УДК 550.388.2:551.510.535

# ВЛИЯНИЕ ГОРИЗОНТАЛЬНОГО ВЕТРА НА ОРИЕНТАЦИЮ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В *F*-ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ (ПО ДАННЫМ Г. МОСКВА)

### © 2021 г. Н. Ю. Романова\*

Федеральное государственное бюджетное научное учреждение Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия \*E-mail: romanova@pgi.ru Поступила в редакцию 25.09.2020 г. После доработки 20.10.2020 г. Принята к публикации 27.11.2020 г.

Исследованы поперечно-анизотропные мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в *F*-области среднеширотной ионосферы. Сопоставление с моделью HWM07 показало, что ориентация поперечной анизотропии неоднородностей соответствует направлению горизонтального ветра, а неоднородности расположены на различных высотах *F*-области.

DOI: 10.31857/S0367676521030224

#### **ВВЕДЕНИЕ**

Известно, что мелкомасштабные неоднородности электронной плотности (от нескольких сотен метров до нескольких километров) в *F*-области ионосферы вытянуты вдоль и перпендикулярно геомагнитному полю, т.е. анизотропны. В работе [1] дана их классификация по соотношению осей: стержни (rods, a : 1 : 1), крылья (wings, a:b:1, a > b) и листы (sheets, a:a:1), где соотношения осей: 5 : 1 : 1, 10 : 5 : 1 и 10 : 10 : 1. Предполагается, что наблюдение стержней более вероятно в высоких широтах, а наблюдение крыльев и листов – в средних. Разработанный в Полярном геофизическом институте (ПГИ) метод спутникового радиозондирования и математической обработки радиосигнала [2] позволяет путем анализа амплитудных сцинтилляций, полученных со спутника наземным единичным приемником, исследовать анизотропные мелкомасштабные неоднородности *F*-области. Используя этот метод, в работе [3] исследованы высокоширотные мелкомасштабные неоднородности: они вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (ось α) и в некотором направлении перпендикулярно ему (ось β), т.е. поперечно-анизотропны. Буквенные обозначения  $\alpha$  и  $\beta$  имеют тот же физический смысл, что и буквенные обозначения a и b в работе [1]. Также установлено, что при различных геофизических условиях ось β имеет различную ориентацию относительно направления на географический сепоперечной анизотропии  $\Psi_{A}^{,*}$ , она измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке. Параметры α, β и Ψ<sub>4</sub> получили название "параметры анизотропии". Установлено, что в высоких широтах ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  соответствует направлению ионосферной конвекции в *F*-слое. В работе [4] исследованы параметры анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в Fобласти среднеширотной ионосферы: параметры α и β оказались схожи с параметрами α и β высокоширотных неоднородностей, а ориентация  $\Psi_A$  соответствует направлению горизонтального ветра, как показало сопоставление с моделью Horizontal Wind Model (HWM07) [5, 6]. Входные параметры модели – день в году, время (UT), географические координаты, индекс магнитной активности Ар. Выходные параметры модели – распределение векторов ветра в виде двух компонент – зональной и меридиональной. В зависимости от поставленной задачи можно получить различные варианты распределения векторов горизонтального ветра: высотный профиль (0-400 км), широтный и долготный профили, MLT-профиль, профиль для конкретного дня, Ар-профиль. Модель основывается на накопленных за 50 лет данных спутников, ракет и наземных измерений и реализована в компьютерной программе Fortran 90.

вер. Это явление получило название "ориентация

Цель данной работы — исследование ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  мелкомасштабных неоднородностей в *F*-области среднеширотной ионосферы, по данным, полученным над московским регионом в спокойных геомагнитных условиях.

#### НАБЛЮДЕНИЯ

В период с октября 2008 г. по март 2012 г. ПГИ проводил регулярный прием радиосигналов низкоорбитальных (~1000 км) отечественных навигационных спутников наземным томографическим приемником, расположенным в г. Москва (55.67° N, 37.63° Е). Эта станция входит в состав радиотомографической установки ПГИ, протяженность которой в указанный период была от арх. Шпицберген до г. Сочи.

Опишем кратко суть метода определения параметров мелкомасштабных неоднородностей (подробно метод описан в работе [2]). Наземным приемником в течение 18 минут нахождения спутника в зоне радиовидимости записывается радиосигнал, в квадратурах которого наблюдаются сцинтилляции при прохождении через неоднородный *F*-слой ионосферы. Если рассчитать дисперсию логарифма относительной амплитуды радиосигнала и представить ее графически, то в участке наибольшей концентрации мелкомасштабных неоднородностей искаженный радиосигнал имеет вид максимума, в несколько раз превышающий уровень фона (рис. 1а). Пример приведен для 03.04.2011 г. с регистрацией неоднородностей в 07:52 UT. Наличие изолированного максимума позволяет определить параметры анизотропии неоднородностей путем аппроксимации этого максимума теоретической моделью с численным подбором оптимальных величин  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . Эти параметры считаются постоянными в широтно-долготной области, занимаемой максимумом, которая считается областью наблюдения неоднородностей. Ширина максимума зависит от величины вытянутости неоднородностей вдоль (ось α) и перпендикулярно (ось β) магнитному полю. Пространственное положение максимума зависит от ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$ . Значения  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ , при которых аппроксимация наилучшая ( $\beta > 1$ , зачерненные кружки), приведены в левом верхнем углу. Очевидно, что аппроксимация максимума моделью изотропных неоднородностей (β = 1, точки) не дает согласие между обеими кривыми при любых других параметрах теоретической модели, т.е. мелкомасштабные неоднородности в этом примере анизотропны. Параметры α и β – это степени вытянутости, величины безразмерные. В данном примере неоднородности вытянуты преимущественно вдоль

геомагнитного поля, чем поперек, поскольку соотношение  $\beta$  :  $\alpha$  составляет 1 : 9, что наблюдалось в высоких [3] и средних широтах [4].

Исследование в спокойных геомагнитных условиях показало, что параметры анизотропии неоднородностей  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  можно определить преимущественно в ночное время суток, поскольку в эти часы интенсивность сцинтилляций была достаточной, чтобы высота экспериментального максимума превышала уровень фона в несколько раз. В дневное время суток высота максимума была близка к фоновому уровню, что не позволяло достоверно определить параметры неоднородностей.

Сопоставление ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  с направлением ветра  $\Psi_W$ , рассчитанного по модели HWM07, показало, что мелкомасштабные неоднородности наблюдались при неизменном направлении ветра на высотах 200-400 км, поскольку для координат вершины максимума направление ветра с увеличением высоты менялось не существенно: от  $\Psi_W = 290^\circ$  до  $\Psi_W =$  $= 307^{\circ}$ . На рис. 16. 1е в географической системе координат приведено широтно-долготное распределение векторов горизонтального ветра модели HWM07 для высот h = 200 км и h = 400 км с указанием величин скоростей, рассчитанных для координат вершины максимума. Заметим: поскольку поперечная анизотропия - ось, то в данном случае к значению  $\Psi_A$  прибавлено 180° для наглядности сопоставления с направлением ветра. Сопоставление с моделью HWM07 показывает хорошее согласие между  $\Psi_A$  и  $\Psi_W$  на различных высотах *F*-слоя:  $\Delta \Psi = (\Psi_A - \Psi_W)$  составляет  $\Delta \Psi = 17^\circ$  на h = 200 км и  $\Delta \Psi = 0^\circ$  на h = 400 км.

Убедившись на этом и других аналогичных примерах, что ориентация  $\Psi_A$  соответствует направлению ветра  $\Psi_W$ , сопоставления были сделаны при изменяющемся направлении ветра на различных высотах *F*-слоя. Нужно заметить, что таких случаев было более половины. На рис. 2а приведен пример наблюдения мелкомасштабных неоднородностей 10.04.2009 г. в 19:13 UT, когда преимущественно зональное направление ветра на высоте 200 км (рис. 26) приобретает меридиональную компоненту при увеличении высоты до 400 км (рис. 2в). На рис. 2а в экспериментальном графике дисперсии логарифма относительной амплитуды присутствует единичный максимум, как и в предыдущем случае. Аппроксимация максимума показала, что неоднородности анизотропны ( $\beta > 1$ ), и соотношение  $\beta$ :  $\alpha$  составляет 1:4. Численное сопоставление параметров  $\Psi_A$  и  $\Psi_W$  показало, что  $\Delta \Psi$  минимально ( $\Delta \Psi = 1^{\circ}$ ) на высоте h == 210 км и максимально ( $\Delta \Psi = 58^{\circ}$ ) на h = 400 км. Обобщив подобные случаи, нужно сказать, что  $\Delta \Psi$  была минимальной для высот ниже 300 км в



**Рис. 1.** Определение параметров неоднородностей при неизменном по высоте направлении ветра; a – аппроксимация экспериментального максимума (тонкая кривая) теоретическими моделями изотропных неоднородностей ( $\beta$  = 1, точки) и анизотропных ( $\beta$  > 1, кружки). В левом верхнем углу – параметры анизотропии  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  оптимальной аппроксимации. Пунктиром показан график углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения;  $\delta$ , e – широтно-долготное распределение векторов горизонтального ветра HWM07-модели (тонкие векторы, точка – начало вектора) и ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  неоднородностей (толстый вектор) в области их регистрации.

63% от общего числа случаев — 426. Таким образом, если придерживаться гипотезы о связи ориентации поперечной анизотропии с направлением ветра, то можно предположить, что в данном примере неоднородности располагались на высоте 210 км. В разделе 3 обзорной работы [7] показано, что неоднородности с размерами поперек линий геомагнитного поля от нескольких сотен метров до нескольких километров регистрировались в интервале высот от ~150 км до высоты максимума F2-слоя ~250 км — наибольшей высоты их возможной регистрации. В этом же разделе показано, что на высотах 240—280 км наблюдается наиболее интенсивное развитие неоднородностей с размерами 200—800 м, а на высотах на 20—60 км выше наиболее интенсивными являются неоднородности километровых масштабов.

В рассмотренных выше примерах в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды присутствовал только один изолированный максимум, превышающий уровень фона. Однако случаи с двумя или тремя максимумами имели место также часто, как и случаи с единичным максимумом. В примере на рис. 3*a* 16.02.2009 г. в



**Рис. 2.** Наблюдение области с неоднородностями, имеющими постоянную ориентацию  $\Psi_A$  при изменяющемся по высоте направлении ветра. Условные обозначения те же, что на рис. 1.

17:32 UT в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды наблюдаются два изолированных максимума с вершинами при широтах 54.1° с.ш. и 55.0° с.ш. Аппроксимация каждого максимума индивидуальной теоретической кривой показывает, что неоднородности анизотропны ( $\beta > 1$ ), соотношение  $\beta : \alpha$  составляет 1 : 5. При различных значениях ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_{A1} = 139^{\circ}$  и  $\Psi_{A2} = 54^{\circ}$  параметры  $\alpha$ и  $\beta$  удается подобрать в рамках единой модели ( $\alpha_1 = \alpha_2$  и  $\beta_1 = \beta_2$ ) как показателя однородной структуры ионосферы между станциями. Но большое различие между  $\Psi_{A1}$  и  $\Psi_{A2}$  указывает на непостоянство направления ветра в данной области. На рис. 36, 3*в* распределение векторов ветра приведено для тех высот, где различие ( $\Psi_A - \Psi_W$ ) для каждого максимума было минимальным. Для меньшего максимума при направлении ветра  $\Psi_W = 59^{\circ}$ различие ( $\Psi_A - \Psi_W$ ) составило  $\Delta \Psi = -5^{\circ}$  (h = 230 км). Для большего максимума при направлении ветра  $\Psi_W = 116^{\circ}$  различие ( $\Psi_A - \Psi_W$ ) составило  $\Delta \Psi = 23^{\circ}$  (h = 350 км).

Важно заметить, что наличие нескольких максимумов в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды для данных московского региона служит показателем регистрации неоднородностей на разных высотах во время одного спутникового сеанса.



**Рис. 3.** Наблюдение областей с неоднородностями, имеющими различную ориентацию  $\Psi_A$  при изменяющемся по высоте направлении ветра. Условные обозначения те же, что на рис. 1.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование методом радиозондирования *F*-области среднеширотной ионосферы показало, что мелкомасштабные неоднородности электронной плотности поперечно-анизотропны. Исследование в спокойных геомагнитных условиях показало, что параметры анизотропии неоднородностей  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  можно определить преимущественно в ночное время суток.

Ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  менялась в интервале [1°–178°]. Численное сопоставление между  $\Psi_A$  и направлением горизонтального ветра  $\Psi_W$  (модель HWM07) в условиях неизменного направления ветра на различных высотах показало их хорошее согласие, т.е. мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления горизонтального ветра. Численное сопоставление  $\Psi_A$  и  $\Psi_W$  в условиях изменяющегося направления ветра показало, что наименьшее различие  $\Delta \Psi$  между ними наблюдается на высотах преимущественно ниже 300 км. Однако были случаи, когда  $\Delta \Psi$  была наименьшей на высотах выше 300 км. Это были случаи, когда в одном спутниковом сеансе регистрировались пространственноразнесенные области неоднородностей с одинаковыми значениями  $\Psi_A$  внутри каждой области, но разными (несколько десятков градусов) для разных областей.

Автор благодарит сотрудников лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ. Работа выполнена при поддержке РФФИ (проект № 19-05-00941).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

 Livingston R.C., Rino C.L., Owen J., Tsunoda R.T. // J. Geophys. Res. 1982. V. 87. No. A12. P. 10519.

- 2. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T. // Ann. Geophys. 1999. V. 17. No. 4. P. 508.
- Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в *F*-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов. Автореф. дис. ... канд. физ.мат. наук. Мурманск: ПГИ КНЦ РАН, 2002. 30 с.
- 4. *Романова Н.Ю.* // Геомагн. и аэроном. 2017. Т. 57. № 4. С. 463.
- Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G. et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. No. A12. Art. No. A013668
- Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G. et al. // J. Geophys. Res. 2008. V. 113. No. A11. Art. No. A013541.
- 7. Фролов В.Л. // Солн.-земн. физ. 2015. Т. 1. № 2. С. 22.

## Influence of the horizontal wind on the orientation of the cross-field anisotropy of small-scale irregularities in *F*-region of the middle-latitude ionosphere (on Moscow data)

#### N. Yu. Romanova\*

Polar Geophysical Institute, Murmansk, 183010 Russia \*e-mail: romanova@pgi.ru

We investigated the cross-field anisotropic small-scale irregularities of electron density in *F*-region of the middle-latitude ionosphere. Comparison with HWM07-model obtained good agreement between the orientation of the cross-field anisotropy and the direction of horizontal wind. Also found, that irregularities were on difference height in *F*-region.