

DOI: 10.25702/KSC.2588-0039.2019.42.190-193

## ОРИЕНТАЦИЯ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЕ ДРЕЙФА В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ: ЗНАЧИМОСТЬ ВЫБОРА ОБЛАСТИ НАБЛЮДЕНИЯ (НА ПРИМЕРЕ МОСКОВСКОГО РЕГИОНА, ЯНВАРЬ 2014 г.)

В.А. Телегин<sup>1</sup>, Н.Ю. Романова<sup>2</sup>, В.А. Панченко<sup>1</sup>, Г.А. Жбанков<sup>3</sup>

<sup>1</sup>ФГБНУ Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн  
им. Н.В. Пушкова РАН, г. Москва; e-mails: [telvika@gmail.com](mailto:telvika@gmail.com), [leo-ion@yandex.ru](mailto:leo-ion@yandex.ru)

<sup>2</sup>ФГБНУ Полярный геофизический институт, г. Мурманск; e-mail: [romanova@pgi.ru](mailto:romanova@pgi.ru)

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт физики южного федерального университета (НИИ физики  
ЮФУ), г. Ростов-на-Дону; e-mail: [gzhbankov@sfsedu.ru](mailto:gzhbankov@sfsedu.ru)

**Аннотация.** Данная работа является продолжением исследования связи направления дрейфа  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  и ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных (несколько сот метров) неоднородностей F-области над Московским регионом. Проведено численное сопоставление этих экспериментальных данных, полученных в январе 2014 г. Направление дрейфа электронов определено с помощью ионозонда DPS-4, установленного в ИЗМИРАН. Ориентация поперечной анизотропии определена методом математической обработки спутникового радиосигнала, принятого наземным томографическим приемником, установленным в МГУ. Хорошее согласие между экспериментальными данными объясняется тем, что направление дрейфа было определено в области максимально близкой к пространственному положению мелкомасштабных неоднородностей.

### Введение

Метод [1] радиозондирования с последующей математической обработкой амплитуды радиосигнала, разработанный в Полярном геофизическом институте (ПГИ), позволяет исследовать мелкомасштабные (сотни метров поперёк магнитного поля) неоднородности электронной плотности в F-области ионосферы. Известно, что среднеширотные неоднородности анизотропны [2], т.е. вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля (ось  $\alpha$  – продольная ось анизотропии) и менее вытянуты в направлении поперёк геомагнитного поля (ось  $\beta$  – поперечная ось анизотропии). Таким образом, форма поперечного геомагнитному полю сечения – эллипс с большей осью  $\beta$ . Величины осей для среднеширотной ионосферы определяются выражением  $1 < \beta < \alpha$  и соотношение  $\beta : \alpha$  варьирует от 1 : 2 до 1 : 20, в большинстве случаев составляя 1 : 7 [2], что схоже с соответствующим соотношением высокоширотных неоднородностей [3]. При различных геофизических условиях поперечная анизотропия (ось  $\beta$ ) как в высоких широтах, так и в средних имеет различную ориентацию (угол  $\Psi_A$ ) относительно направления на географический север. Причиной различной ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  является горизонтальный нейтральный ветер в среднеширотной ионосфере [2] и дрейф плазмы  $\mathbf{E} \times \mathbf{V}$  в высокоширотной ионосфере [3].

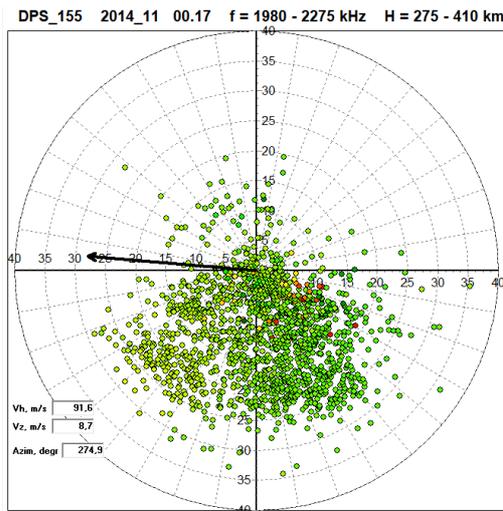
Здесь мы продолжаем исследование связи  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  в Московском регионе, начатое в [4], где при численном сопоставлении (угол  $\Psi_D$  – направление дрейфа относительно географического севера) в немногих случаях (от общего их количества) различие между этими величинами было больше ожидаемого. В данной работе мы покажем причину этого на примере трёх случаев в январе 2014 г.

### Наблюдения

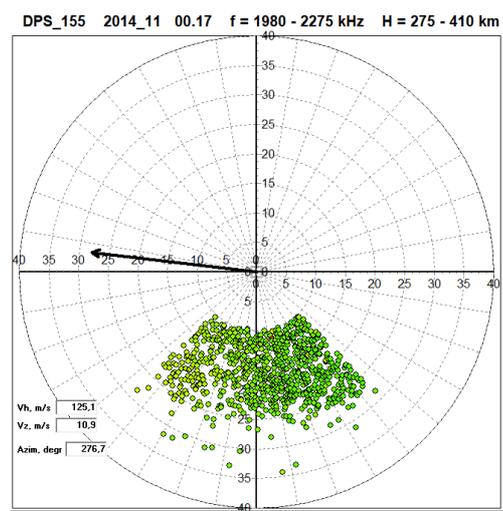
Радиотомографическая цепочка ПГИ (Шпицберген – Кольский п-ов – Карелия – Москва) много лет ведёт мониторинг ионосферы, принимая радиосигналы российских навигационных спутников с периодом обращения  $\sim 104$  минуты и высотой  $\sim 1000$  км. Из данных за январь 2014 г., полученных радиотомографическим приёмником в МГУ (г. Москва), выбраны 3 случая регистрации мелкомасштабных неоднородностей в спокойных геомагнитных условиях. Одновременно ионозондом DPS-4, установленном в ИЗМИРАН, были получены данные о направлении дрейфа.

Опишем кратко метод 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.

11 января 2014 г.

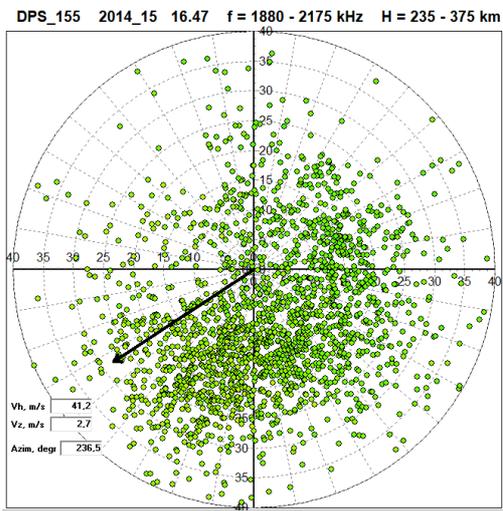


$\Psi_D = 275^\circ$

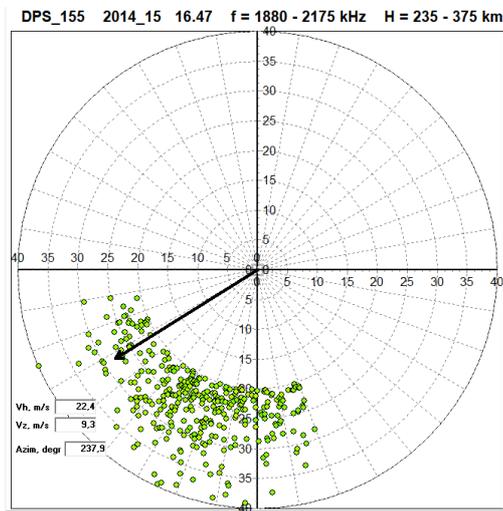


$\Psi_D = 275^\circ$

15 января 2014 г.

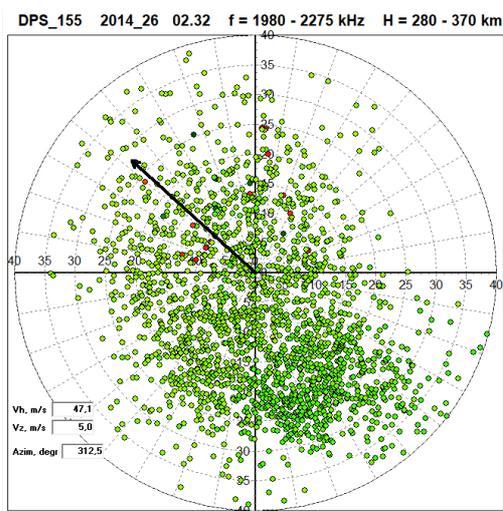


$\Psi_D = 237^\circ$

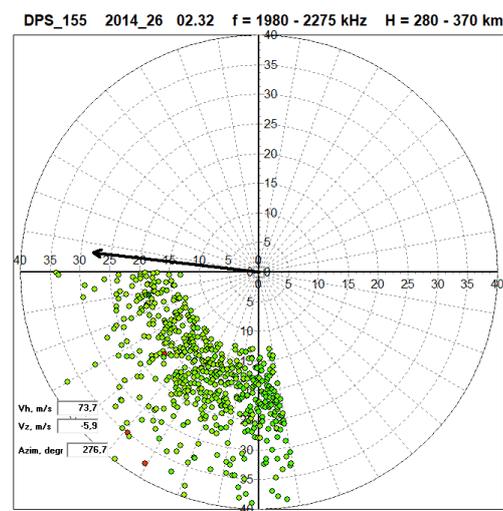


$\Psi_D = 237^\circ$

26 января 2014 г.



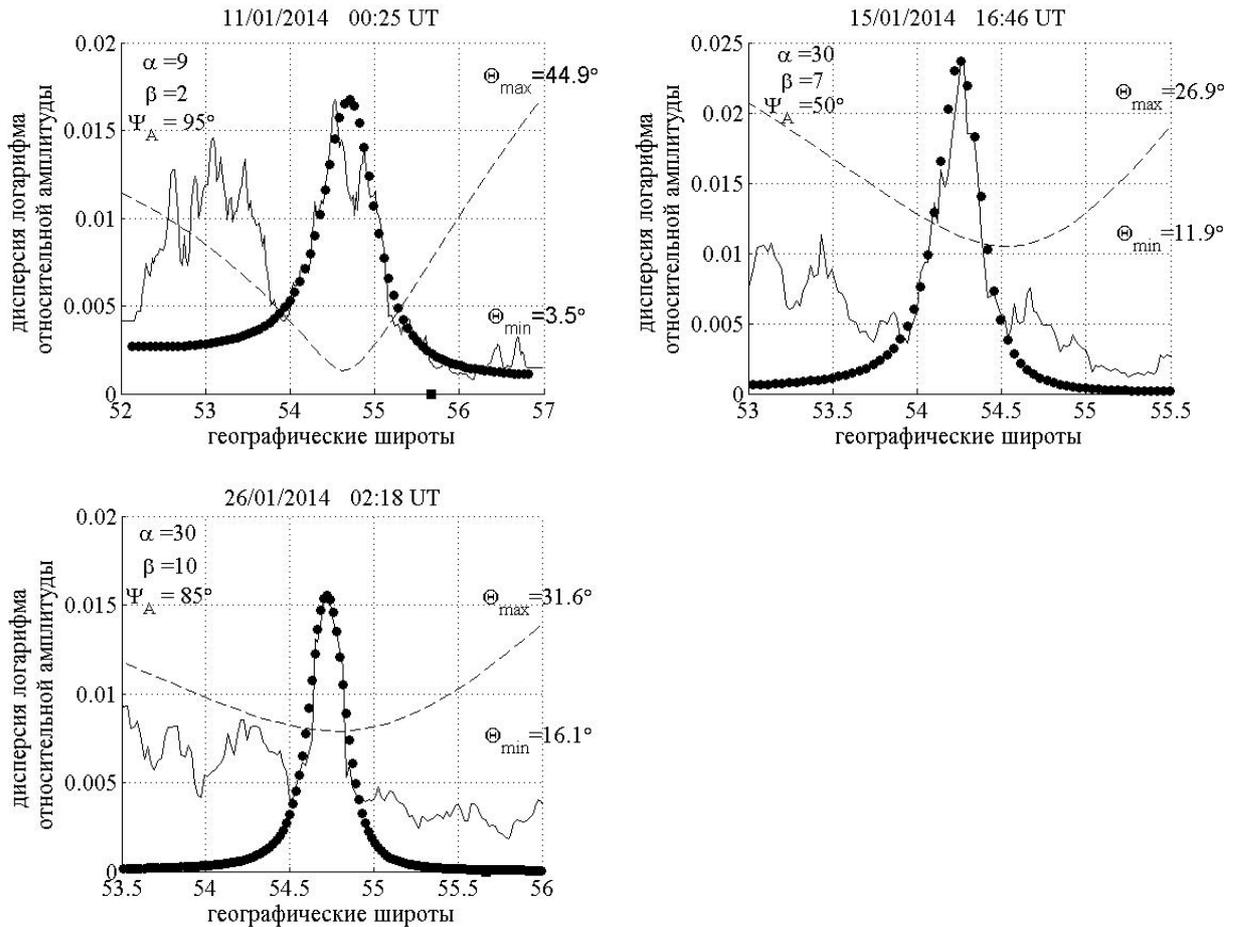
$\Psi_D = 313^\circ$



$\Psi_D = 267^\circ$

Рисунок 1. Карты неба ионозонда DPS-4 для 11, 15 и 26 января 2014 г. с направлением дрейфа (черный вектор), рассчитанным по большому массиву данных (левый столбец) и по суженной области (правый столбец).

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. Ионозонд 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.



**Рисунок 2.** Экспериментальный (тонкая сплошная кривая) и теоретический (черные кружки) графики дисперсии логарифма относительной амплитуды спутникового сигнала. Пунктиром показан график углов  $\Theta$  спутника с магнитным полем относительно наблюдателя.

Опишем кратко метод определения параметров мелкомасштабных неоднородностей:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . 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 участок наибольшей сцинтилляции амплитуды радиосигнала имеет вид максимума, в несколько раз превышающего уровень фона. Путём аппроксимации экспериментального максимума теоретическим максимумом (моделью мелкомасштабных неоднородностей) можно определить параметры неоднородностей:  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$ . Ширина теоретического максимума зависит от величин  $\alpha$  и  $\beta$ , а его пространственное положение – от величины  $\Psi_A$ , которая в большинстве случаев определяется с точностью 2-3°.

Рассмотрим выбранные 3 случая: 11, 15 и 26 января 2014 г. Для каждого из них на рис. 1 приведены карты неба ионозонда DPS-4.

Зелёные точки на всех шести графиках – области отраженного радиосигнала, по совокупности которых определено направление дрейфа (черный вектор с началом в центре каждого графика). Численно направление дрейфа  $\Psi_d$  приведено внизу каждого графика. В левом столбце карты неба показаны полностью. В правом столбце показаны суженные области, т.е. такие участки карты неба, которые пространственно близки к области регистрации мелкомасштабных неоднородностей. Сужение области наблюдения дрейфа в первых двух случаях не изменило величину  $\Psi_d$ . Но в третьем случае различие составило  $46^\circ$ , что указывает на изменчивость направления дрейфа в данном случае.

На рис. 2 приведены графики логарифма относительной амплитуды – экспериментальный и теоретический. Метод определения параметров неоднородностей предполагает их постоянство в области, охватываемой максимумом.

Параметры неоднородностей  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  приведены в левом верхнем углу каждого графика на рис. 2. Поскольку  $\beta$  – ось поперечной анизотропии, то при необходимости к значениям  $\Psi_A$  можно прибавить  $180^\circ$ . В нашем случае такая необходимость есть, она обусловлена направлением дрейфа. Поэтому, для 11 января  $\Psi_A = 95^\circ (\equiv 275^\circ)$  и при  $\Psi_d = 275^\circ$  различие  $|\Psi_A - \Psi_d|$  составляет  $\Delta\Psi = 0^\circ$ . Для 15 января  $\Psi_A = 50^\circ (\equiv 230^\circ)$  и при  $\Psi_d = 237^\circ$  различие  $\Delta\Psi = 7^\circ$ . Для 26 января  $\Psi_A = 85^\circ (\equiv 265^\circ)$  и при  $\Psi_d = 267^\circ$  различие  $\Delta\Psi = 2^\circ$ . Очевидно, если пользоваться данными о направлении дрейфа, рассчитанного по полной карте неба, то различие составило бы  $\Delta\Psi = 48^\circ$ .

### Заключение

Численное сравнение между направлением дрейфа в F-слое и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей показало их хорошее согласие. Различие между ними тем меньше, чем ближе расположены наблюдаемые области. Экспериментальные данные были получены в московском регионе в январе 2014 г. ионозондом DPS-4, установленном в ИЗМИРАН, и радиотомографическим приёмником ПГИ, установленном в МГУ.

**Благодарность.** Авторы благодарят сотрудников лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ. Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 19-05-00941.

### Список литературы

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. 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.
3. 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.
4. Романова Н.Ю., Панченко В.А., Телегин В.А. Корреляция между направлением дрейфа и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в ионосфере над Москвой // Сборник трудов международной научно-практической конференции «Наука и образование в Арктическом регионе» (г. Мурманск, МГТУ, 2-6 апреля 2018). – 2018. – С. 161-166.