

УДК 550.388.2; 551.510.535

**СОПОСТАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ
МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В F-ОБЛАСТИ
СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ С МОДЕЛЬЮ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЕТРА
HWM07***

Н. Ю. Романова, Р. Ю. Юрик

ФГБНУ Полярный геофизический институт КНЦ РАН

Аннотация

Исследуются мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области среднеширотной ионосферы. Ориентация поперечной анизотропии Ψ_A -неоднородностей сопоставлена с направлением HWM07 горизонтального ветра для каждого случая. Показано, что неоднородности в перпендикулярной к магнитному полю плоскости вытягиваются вдоль направления горизонтального ветра.

Ключевые слова:

ионосфера, среднеширотная ионосфера, ионосферные неоднородности.

**INVESTIGATIONS OF THE SMALL-SCALE IRREGULARITIES IN F-REGION
OF MIDDLE-LATITUDE IONOSPHERE**

Natalya Y. Romanova, Roman Y. Yurik

Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

Abstract

The small-scale irregularities of electron density in F-region of middle-latitude ionosphere have been investigated by using the method which was developed in the Polar Geophysical Institute. The orientation of cross-field anisotropy Ψ_A of small-scale irregularities has been compared with the horizontal wind direction, calculated by the HWM07 model for many cases. It has been shown that the irregularity cross-field anisotropy agrees quite well with the horizontal neutral wind direction.

Keywords:

ionosphere, middle-latitude ionosphere, ionospheric irregularities.



Введение

В работе исследуются пространственные особенности мелкомасштабных неоднородностей F-области ионосферы. Под мелкомасштабными неоднородностями подразумеваются вытянутые вдоль геомагнитного поля неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы с пространственными масштабами в нескольких сотен метров поперек магнитного поля. В работе [1] дана классификация этих неоднородностей согласно их соотношению осей. Приведены три типа неоднородностей:

«стержни» ("rods" — соотношение осей $a : 1 : 1$), «крылья» ("wings" — $a : b : 1$ при $a > b$) и «листы» ("sheets" — $a : a : 1$). Приведены также характерные соотношения осей: $5 : 1 : 1$, $15 : 1 : 1$ и $10 : 10 : 1$. Исходя из физических соображений предполагается, что наблюдение стержней более вероятно в высоких широтах, а наблюдение крыльев и листов — в средних широтах. С использованием метода спутникового радиозондирования и математической обработки

*Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (гранты РФФИ № 16-05-01024 А и № 15-05-02437 А).

радиосигнала [2], разработанного в Полярном геофизическом институте (ПГИ), в работе [3] описаны случаи наблюдения в среднеширотной ионосфере поперечно-анизотропных неоднородностей. Их параметры схожи с параметрами высокоширотных неоднородностей [4]: они вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (α) и в некотором направлении перпендикулярно ему (β), т. е. поперечно-анизотропны. При различных геофизических условиях поперечная анизотропия, так же как и в высоких широтах, имеет различную ориентацию (Ψ_A) относительно направления на север. Это сходство позволило предположить существование в средних широтах некоторого механизма, управляющего ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A , аналогичного дрейфу плазмы $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ для высокоширотных неоднородностей. Но электрические поля в средних широтах в спокойных условиях малы (1–5 мВ/м), соответственно, незначителен и электромагнитный дрейф, в то время как величина горизонтального нейтрального ветра в ночное время может достигать 200 м/с [5]. Поэтому цель данной работы — сопоставить полученные в работе [3] экспериментальные данные об ориентации поперечной анизотропии Ψ_A с теоретическими расчетами направления горизонтального нейтрального ветра, выполненными на основе модели HWM07 [6, 7].

Методика исследований

В период с 2008 по 2012 гг. ПГИ проводил регулярный прием спутниковых радиосигналов с применением уникальной научной Радиотомографической установки (РТУ) ПГИ КНЦ РАН. В ходе проводимого исследования использовались данные трех приемных станций, расположенных в средних широтах: г. Острогжск (50.87° с. ш.; 39.06° в. д.), г. Ростов-на-Дону (47.21° с. ш.; 39.70° в. д.) и г. Сочи (43.58° с. ш.; 39.77° в. д.). Несмотря на продолжительность периода наблюдений, итоговое количество данных для сопоставления с моделью HWM07 невелико — 110, что составляет ~3 % от общего числа сеансов наблюдений. В основном это связано с освещенностью: амплитудные сцинтилляции в спутниковом сигнале (показатель присутствия мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере) наблюдались преимущественно в ночное время суток. Затем, интенсивность сцинтилляций (рис. 1) не всегда была достаточной для применения метода определения параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей [1, 8].

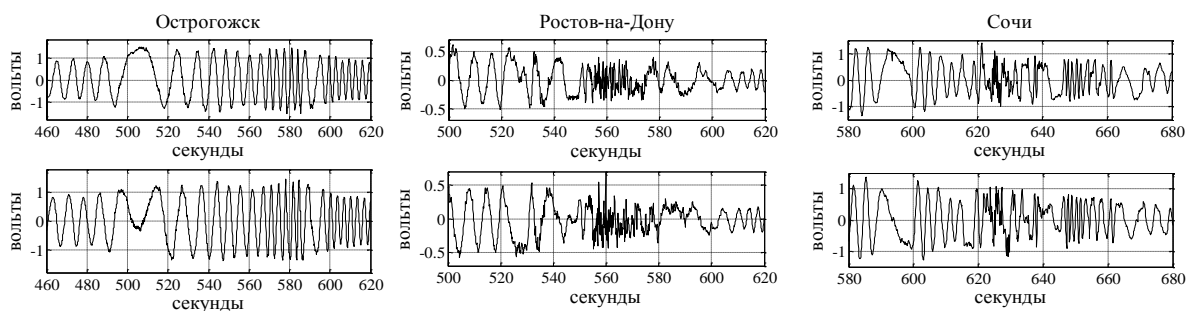


Рис. 1. Участки записи двух квадратурных составляющих спутникового радиосигнала, сделанные тремя станциями во время одного спутникового сеанса 15 июня 2010 г. с началом в 20:38 UT

Вольты, секунды нужно с прописной!

На рисунке 1 показаны исходные квадратурные составляющие радиосигнала в околоразенитной области, по которым можно визуально оценить степень интенсивности сцинтилляций: на станции Острогжск синусоидальная форма радиосигнала практически не искажена, в то время как в радиосигнале станций Ростов-на-Дону и Сочи присутствуют сцинтилляции, существенно искажающие его форму. Вычисленные в этих интервалах и представленные графически значения дисперсии логарифма относительной амплитуды в широтном профиле имеют максимум, в несколько раз превышающий уровень фона (рис. 2,

центральный и справа), при интенсивных сцинтилляциях и максимум, близкий к уровню фона (рис. 2, слева), при слабых сцинтилляциях.

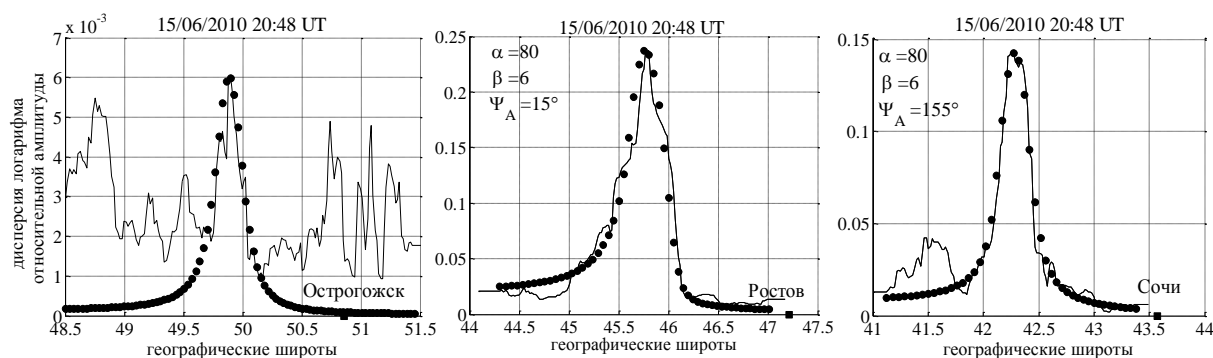


Рис. 2. Экспериментальная (сплошная линия) и теоретическая (кружки) кривые дисперсии логарифма относительной амплитуды, вычисленные по данным рис. 1 для каждой станции. В заголовке указана дата и время регистрации неоднородностей. В левом верхнем углу графиков приведены значения параметров анизотропии

Дисперсия и Географические необходимо с прописной, и A – курсивом!

Метод определения параметров неоднородностей состоит в аппроксимации изолированного экспериментального максимума теоретической кривой-моделью путем подбора величин α , β и Ψ_A . Поэтому в первых двух случаях можно достоверно определить параметры неоднородностей, во втором — нет. Аппроксимация показывает, что среднеширотные неоднородности сильнее вытянуты вдоль магнитного поля ($\alpha = 80$), чем поперек ($\beta = 6$). Сходство величин α и β на соседних станциях и небольшое различие между величинами Ψ_A ($\Delta\Psi = 40^\circ$) позволяет предположить однородную структуру ионосферы между станциями Ростов-на-Дону и Сочи.

Рассчитанные в результате анализа сцинтилляций направления ориентации поперечной анизотропии неоднородностей, в дальнейшем сравнивались с направлением нейтрального ветра, рассчитанного моделью HWM07 для этого времени и геофизических условий. Для примера, на рис. 3 показаны результаты сопоставления ориентации Ψ_A мелкомасштабных неоднородностей и направления ветра для данных, полученных на станциях Сочи и Ростов-на-Дону.

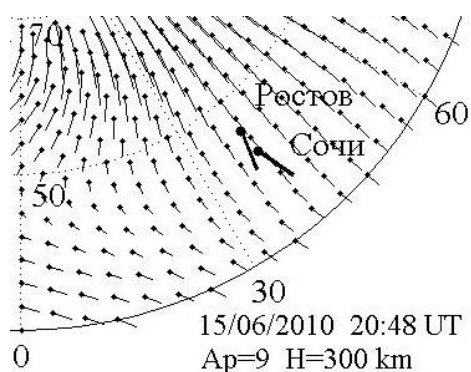


Рис. 3. Случай стационарного потока ветра. Распределение векторов скоростей горизонтального ветра для высоты 300 км, рассчитанное моделью HWM07 (тонкие векторы с точкой в начале вектора), и ориентация поперечной анизотропии (толстые векторы)

$A_p = 9$, $H = 300$ km!

В данном случае неоднородности были зарегистрированы в области стационарного потока ветра как в окрестности станций, так и по толщине F -слоя (200–400 км). Различие между ориентацией поперечной анизотропии и направлением ветра в Ростове $\Delta\Psi = 11^\circ$ при $V_W = 86$ м/с и в Сочи $\Delta\Psi = -27^\circ$ при $V_W = 77$ м/с. Очевидно, что модельные векторы соответствуют среднему значению экспериментальных данных. Учитывая этот факт, а также возможные в реальной ионосфере флуктуации потока ветра, приведшие к небольшому различию между значениями Ψ_A соседних станций, можно сделать вывод, что неоднородности вытягиваются вдоль направления ветра.

Результаты

В настоящей работе использован весь объем данных амплитудных сцинтилляций, полученных Радиотомографической установкой в период с июня 2008 г. по март 2012 г. — период проведения исследований в среднеширотной ионосфере. Продолжительность периода исследований была необходима для достоверного определения параметров мелкомасштабных неоднородностей. Из общего числа регистраций были отобраны регистрации, пригодные для дальнейшего анализа сцинтилляций применяемым методом, по которым были исследованы анизотропные мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F -области среднеширотной ионосферы. По результатам численного сопоставления между ориентацией поперечной анизотропии неоднородностей и направлением горизонтального ветра, рассчитанного моделью HWM07, установлено, что в большинстве случаев наблюдается хорошее согласие между экспериментальными и теоретическими данными, т. е. неоднородности ориентированы вдоль направления ветра.

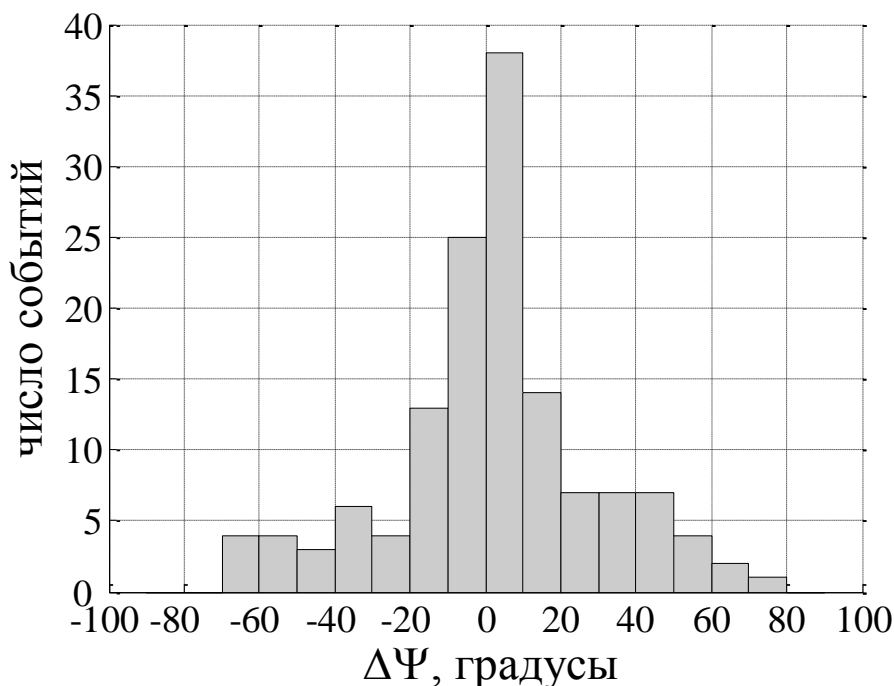


Рис. 4. Гистограмма различий между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии в период с июля 2008 г по март 2012 г.

Число – с прописной!

На рисунке 4 приведен результат численного сопоставления экспериментальных и теоретических данных за весь период наблюдений. Общее количество сопоставлений 161.

Гистограмма показывает численное различие $\Delta\Psi$ между значением ориентации поперечной анизотропии Ψ_A и направлением горизонтального ветра Ψ_W в каждом конкретном случае. Данные сгруппированы по интервалам с шагом 20° . Положительные величины гистограммы означают, что величина Ψ_A была больше величины Ψ_W . Отрицательные величины означают обратное. Очевидно, что максимум различий находится в интервале $[-20^\circ \div 20^\circ]$ и количество случаев уменьшается с ростом $\Delta\Psi$. Таким образом, наблюдается согласие между направлениями разных явлений, из чего можно заключить, что среднеширотные неоднородности ориентированы вдоль направления ветра.

Выводы

Исследованы мелкомасштабные неоднородности F -области среднеширотной ионосферы с применением уникальной научной установки РТУ ПГИ КНЦ РАН.

Метод определения пространственных параметров неоднородностей, использовавшийся для высокоширотных исследований, применим также в средних широтах. Определены параметры анизотропии ионосферных неоднородностей α , β и Ψ_A .

Показано, что в ряде случаев (в основном в ночных условиях) мелкомасштабные неоднородности в F -области среднеширотной ионосферы поперечно-анизотропны.

Соотношение параметров анизотропии определяется выражением $1 < \beta < \alpha$.

Пространственные параметры неоднородностей варьировали в следующих интервалах: α от 15 до 150; β от 2 до 40.

Соотношение $\beta:\alpha$ варьировалось от 1 : 3 до 1 : 10, в большинстве случаев составляя 1 : 7.

По форме среднеширотные неоднородности схожи с соответствующими высокоширотными неоднородностями.

Благодарности

Авторы благодарны сотрудникам лаборатории радиопросвечивания и уникальной научной установки РТУ Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ.

ЛИТЕРАТУРА

1. The anisotropy of high-latitude nighttime F region irregularities / R. C. Livingston [et al.] // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, № A12. P. 10519–10526.
2. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver / E. D. Tereshchenko [et al.] // Ann. Geophysicae. 1999. Vol. 17. P. 508–518.
3. Романова Н. Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F -области среднеширотной ионосферы // Proc. of XXXVIII Apatity Annual Seminar "Physics of Auroral Phenomena". 2015. P. 157–160.
4. Козлова М. О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F -области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов: дис. ... канд. физ.-мат. наук. М., 2002. 120 с.
5. Ишанов С. А., Клецуур С. В., Латышев К. С. Эффекты многомерности в теоретических моделях среднеширотной области F ионосферы // Вестник Балтийского федерального университета им. И. Канта. 2011. № 10. С. 33–39.
6. An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07 / D. P. Drob [et al.] // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. doi:10.1029/2008JA013668.
7. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds / J. T. Emmert [et al.] // J. Geophys. Res. 2008. Vol. 113. doi:10.1029/2008JA013541.
8. Tereshchenko E. D., Romanova N. Yu., Koustov A. V. VHF scintillations, orientation of the anisotropy of F -region irregularities and direction of plasma convection in the polar cap // Ann. Geophysicae. 2008. Vol. 26. P. 1725–1730.

Сведения об авторах

Романова Наталья Юрьевна — младший научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН

E-mail: romanova@pgi.ru

Юрик Роман Юрьевич — кандидат физико-математических наук, заведующий лабораторией Полярного геофизического института КНЦ РАН

E-mail: roman.yurik@pgi.ru

Author Affiliation

Natalya Y. Romanova — Junior Researcher of the Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

E-mail: romanova@pgi.ru

Roman Y. Yurik — PhD (Physics and Mathematics), Head of Laboratory at the Polar Geophysical Institute of the KSC of the RAS

E-mail: roman.yurik@pgi.ru

Библиографическое описание статьи

Романова, Н. Ю. Сопоставление ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в *F*-области среднеширотной ионосферы с моделью горизонтального ветра HWM07 / Н. Ю. Романова, Р. Ю. Юрик // Вестник Кольского научного центра РАН. — 2016. — № 4 (27). — С.

Reference

Romanova Natalya Y., Yurik Roman Y. Investigations of the Small-Scale Irregularities in *F*-Region of Middle-Latitude Ionosphere. *Herald of the Kola Science Centre of the RAS*, 2016, vol. 4 (27), pp. (In Russ.).