

Том I, с. 372–375

УДК: 550.388.2

## ТРАЕКТОРНЫЙ СИНТЕЗ ИОНОГРАММ НА СЛАБОНАКЛОННОЙ ТРАССЕ В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ

Г. Г. Вертоградов<sup>1</sup>, В. П. Урядов<sup>2</sup>, Ф. И. Выборнов<sup>2</sup>, А. В. Першин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Южный федеральный университет, 344090 г. Ростов-на-Дону, ул. Зорге, 5, Россия

E-mail: vertogradovgg@gmail.com

<sup>2</sup> НИРФИ ННГУ им. Н.И. Лобачевского, г. Нижний Новгород, ул. Большая Печерская, 25/12а

E-mail: uryadov.vp@nirfi.unn.ru

**Аннотация.** Представлены результаты численного моделирования распространения декаметровых радиоволн на слабонаклонной трассе Васильсурск – Нижний Новгород в условиях перемещающихся ионосферных возмущений. Проведено сопоставление с экспериментальными данными ЛЧМ-зондирования. Показано, что в дневные часы в условиях спокойной магнитной обстановки за серпообразные треки на ионограммах могут быть ответственны среднемасштабные волновые возмущения электронной концентрации с размерами  $\sim 75 \div 100$  км, периодом  $\sim 15$  мин и относительной амплитудой  $\delta \sim 0.1$ . Волновые возмущения распространяются со скоростью  $\sim 100$  м/с под углом  $\beta \sim 45^\circ$  к горизонту с преимущественной ориентацией волнового вектора в восточно-западном направлении.

**Ключевые слова:** распространение радиоволн; ЛЧМ-зондирование; перемещающиеся ионосферные возмущения; численное моделирование

## TRAJECTORY SYNTHESIS OF IONOGRAMS ON WEAKLY OBLIQUE PATH UNDER CONDITIONS OF WAVE-LIKE DISTURBANCES

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, F. I. Vybornov, A. V. Pershin

**Abstract.** The results of numerical modeling of decameter radio waves propagation on a weakly obliqued Vasilsursk – placeNizhny Novgorod path in the conditions of traveling ionospheric disturbances are presented. A comparison with experimental data of chirp sounding is made. It is shown that in daytime, in the conditions of quiet magnetic environment the medium-scale wave-like disturbances of electron density with  $\sim 75 \div 100$  km dimensions, period  $\sim 15$  min and relative amplitude  $\delta \sim 0.1$  can be responsible for the crescent tracks on the ionograms. Wave-like disturbances propagate at velocity of  $\sim 100$  m/s at angle  $\beta \sim 45^\circ$  to the horizon with a predominant orientation of the wave vector in the east-west direction.

**Keywords:** radio wave propagation; chirp sounding; traveling ionospheric disturbances; numerical modeling

### Введение

Численное моделирование распространения коротких радиоволн играет важную роль при интерпретации ионограмм ВЗ и НЗ. Особое значение результаты моделирования приобретают в условиях ионосферных возмущений, когда на ионограммах ВЗ регистрируются дополнительные треки в виде «серпов» [1], а на ионограммах НЗ – z-образования [2], за которые ответственны перемещающиеся ионосферные возмущения. Присутствие ПИВ снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, вызывая девиацию углов прихода, увеличение временного интервала задержки сигнала, уширение доплеровского спектра, замирания сигнала и ошибки позиционирования [3, 4].

При наличии возмущений возникают сложности с интерпретацией результатов наблюдений, сравнением экспериментальных и расчетных характеристик радиосигналов.

Цель работы состоит в том, чтобы на основе имитационного моделирования результатов слабонаклонного зондирования ионосферы показать, что серпообразные треки на ионограммах связаны со среднемасштабными перемещающимися возмущениями, а также получить оценки параметров этих возмущений.

### Результаты эксперимента и моделирования

На рис. 1а и 2а приведены характерные примеры ионограмм на трассе Васильсурск (56.1°N; 46.1°E) – Нижний Новгород (56.1°N; 44.1°E), полученные в феврале 2015 г. Магнитная обстановка была спокойная, индекс Кр = 1-2. На ионограммах видны серпообразные треки перемещающихся ионосферных возмущений на обоих магнитоионных компонентах, которые с течением времени перемещаются с больших на меньшие групповые задержки. Это типичное проявление ПИВ на ионограммах вертикального зондирования. Для определения параметров ПИВ проводилось моделирование распространения декаметровых радиоволн.

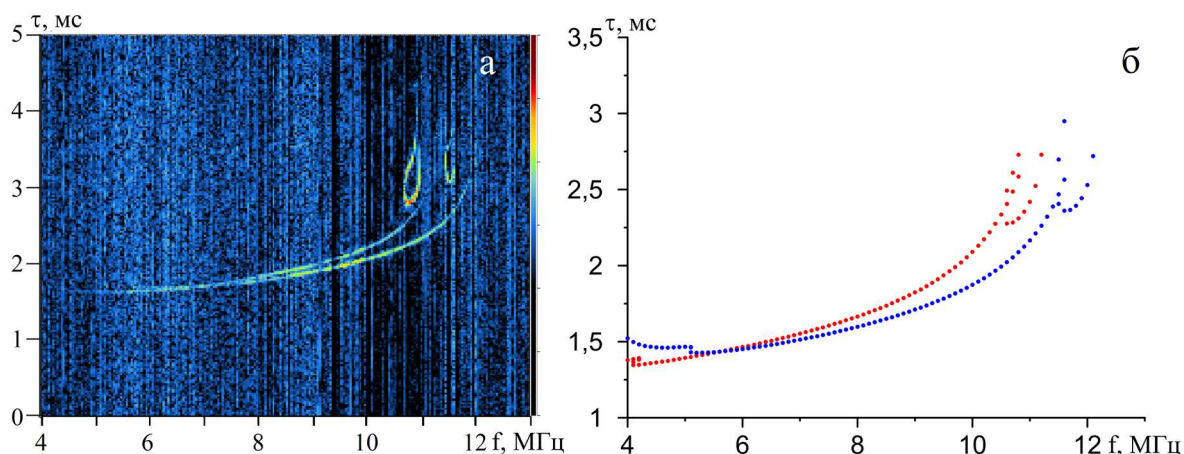


Рис. 1. Экспериментальная (а) и расчетная (б) ионограммы. Васильсурск – Нижний Новгород. 10:36 UT 09.02.2015, красные и синие кривые - О и Х компоненты соответственно.

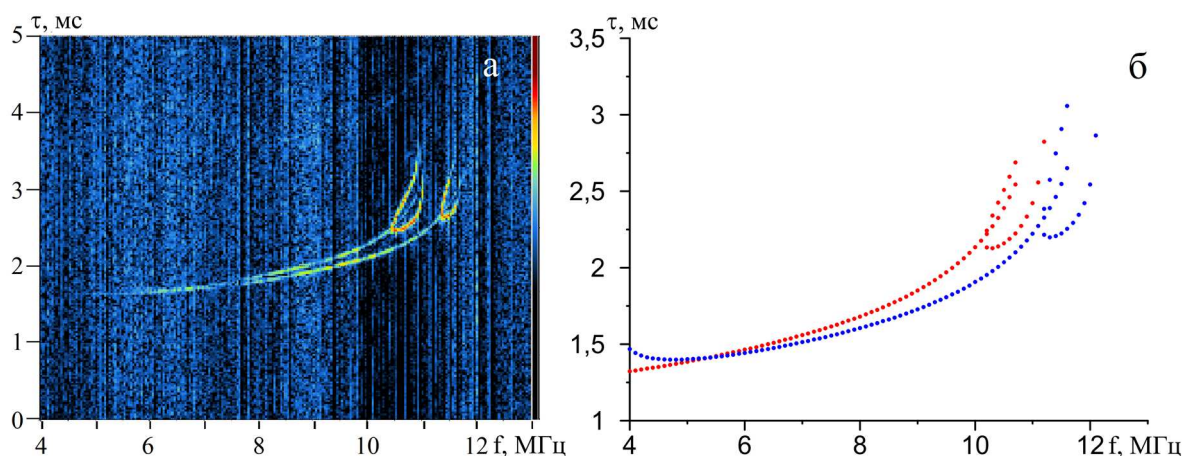


Рис. 2. Экспериментальная (а) и расчетная (б) ионограммы. Васильсурск – Нижний Новгород. 10:38 UT 09.02.2015, красные и синие кривые - О и Х компоненты соответственно.

Моделирование распространения декаметровых радиоволн (ДКМВ) на короткой трассе Васильсурск – Нижний Новгород в условиях присутствия среднemasштабных перемещающихся ионосферных возмущений выполнено с помощью структурно-физической модели, описание которой приведено в работах [5, 6]. Длина анализируемой трассы 130 км, азимут со стороны приемника (Нижний Новгород)  $\sim 82.8^\circ$  и  $\sim 264^\circ$  со стороны передатчика (Васильсурск).

При моделировании учитывалось реальное геомагнитное поле, заданное моделью IGRF [7]. Распределение электронной концентрации в пространстве задавалось трехмерной моделью IRI-2016 [8] при этом для обеспечения непрерывности трехмерной функции вместе с ее первыми и

вторыми производными заданную таблично функцию аппроксимировали трехмерным сглаживающим кубическим сплайном. Моделирование выполнено на основе решения характеристических лучевых уравнений в трёхмерно неоднородной магнитоактивной ионосфере. Среднемасштабные ионосферные возмущения моделировались на основе гармонической модели ПИВ вида:

$$N_e(\varphi, \lambda, r, t) = N_0(\varphi, \lambda, r, t) \left[ 1 + \sum_{i=1}^n \delta_i \cos \left( \frac{2\pi}{T} t - \mathbf{p}_i \mathbf{r} + \Phi_i \right) \right],$$

где  $N_e(\varphi, \lambda, r, t)$  – электронная концентрация в точке со сферическими координатами  $(\varphi, \lambda, r)$  в момент времени  $t$ ;  $N_0(\varphi, \lambda, r, t)$  – электронная концентрация в невозмущенной ионосфере, заданная согласно модели IRI-2016,  $n$  – количество ПИВ,  $\Lambda$  – масштаб ПИВ,  $\delta_i$  – относительная амплитуда ПИВ,  $\mathbf{p}_i = \frac{2\pi}{\Lambda_i} \{ \cos \beta_i \sin \alpha_i, \cos \beta_i \cos \alpha_i, \sin \beta_i \}$  – волновой вектор ПИВ,  $\alpha_i$  – азимут,  $\beta_i$  – угол места распространения ПИВ в точке расположения передатчика (азимут отсчитывается от направления на север; угол места всегда отсчитывается от плоскости горизонта и имеет знак «-», если вектор направлен вниз от плоскости горизонта),  $T$  – период и  $\Phi_i$  – начальная фаза гармонического возмущения. При моделировании использовалось одно гармоническое возмущение, параметры которого варьировались.

Перед началом имитационного моделирования параметры модели IRI-2016 корректировались. Для этого выбиралась близкая по временному интервалу ионограмма, на которой не видны следы ПИВ. Адаптация IRI обеспечивала близость невозмущенной экспериментальной и модельной дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) на трассе зондирования.

При моделировании параметры ПИВ варьировались в следующих пределах:  $\Lambda = 75, 100, 150$  км;  $\delta = 0.05, 0.07, 0.10, 0.15, 0.20$ ;  $\beta = 0^\circ, -30^\circ, -45^\circ, -60^\circ, -75^\circ$ ; значения  $\alpha$  изменялись от азимута трассы на передатчик  $82, 8^\circ$  до азимута на приемник  $264, 5^\circ$  с шагом  $\pm 15^\circ$ .

Согласно расчетам, при уменьшении  $\Lambda$  усиливается влияние ПИВ на форму ДЧХ за счет увеличения пространственного градиента электронной концентрации.

Серпообразные возмущения на ДЧХ более интенсивные и хорошо развитые при укорочении пространственной длины волны. При  $\Lambda$  более 150 км серпов на ДЧХ обыкновенных и необыкновенных волн не наблюдается.

Если сравнивать модельные ДЧХ с экспериментальными, то при  $\delta > 0.1$  в окрестности МПЧ магнитоионных компонент наблюдается сильное расщепление каждой из кривых. В этих случаях следует уже говорить не о «серпах» на ДЧХ, а о расщеплении ДЧХ подобных диффузным отражениям от ионосферы.

На модельных ДЧХ обеих магнитоионных компонент наблюдаются хорошо развитые «серпы» только при вариации угла места  $\beta$  в интервале от  $-30$  до  $-50$  градусов. При малых углах «серпы» наблюдаются редко только при существенных значениях относительной амплитуды. При углах места более  $60$  градусов «серпы» на ДЧХ превращаются в расщепление подобное образованию расслоения  $F$ -области ионосферы. Как следствие, выполненный анализ весьма ограничивает диапазон изменений параметров квазигармонической модели ПИВ, относительно которых можно привести следующие диапазоны:  $0.05 \leq \delta \leq 0.10$ ;  $75 \text{ км} \leq \Lambda \leq 120 \text{ км}$ ;  $-50^\circ \leq \beta \leq -30^\circ$ .

Получено, что наиболее сильное влияние ПИВ на ДЧХ проявляется для угла  $\alpha = 83^\circ$ , т.е. в восточном направлении по линии приемник-передатчик.

Показано, что наличие ПИВ приводит к многолучевости сигнала и отклонению пеленга на передатчик до  $6, 4^\circ$ , наиболее сильное для обыкновенной компоненты.

На основе проведенных расчетов на рис. 1–2 показаны результаты сопоставления экспериментальных (а) и модельных (б) ДЧХ для параметров ПИВ наилучшим образом обеспечивающих согласование данных наблюдений и моделирования. Установлено, что во время эксперимента ионосфера была возмущена перемещающимся ионосферным возмущением с оценочными параметрами  $\delta \sim 0.1$ ,  $\alpha = 83^\circ$ ,  $\beta = -45^\circ$ ,  $\Lambda = 75$  км. Такие параметры возмущения хорошо согласуются с характеристиками среднемасштабных ПИВ [9].

### Выводы

Основные результаты работы состоят в следующем.

Развит численный метод моделирования ионограмм квазивертикального зондирования ионосферы в условиях ПИВ, позволивший выявить основные особенности проявления среднемасштабных волновых возмущений в ионозондовых наблюдениях. На основе сопоставления экспериментальных и расчетных ДЧХ определены направленно-скоростные характеристики среднемасштабных ПИВ, обеспечивающих хорошее соответствие временной эволюции отклика широкополосного сигнала на прохождение волнового возмущения на трассе зондирования. Показано, что наилучшее согласование экспериментальных и модельных ДЧХ имеет место для ПИВ с оценочными параметрами  $\delta \sim 0.1$ ,  $\alpha = 83^\circ$ ,  $\beta = -45^\circ$ ,  $\Lambda = 75 \div 100$  км и скоростью  $V \sim 100$  м/с.

### Благодарности

Работа В.П.Урядова, Ф.И.Выборнова и А.В.Першина выполнена при финансовой поддержке базовой части Госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9)

### Список литературы

1. Варшавский И.И., Калихман А.Д. Траекторный синтез ионограмм с многолучевостью и структура ионосферных неоднородностей // Исследования по геомагнетизму, аэронауке и физике Солнца. – 1988. – Вып. 80. – С.90–97.
2. Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Урядов В.П. Мониторинг волновых возмущений методом наклонного зондирования ионосферы // Изв. Вузов. Радиофизика. – 2006. – Том 49 – № 12. – С. 1015–1029.
3. Lambert S. Travelling ionospheric disturbances and their effects on high-frequency direction finding // The Transactions of the South African Institute of Electrical Engineers. – 1985 – Vol.76. – № 1. – P. 19–27.
4. Вертоградов Г.Г., Урядов В.П., Чайка Е.Г. и др. Однопозиционное определение местоположения источников радиоизлучения в декаметровом диапазоне с помощью широкоапертурного пеленгатора-дальномера и ЛЧМ ионозонда-радиопеленгатора // Изв. Вузов. Радиофизика. 2017. – Том 60 – № 12. – С.1072–1092.
5. Барабашов Б.Г., Вертоградов Г.Г. Динамическая адаптивная структурно-физическая модель ионосферного радиоканала // Математическое моделирование. – 1996. – Том 8. – № 2. – С. 3–18.
6. Вертоградов Г.Г. Имитатор широкополосного ионосферного радиоканала // Радиотехника и электроника. – 2003. – Том – 48.- № 11. – С. 1322–1329.
7. Thébault E., Finlay C. C, Beggan C. D. et al. International Geomagnetic Reference Field: the 12th generation // Earth, Planets and Space. – 2015. – 67:79 (27 May 2015). – doi: 10.1186/s40623-015-0228-9.
8. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., Mertens C., Truhlik V., et al. The International Reference Ionosphere 2012 – a model of international collaboration. // J. Space Weather Space Clim. – 2014. – 4(A07). – doi:10.1051/swsc/2014004.
9. Hunsucker R.D. Atmospheric gravity waves generated in the high-latitude ionosphere: A Review // Rev. Geophys. Space Phys. – 1982. – Vol. 20. – N.2. – P. 293–315.