$ меняется от 40 км до 53 км, что составляет от 1.57 до 2.04 % от P'_{\max}). На данных рисунках видна также область высот ($z_c = 220$ –280 км), где, вне зависимости от значения параметра x_c , на ДЧХ отсутствует возмущение Z-типа, а лишь увеличивается значение МПЧ до 10 % от невозмущенного значения для данной трассы.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

При рассмотрении трасс Норильск–Торы и Магадан–Торы выяснилось, что в рамках использованного приближения изменение амплитуды ПИВ оказывает влияние при значениях амплитуды δ от 0.05 и выше. Пространственные масштабы возмущений, оказывающих существенное влияние на ионограммы, принимают значения a_x от 60 до 400 км, a_z до 30 км для трассы Норильск–Торы и a_x от 125 км до 400 км, a_z до 30 км для трассы Магадан–Торы. Произведена также количественная оценка пространственных областей, в которых ПИВ оказывает заметное воздействие на ионограммы односкачковых трасс. Так, для трассы Норильск–Торы высоты наибольшего воздействия неоднородности для Δf располагаются от 295 км до 305 км, а для $\Delta P'$ — в пределах 195–205 км. Ширина зоны Δx , где сохраняется присутствие Z-петли, составляет около 600 км. Выявлена мертвая зона на высотах $z_c = 220$ –280 км, где отсутствует образование Z-типа на ДЧХ, а лишь увеличивается значение МПЧ до 10 %. Полученные результаты позволяют оценивать диагностические возможности ионозондов для коротких и длинных односкачковых радиотрасс.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Вертоградов Г.Г., Денисенко П.Ф., Вертоградова Е.Г., Урядов В.П. Мониторинг среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений по результатам наклонного ЛЧМ-зондирования ионосферы. *Электромагнитные волны и электронные системы*. 2008. Т. 13, № 5. С. 35–44.
- Софьин А.В., Куркин В.И., Подлесный А.В. Исследование влияния ПИВ различных масштабов на ионограммы наклонного и слабонаклонного зондирования ионосферы непрерывными ЛЧМ сигналами. *VII Всероссийская микроволновая конференция: Труды*. М.: ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН, 2020. С. 330–334.
- Софьин А.В., Куркин В.И. Исследование пространственных областей влияния ПИВ на ионограммы наклонного зондирования ионосферы. *XXVII Всероссийская открытая научная конференция «Распространение радиоволн»: Труды*. Калининград: Изд-во Балтийского федерального университета им. И. Канта, 2021. С. 358–363.
- Cooper J., Cummack C.H. The analysis of travelling ionospheric disturbance with nonlinear ionospheric response. *J. Atmos. and Terr. Phys.* 1986. Vol. 48, no. 1. P. 61–64.
- Harris T.J., Cervera M.A., Meehan D.H. SpICE: A program to study small-scale disturbances in the ionosphere. *J. Geophys. Res.* 2012. Vol. 117, A06321. DOI: 10.1029/2011JA017438.
- Heisler L.H. Anomalies in ionosonde records due to travelling ionospheric disturbances. *Austral. J. Phys.* 1958. Vol. 11, no. 1. P. 79–90.
- Munro G.H. Travelling disturbances in the ionosphere. *Proc. Royal Soc. Lond. A.* 1950. Vol. 202. P. 208–223.