

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2018.41.143-145

КОРРЕЛЯЦИЯ МЕЖДУ НАПРАВЛЕНИЕМ ДРЕЙФА И ОРИЕНТАЦИЕЙ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В ИОНОСФЕРЕ НАД МОСКВОЙ

Н.Ю. Романова¹, В.А. Панченко², В.А. Телегин²

¹ФГБНУ "Полярный геофизический институт", г. Мурманск, Россия

²Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва, Россия

Аннотация. Проведено численное сравнение экспериментальных данных, полученных в F-области ионосферы над Московским регионом. Используются данные, полученные в январе 2015 года. Сравнение проводилось между направлением дрейфа (ионозонд DPS-4, установленный в ИЗМИРАН), и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных (несколько сот метров) неоднородностей электронной плотности (радиотомографический приемник, созданный в Полярном геофизическом институте, установленный в МГУ). Получено хорошее согласие между экспериментальными данными. В ряде случаев различные значения ориентации поперечной анизотропии соответствовали изменению в направлении дрейфа.

Введение

Методом радиозондирования и последующей математической обработки радиосигнала [1], разработанными в Полярном геофизическом институте, можно исследовать мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы с пространственными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров поперёк магнитного поля. Неоднородности анизотропны, т.е. вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (ось α – продольная ось анизотропии) и менее вытянуты в направлении поперёк геомагнитного поля (ось β – поперечная ось анизотропии). Соотношение осей: $\alpha > \beta$. При различных геофизических условиях поперечная анизотропия (ось β) как в высоких широтах [2], так и в средних [3] имеет различную ориентацию (угол Ψ_A) относительно направления на географический север. В работах [2, 3] показано, что причиной поперечной анизотропии неоднородностей (а следовательно, различной ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A) в первом случае был дрейф плазмы $E \times B$, во втором случае – горизонтальный нейтральный ветер.

В данной работе исследуются мелкомасштабные неоднородности в F-области ионосферы над г. Москва. Экспериментальные данные об ориентации поперечной анизотропии Ψ_A будут сопоставлены с направлением дрейфа Ψ_D крупномасштабных неоднородностей по данным ионозонда DPS-4, полученными в ближайшее время.

Наблюдения

В период января 2015 г. было рассмотрено 13 случаев, когда, с одной стороны, можно было определить параметры мелкомасштабных неоднородностей α , β и Ψ_A и, с другой стороны, можно было определить направление и скорость дрейфа крупномасштабных неоднородностей.

Опишем кратко суть метода определения дрейфа. Измерение скорости дрейфа ионосферных крупномасштабных неоднородностей ионозондами DPS-4 базируется на возможности измерять доплеровские сдвиги (т.е. радиальные скорости перемещения) и угловое расположение на «карте неба» отдельных ионосферных неоднородностей. Если выбрать из всей совокупности неоднородностей три не совпадающих между собой, то предполагая, что у них один и тот же вектор скорости, можно записать несложную систему уравнений используя их угловое положение и их доплеровские сдвиги и решив эту систему получить этот вектор скорости. Выбирая всевозможные подобные «тройки» получим массив векторов скорости в геомагнитных или географических координатах. На ионозонде DPS-4 этот алгоритм реализован автоматически. Если неоднородностей много (сотни или тысячи), то можно оценить средние значения скорости и дисперсию скоростей, определяющую точность измерений. Удовлетворительными можно считать измерения, где средние значения скоростей в 3-5 раз превышают среднеквадратичные отклонения. DPS-4 позволяет получать зависимости трех проекций скоростей движения неоднородностей от времени. В дневные часы, когда ионосферное рассеяние меньше (меньше число неоднородностей на «картах неба») и узок

занимаемый ими конус вокруг зенита), точность измерения скоростей хуже. В ночных условиях, когда неоднородностей на «картах неба» сотни или тысячи, точность измерения скоростей повышается.

Опишем кратко суть метода определения параметров мелкомасштабных неоднородностей (подробно метод описан в работе [1]). Наземным приемником в течение 18 минут нахождения спутника в зоне радиовидимости записывается радиосигнал, который искажается при прохождении через F-слой ионосферы, содержащий мелкомасштабные неоднородности. Если рассчитать дисперсию логарифма относительной амплитуды радиосигнала и представить её графически, то в участке наибольшей концентрации неоднородностей искаженный радиосигнал имеет вид максимума, в несколько раз превышающий уровень фона. Это означает, что в области пространства, занимаемой максимумом, можно определить пространственные параметры неоднородностей: α , β и Ψ_A . Их можно определить, если аппроксимировать экспериментальный максимум аналогичным теоретическим максимумом – моделью мелкомасштабных неоднородностей. Аппроксимация происходит путем подбора численных значений α , β и Ψ_A . Ширина теоретического максимума зависит от величин α и β . Пространственное положение теоретического максимума зависит от величины Ψ_A и в большинстве случаев определяется с точностью 2-3°. Продемонстрируем метод определения параметров α , β и Ψ_A наглядно, где будет также показано, что ориентация поперечной анизотропии Ψ_A коррелирует с направлением дрейфа Ψ_D в различных геофизических ситуациях: при стационарном и нестационарном направлении дрейфа.

Рассмотрим ситуацию, когда направление дрейфа было стационарным во время каждого из двух спутниковых сеансов, временной интервал между которыми составил около 20 минут (рис. 1 а,б). Такие спутниковые сеансы считаются «близкими», они удобны для демонстрации быстротекущих процессов в ионосфере, например, изменение или неизменность направления дрейфа.

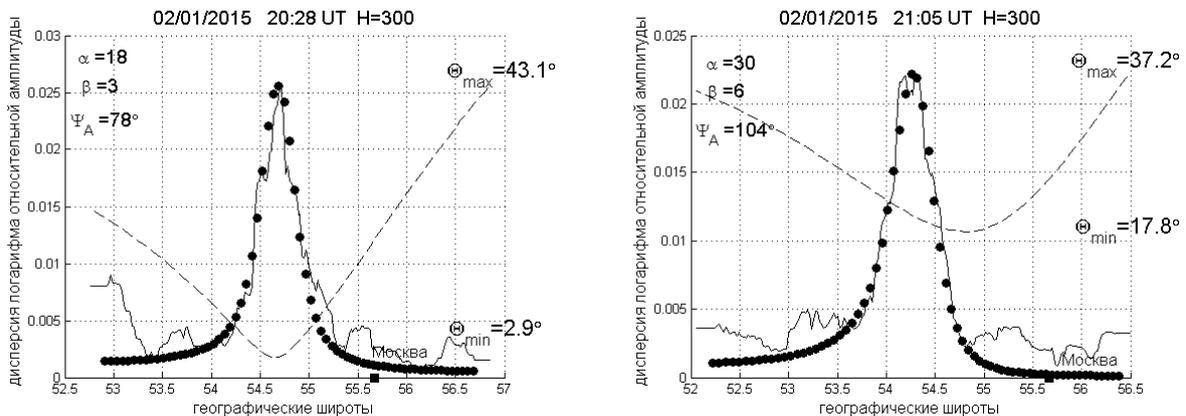


Рисунок 1. Экспериментальные графики дисперсии логарифма относительной амплитуды спутникового сигнала (*тонкая кривая*), в которых присутствует только один изолированный максимум. Аппроксимация теоретическим максимумом (*черные кружки*) каждого экспериментального максимума позволяет определить параметры неоднородностей (в левом верхнем углу каждого рисунка). Пунктиром показан график углов спутника с магнитным полем относительно наблюдателя в Москве.

В каждом экспериментальном графике присутствует единичный максимум, превышающий уровень фона в несколько раз, что свидетельствует о присутствии мелкомасштабных неоднородностей в пространственной области, охватываемой максимумом. В спутниковом сеансе с началом в 20:28 UT $\Psi_A = 78^\circ$, а в сеансе с началом в 21:05 UT $\Psi_A = 104^\circ$. Поскольку β – ось поперечной анизотропии (как мы писали в введении), то при необходимости к текущим значениям можно прибавить 180° . Поэтому для рис. 1а $\Psi_A = 258^\circ$, а для рис. 1б $\Psi_A = 284^\circ$. Очевидно, что ориентация поперечной анизотропии Ψ_A изменилась на несколько десятков градусов, чему должно быть объяснение. Сопоставление с направлением дрейфа, полученном ионозондом DPS-4 в аналогичные моменты времени, показало, что направление дрейфа имело значения $\Psi_D = 263^\circ$ (для сеанса на рис. 1а) и $\Psi_D = 278^\circ$ (для сеанса на рис. 1б). В обоих случаях скорость дрейфа превышала 100 м/с, что на наш взгляд обеспечило хорошее согласие экспериментальных данных. «Близкие сеансы» демонстрируют корреляцию величин Ψ_A и Ψ_D : изменение направления дрейфа Ψ_D привело к аналогичному изменению ориентации поперечной анизотропии Ψ_A , что также может быть обусловлено высокой скоростью дрейфа.

Рассмотрим другую ситуацию: направление дрейфа менялось в течение одного спутникового сеанса (рис. 2). В экспериментальном графике присутствуют два максимума различной величины, превышающие уровень фона, поэтому каждый максимум будет проанализирован индивидуально. Присутствие двух максимумов в графике во время одного спутникового сеанса подробно рассмотрено в работе [4], посвященной исследованию мелкомасштабных неоднородностей высоких широт (арх. Шпицберген). В работе [4]

несколько максимумом являлись показателем изменения направления дрейфа в полярной шапке в пространстве или во времени. Метод [1] предполагает постоянство параметров мелкомасштабных неоднородностей только в области, охватываемой одним максимумом, поэтому в данном примере каждый экспериментальный максимум аппроксимирован индивидуально. Для рис. 1а $\Psi_A = 129^\circ (\equiv 309^\circ)$, а для рис. 1б $\Psi_A = 77^\circ (\equiv 257^\circ)$. Очевидно, что ориентация поперечной анизотропии Ψ_A не просто менялась на протяжении спутникового сеанса, а в различных пространственных областях присутствуют неоднородности с различными параметрами, чему должно быть объяснение. Сопоставление с направлением дрейфа, полученном ионозондом DPS-4 на протяжении всего спутникового сеанса, показало, что направление дрейфа изменялось от $\Psi_D = 265^\circ$ до $\Psi_D = 280^\circ$ при скорости дрейфа 28 м/с (± 9 м/с). Это не очень существенное изменение, величина Ψ_D находится в интервале величин Ψ_{A1} и Ψ_{A2} , что свидетельствует о согласии между экспериментальными данными, полученными разными методами. Наличие в графике двух максимумов, вероятно, связано с малой скоростью дрейфа. Возможно, присутствует влияние нейтрального ветра, но это исследование только планируется.

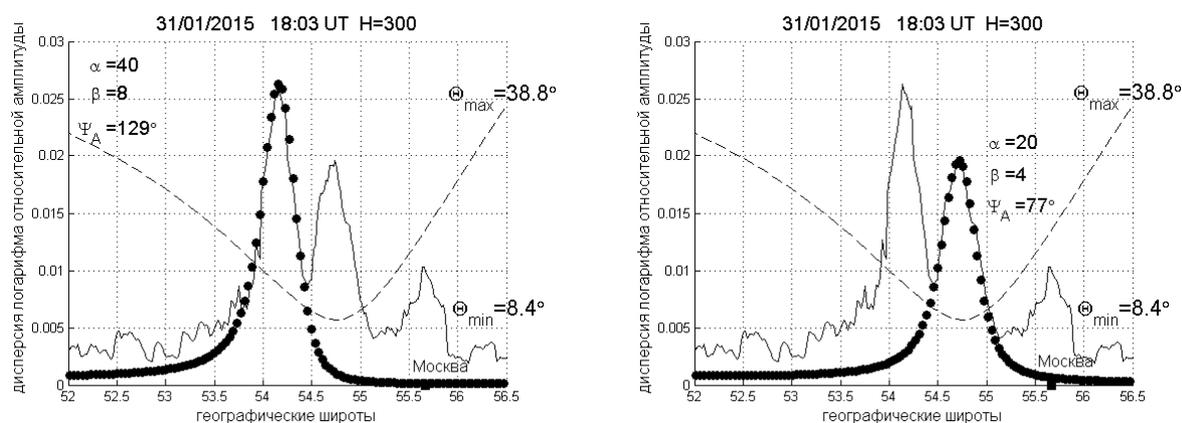


Рисунок 2. В графике дисперсии логарифма относительной амплитуды присутствуют два максимума. Условные обозначения те же, что на рис. 1.

Заключение

В январе 2015 г. методом радиозондирования были исследованы мелкомасштабные неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы над г. Москва в ночное время в спокойных геомагнитных условиях. В 13 случаях была численно определена ориентация поперечной анизотропии Ψ_A неоднородностей и сопоставлена с направлением дрейфа плазмы Ψ_D по данным ионозонда DPS-4 в ближайшее время для каждого случая. По результатам сопоставления установлено хорошее согласие между этими экспериментальными данными. То есть, в плоскости, перпендикулярной магнитному полю, мелкомасштабные неоднородности вытянуты вдоль направления дрейфа.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ No 16-05-01024 А. Авторы благодарят сотрудников лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ.

Литература

1. Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T. Anisotropy of ionospheric irregularities determined from the amplitude of satellite signals at a single receiver // Ann. Geophysicae. – 1999. – V. 17. – P. 508 - 518.
2. Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов: Дис. канд. физ.-мат. наук: 25.00.29. — М., 2002. — 120 с.
3. Романова Н.Ю. Взаимосвязь между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и Аэронавигация. – 2017. – Т. 57. № 4. – С. 463 - 471.
4. 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. – V. 26. № 7. – P. 1725 - 730.