

УДК 550.388.2;551.510.535

## ВЗАИМОСВЯЗЬ ДРЕЙФА СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В $F$ -ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

© 2022 г. Н. Ю. Романова<sup>1</sup>, \*, В. А. Телегин<sup>2</sup>, \*\*, В. А. Панченко<sup>2</sup>, \*\*\*, Г. А. Жбанков<sup>3</sup>, \*\*\*\*

<sup>1</sup>Полярный геофизический институт (ПГИ), г. Мурманск, Россия

<sup>2</sup>Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н.В. Пушкова РАН (ИЗМИРАН), г. Москва, г. Троицк, Россия

<sup>3</sup>Научно-исследовательский институт физики Южного федерального университета (НИИ физики ЮФУ), г. Ростов-на-Дону, Россия

\*e-mail: romanova@pgi.ru

\*\*e-mail: telvika@gmail.com

\*\*\*e-mail: panch@izmiran.ru

\*\*\*\*e-mail: gzhbankov@sfnu.ru

Поступила в редакцию 24.11.2020 г.

После доработки 01.09.2021 г.

Принята к публикации 24.09.2021 г.

Двумя разными методами в ходе двух независимых длительных экспериментов исследованы характеристики неоднородных ионосферных структур. Методом радиопросвечивания ионосферы сигналами ИСЗ с последующей математической обработкой вариаций амплитуды радиосигнала, принятого наземным приемником (расположенным в МГУ им. М.В. Ломоносова), в различные дни и время суток (преимущественно ночное) были определены параметры анизотропии мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности в  $F$ -области среднеширотной ионосферы, а также пространственное положение локальных областей, в которых измерены эти параметры. Усовершенствованный авторами подход к обработке карт неба при радиолокации неоднородной ионосферы с поверхности земли ионозондом  $DPS-4$  (Москва, ИЗМИРАН), позволил оценить скорость и направление дрейфа среднemasштабных неоднородностей в этих же локальных областях. Сопоставление результатов, полученных на основе радиопросвечивания с ИСЗ и наземной радиолокации ( $DPS-4$ ), показало, что мелкомасштабные неоднородности в перпендикулярной геомагнитному полю плоскости вытянуты преимущественно вдоль направления дрейфа среднemasштабных неоднородностей, если экспериментальные данные получены одновременно и относятся к той же ограниченной пространственной области ионосферы.

DOI: 10.31857/S0016794022020134

### 1. ВВЕДЕНИЕ

Исследование неоднородных структур ионосферы является одной из важных задач на современном этапе развития ионосферных исследований, в том числе и для повышения качества и точности решения прикладных задач. Хорошо известно, что  $F$ -область ионосферы имеет достаточно сложную структуру. Помимо крупномасштабных неоднородностей электронной плотности с размерами от нескольких сотен до двух тысяч километров, в ионосфере наблюдаются неоднородности меньших масштабов, вплоть до нескольких сантиметров. Методы исследования неоднородных структур обычно не универсальны: для каждого из них есть интервал размеров

этих структур, где применение конкретного метода позволяет получать достоверные результаты. Настоящая работа – итог тандема двух методов, применение которых обусловлено присутствием в ионосфере неоднородностей, сильно отличающихся по поперечным размерам.

С одной стороны, использован метод радиолокации ионосферы с поверхности земли декаметровыми радиоволнами ионозонда  $DPS-4$ . Интервал характерных поперечных размеров неоднородностей, для которых наиболее обоснован данный метод, – от одной до нескольких зон Френеля. В численном эквиваленте интервал составляет от 10 до 50–100 км, в зависимости от высоты отражения и частоты зондирования. В рам-

ках данной статьи неоднородности таких размеров будем называть среднemasштабными.

С другой стороны, метод радиопросвечивания ионосферы сигналами ИСЗ на двух когерентных частотах  $\sim 150$  и  $\sim 400$  МГц с частотой оцифровки радиосигнала 50 Гц оптимален для исследования неоднородностей с характерными поперечными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров. В рамках данной статьи неоднородности таких размеров будем называть мелкомасштабными, несмотря на то, что в ионосфере существуют неоднородности еще меньших масштабов, вплоть до сантиметров.

Предметом нашего исследования являются среднemasштабные и мелкомасштабные неоднородности, а именно: связь между направлением дрейфа среднemasштабных неоднородностей и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в  $F$ -области среднeshиротной ионосферы. Ранее аналогичное исследование проводилось в высокоширотной ионосфере [Козлова, 2002] и полярной шапке [Терещенко и др., 2004; Tereshchenko et al., 2008].

Для оценки величины и направления скорости дрейфа плазмы использованы результаты вертикального зондирования ионосферы, полученные с помощью ионозонда *DPS-4*, размещенного в ИЗМИРАН (г. Москва, г. Троицк). А именно: использованы данные по угловому спектру радиоволн (отраженных от неоднородной ионосферы), полученные при когерентной обработке сигналов с малоэлементной антенной решетки, в варианте так называемых карт неба ("*SkyMaps*").

Отметим, что начало исследованиям угловых характеристик рассеянных радиоволн положили работы нескольких групп исследователей в США [Allen et al., 1974] и в СССР [Афраймович и др., 1977; Афраймович, 1982; Голян и др., 1983; Полиматида, 1984; Панченко, 1993]. Позже группой Рейниша были разработаны методики оценки угловых спектров рассеянных радиоволн на основе малоэлементной приемной антенной решетки и доплеровской фильтрации, и т.н. "карт неба" [Reinisch et al., 1998, 2009; Galushko et al., 2008]. Данная методика была встроена в алгоритм работы и математическое обеспечение ионозонда *DPS-4*. В последние годы эта методика широко применяется в исследованиях среднemasштабных неоднородностей (<http://www.digisonde.com/publications.html>). Хотя данный метод наиболее обоснован для среднemasштабных неоднородностей от 5–10 км до 50–100 км, судя по результатам некоторых работ, где данные *DPS-4* сравниваются с одновременно полученными данными некогерентного рассеяния [Scali et al., 1995; Reinisch et al., 2005], он, видимо, может применяться для оценки движения и более мелких неоднородностей,  $\sim 1$ –2 км.

Примерно в те же годы, в основном группой В.Д. Гусева в МГУ, разрабатывался т.н. дифференциально-фазовый метод исследования неоднородностей в ионосфере [Гусев, 1976; Гусев и др., 1980; Гусев и Овчинникова, 1980; Гусев и Раджабов, 1983]. Метод хорошо теоретически проработан и находит свое применение [Ларюнин и др., 2008], но в нашем исследовании его применение невозможно из-за алгоритма работы и реализации аппаратной части *DPS-4*.

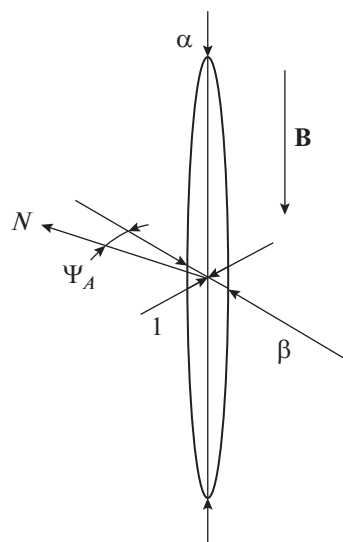
Исследование формы мелкомасштабных неоднородностей в  $F$ -области также началось довольно давно. Известно, что мелкомасштабные неоднородности вытянуты в продольном и поперечном направлении относительно линий геомагнитного поля, т.е. анизотропны. В работе [Livingston et al., 1982] неоднородности классифицированы по соотношению осей, обозначающих величину вытянутости неоднородностей вдоль магнитного поля и перпендикулярно ему: стержни (rods), крылья (winds) и листы (sheets). Предполагается, что наблюдение стержней более вероятно в высоких широтах, а наблюдение крыльев и листов – на средних широтах. До недавнего времени ориентация поперечной вытянутости неоднородностей не связывалась с каким-либо физическим процессом, а только отмечалось ее различное направление. Например, в работе [Moorcroft and Arima, 1972] описана ориентация в направлении "север–юг", в работах [Fejer and Kelley, 1980; Fremouw et al., 1978] – в направлении "запад–восток", в работе [Rino and Livingston, 1982] – вдоль  $L$ -оболочки. В работе [Боголюбов и др., 1984а, б] определена форма неоднородностей методом корреляционного анализа флуктуации сигналов орбитальных ИСЗ. Отметим, что к примененному Боголюбовым и др. [1984а, б] методу корреляционного анализа дифракционной картины поля для определения параметров неоднородностей за долгие годы его существования [Briggs et al., 1950] накопилось много вопросов, частично снижающих ценность полученных им результатов. Так, для сигналов, отраженных от ионосферы и принятых на земле, в работе [Briggs et al., 1969] было установлено, что с уменьшением длины сторон треугольников рассчитываемая скорость дрейфа неоднородностей уменьшается. Для расстояний между антеннами в 100 м эта скорость составляет от 1/2 до 1/3 величины, получаемой из расчета по всей многоантенной системе большого размера. Аналогичная четкая зависимость получаемых параметров неоднородностей от геометрии приемной системы наблюдалась Терещенко и Черняковым [1986] при использовании сигналов ИСЗ "на просвет" ионосферы, причем там использовался усовершенствованный вариант полного корреляционного анализа. В работе [Боголюбов и др., 1984а, стр. 147] указывается, что "измеряемые этим методом степени вытянутости

неоднородностей не отражают их реальную анизотропию”. В работе [Боголюбов и др., 19846] отмечена существенная зависимость формы неоднородностей от предполагаемой толщины и высоты расположения занимаемого ими слоя, однако сделан вывод, что неоднородности авральной ионосферы, ответственные за флуктуации амплитуды сигналов, вытянуты вдоль силовых линий геомагнитного поля  $\mathbf{H}$ . При этом они имеют форму, близкую к аксиально-симметричной, в плоскости, ортогональной к  $\mathbf{H}$ , и могут быть сосредоточены в локальных областях, протяженных вдоль  $\mathbf{H}$  ( $L_h \geq 100\text{--}200$  км), имеющих достаточно малые северо-южные размеры ( $L_{c-y} < 10$  км).

Интересные результаты, часть из которых пересекаются с результатами выполненной нами работы, дали методы мультиспектрального анализа флуктуаций сигналов ИСЗ с исследованием фрактальной структуры неоднородностей в ионосфере, развитые в работах Нижегородской школы (НИРФИ) [Алимов и др., 2007, 2008, 2009]. Однако в нашей работе эта методика не может быть применена, поскольку используемая Алимовым и др. [2007, 2008, 2009] модель неоднородностей предполагает равенство поперечных осей эллипсоида, т.е. модель описывает поперечно-изотропные неоднородности.

Мы тоже используем подход, свободный от указанных выше недостатков корреляционного метода: один наземный двухчастотный приемник, две когерентные частоты с борта ИСЗ, информация извлекается из флуктуаций амплитуды принимаемого сигнала, неоднородности считаются трехмерно анизотропными, а зависимость определяемых параметров неоднородностей от высоты их расположения и толщины слоя слабая.

В рамках этого подхода метод наземного приема радиосигнала ИСЗ, прошедшего через ионосферу, и анализа его амплитудных флуктуаций [Tereshchenko et al., 1999], разработанный в Полярном геофизическом институте (ПГИ), позволил детально исследовать анизотропные неоднородности высокоширотной [Козлова, 2002] и среднеширотной [Романова, 2015]  $F$ -области ионосферы. Было определено численное соотношение величин поперечной и продольной вытянутости неоднородностей. Соотношение было различным при различных геофизических условиях, но в большинстве случаев величина продольной вытянутости превышала величину поперечной вытянутости в несколько раз. Это иллюстрирует модель условной отдельно взятой неоднородности, представленная на рис. 1. Модель представляет собой эллипсоид, который не является эллипсоидом вращения. Буквенные обозначения  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  имеют общий термин “параметры анизотропии”. Поясним физический смысл каждого параметра.



**Рис. 1.** Условная модель типичной поперечно-анизотропной мелкомасштабной неоднородности электронной плотности в  $F$ -области ионосферы.  $\alpha$  – вытянутость в продольном направлении по отношению к наименьшей поперечной оси;  $\beta$  – вытянутость в поперечном направлении;  $\Psi_A$  – ориентация поперечной анизотропии, отсчитывается от направления на географический север.

На рисунке 1 видно, что неоднородность вытянута преимущественно вдоль геомагнитного поля (продольная анизотропия  $\alpha$ ) и в некотором направлении перпендикулярно ему (поперечная анизотропия  $\beta$ ), при этом  $\alpha > \beta > 1$ . Поскольку  $\beta > 1$ , то такие неоднородности называются “поперечно-анизотропными”, а ориентация параметра  $\beta$  относительно направления на географический север получила название “ориентация поперечной анизотропии” и буквенное обозначение  $\Psi_A$ . Величина  $\Psi_A$  измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке.

В  $F$ -области высокоширотной ионосферы [Козлова, 2002] и полярной шапке [Tereshchenko et al., 2008] ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  соответствует направлению электромагнитного дрейфа, т.е. электромагнитный дрейф может быть причиной ориентации поперечной анизотропии.

В работе [Романова, 2017] проведено сравнение направления горизонтального нейтрального ветра, рассчитанного по модели HWM07 [Drob et al., 2008; Emmert et al., 2008], с экспериментальными данными по ориентации поперечной анизотропии в  $F$ -области среднеширотной ионосферы. На основании проведенного анализа сделан вывод о том, что нейтральный ветер на ионосферных высотах также может являться причиной ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей. Следует отметить,

что экспериментальные данные по направлению ветра на ионосферных высотах практически отсутствуют, поэтому проверить сделанный вывод в настоящее время не представляется возможным.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЕ АНИЗОТРОПИИ СРЕДНЕШИРОТНЫХ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ В F-ОБЛАСТИ ИОНОСФЕРЫ МЕТОДОМ РАДИОПРОСВЕЧИВАНИЯ

Много лет ПГИ проводил регулярные наблюдения F-области ионосферы над московским регионом, принимая радиосигналы низкоорбитальных (~1000 км) навигационных ИСЗ системы “Парус” наземным приемником, расположенном в МГУ им. М.В. Ломоносова г. Москва (55.67° N, 37.63° E). Эта станция входит в состав радиотомографической установки ПГИ [Терещенко и др., 2016]. Протяженная вдоль траектории нисходящих ИСЗ (с севера на юг) радиотомографическая установка создавалась для реконструкции двумерной структуры ионосферы методом лучевой фазоразностной томографии. В данной же работе будут проанализированы флуктуации амплитуды радиосигнала, принятые единичной станцией, причем как нисходящих, так и восходящих (с юга на север) витков орбиты спутника. Техническая реализация метода радиозондирования ионосферы двумя частотами ИСЗ обоснована в работе [Kunitsyn and Tereshchenko, 2003; Куницын и др., 2007]. Отметим главное, что целесообразность использования российских навигационных спутников заключается в возможности одновременного приема двух когерентных частот (~150 и ~400 МГц). Использование сигнала 400 МГц, слабо подверженного дифракции на неоднородностях, в качестве опорной частоты при синхронном детектировании сигнала 150 МГц, позволяет убрать из фазы предметной волны частоты 150 МГц доплеровскую составляющую, обусловленную перемещением спутника. Это позволяет выделить в предметной волне изменения фазы вследствие только ионосферных неоднородностей.

Опишем метод определения параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей. Для этого в разделе 2.1. приведем базовые соотношения между дисперсией логарифма относительной амплитуды рассеянного радиосигнала и параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  рассеивающих неоднородностей. В разделе 2.2. дадим оценку применимости модели трехмерно-анизотропных неоднородностей со степенным показателем спектра для исследования реальных неоднородностей в среднеширотной ионосфере.

### 2.1. Соотношения между дисперсией амплитуды рассеянного на анизотропных неоднородностях радиосигнала ИСЗ и параметрами рассеивающих неоднородностей

Хорошо известно, что в F-области ионосферы высоких широт мелкомасштабные неоднородности анизотропны. Поэтому метод определения параметров анизотропии  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  из амплитудных флуктуаций рассеянного радиосигнала ИСЗ был разработан применительно к высокоширотным трехмерно-анизотропным рассеивателям. Детальное описание метода посвящены публикации [Tereshchenko et al., 1999, 2004], а также несколько разделов в коллективных монографиях русскоязычного [Куницын и др., 2007] и англоязычного [Kunitsyn and Tereshchenko, 2003] изданий. Поэтому в данном разделе мы приведем только т.н. “базовые соотношения” из этих изданий с кратким описанием приближения, в рамках которого они были получены, и выводы из этих базовых соотношений применительно к цели данной работы.

Базовые соотношения связывают дисперсию логарифма относительной амплитуды  $\sigma_\chi^2$  волны, рассеянной на трехмерно-анизотропных неоднородностях, с параметрами  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  трехмерно-анизотропных рассеивателей:

$$\sigma_\chi^2 = \frac{\lambda^2 r_e^2 \alpha \beta L_0^{3-p} \pi^{(p-1)/2}}{2^{-p/2+3} \sin\left(\frac{\pi}{4}(p-2)\right) \Gamma((p-3)/2)} \times \\ \times \int_{z_u}^{z_d} \frac{\sigma^2(z)}{\sqrt{1+\gamma(z)}} R_F^{p-2}(z) F\left(1-\frac{p}{2}, \frac{1}{2}, 1, \frac{\gamma(z)}{1+\gamma(z)}\right) \times \quad (1) \\ \times \left[ C(z) - \sqrt{A^2(z) + B^2(z)} \right]^{-p/2} dz,$$

где

$$\gamma(z) = \frac{2\sqrt{A^2(z) + B^2(z)}}{C(z) - \sqrt{A^2(z) + B^2(z)}}, \quad A = \frac{1}{2} [(\alpha^2 - 1) \times \\ \times \sin^2 \theta(z) + (\beta^2 - 1)(\sin^2 \Psi_A \cos^2 \theta(z) - \cos^2 \Psi_A)], \\ B = (\beta^2 - 1) \sin \Psi_A \cos \Psi_A \cos \theta(z), \\ C = 1 + \frac{1}{2} [(\alpha^2 - 1) \sin^2 \theta(z) + (\beta^2 - 1)(\sin^2 \Psi_A \times \\ \times \cos^2 \theta(z) + \cos^2 \Psi_A)].$$

Физический смысл параметров  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  описан выше. Здесь поясним, что  $F\left(1-\frac{p}{2}, \frac{1}{2}, 1, \frac{\gamma(z)}{1+\gamma(z)}\right)$  – гипергеометрическая функция;  $\lambda = 2$  м – длина волны;  $r_e = 2.82 \times 10^{-15}$  м – классический радиус электрона;  $R_F$  – радиус Френеля;  $\sigma^2(z)$  – дисперсия флуктуации плотности;  $z_u$  и  $z_d$  – нижняя и

верхняя границы неоднородного слоя вдоль оси  $z$  в направлении от приемника к спутнику;  $\Gamma$  – гамма-функция;  $L_0$  – внешний масштаб неоднородностей;  $\theta(z)$  – угол между направлением “приемник–спутник” и магнитным полем;  $p$  – показатель степени.

Расчеты сделаны с использованием степенной модели [Secan et al., 1997] спектра неоднородностей электронной плотности с показателем спектра  $0 < p < 4$ ; величина  $p$  определяется по высокочастотной асимптоте амплитудного спектра экспериментальных данных [Tereshchenko et al., 2004].

Базовые соотношения выведены на основе метода плавных возмущений в приближении Рытова [Рытов и др., 1978]. Это приближение применимо только к слабым мерцаниям, т.е. к мерцаниям, для которых выполняется условие  $\sigma_\chi^2 \leq 0.3$ . Исследования амплитудных мерцаний в высокоширотной и среднеширотной ионосфере показывают, что уровень наблюдающихся мерцаний редко превышает указанное пороговое значение, что позволяет использовать приближение Рытова. Поэтому соотношение (1) можно использовать для анализа экспериментальных флуктуаций амплитуды.

*2.2. Применимость модели трехмерно-анизотропных неоднородностей со степенным показателем спектра для исследования среднеширотных мелкомасштабных неоднородностей*

Как было сказано выше, модель неоднородностей со степенным показателем спектра была апробирована в условиях высокоширотной ионосферы. Аналогично, для исследования амплитудных флуктуаций радиосигнала, прошедшего через среднеширотную ионосферу, будет проведено сопоставление теоретических и вычисленных по экспериментальным данным кривых дисперсии логарифма относительной амплитуды  $\sigma_\chi^2$ . На примере радиосеанса 3 апреля 2010 г. проведем пошаговое исследование принятого радиосигнала в качестве демонстрации применения теоретических расчетов к анализу экспериментальных данных. Конечным шагом будет определение параметров анизотропии  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$ .

По всей записи квадратурных компонент  $A \cos \varphi$  и  $A \sin \varphi$  преобразованного радиосигнала на частоте  $\sim 150$  МГц (где  $A$  – амплитуда радиосигнала и  $\varphi$  – фаза радиосигнала) вычисляется величина амплитуды  $A = \sqrt{(A \cos \varphi)^2 + (A \sin \varphi)^2}$ , график которой приведен на рис. 2. Максимум амплитудных флуктуаций приходится на  $\sim 480$  с, что соответствует времени 18:12 UT. Продолжи-

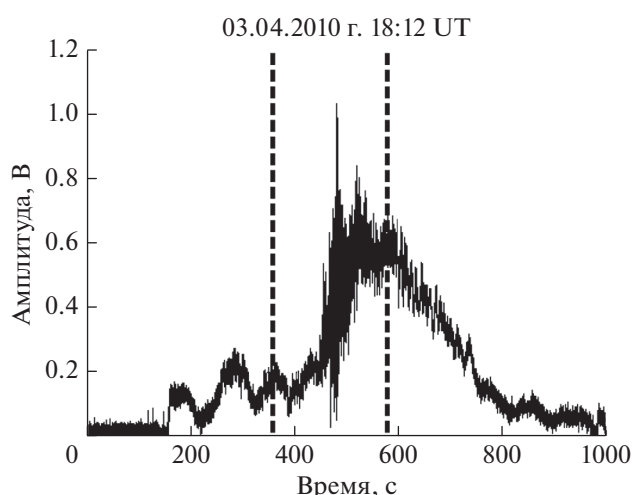
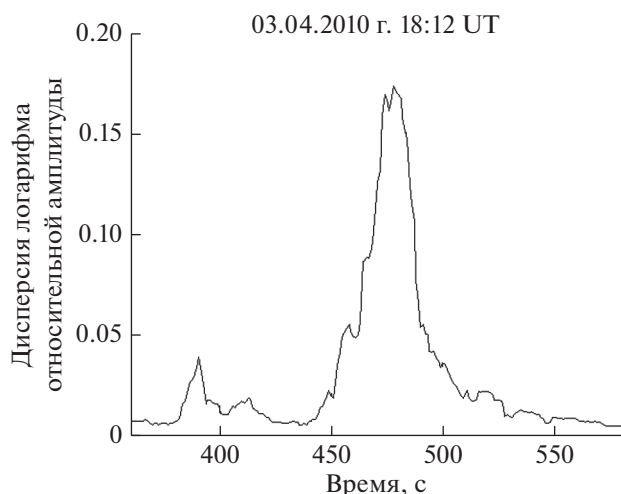


Рис. 2. График амплитуды радиосигнала 3 апреля 2010 г., принятого в течение 18 мин нахождения спутника в зоне радиовидимости, с наибольшей интенсивностью флуктуаций амплитуды на  $\sim 480$  с (в 18:12 UT).

тельность всей записи квадратурных компонент составляет 1080 с (18 мин). Дискретность регистрации радиосигнала – 0.02 с, что соответствует частоте оцифровки 50 Гц. Вертикальными штриховыми линиями обозначены границы области дальнейшего исследования, где наличие флуктуаций в центральной ее части и их отсутствие на флангах определяют принцип выбора этих границ. В выделенном интервале вычисляется дисперсия логарифма относительной амплитуды, представленная на рис. 3. Вычисление дисперсии происходит, обычно, в каждом из 10-секундных интервалов, на которые разбивается весь массив значений амплитуды. Допускается выбор интервала из значений 8–12 с. Эта величина обусловлена тем, что интервал должен в несколько раз превышать время, за которое луч спутник–приемник пересекает неоднородности предполагаемого типичного размера. Поскольку амплитудные флуктуации в наибольшей степени происходят на неоднородностях с размерами порядка величины радиуса первой зоны Френеля, применительно к длинам волн спутников серии “Парус” эта величина немного меньше километра. При высоте орбиты 1000 км и скорости 7.5 км/с луч с ИСЗ пересекает ионосферу на высоте, например, 300 км за 10 с просвечивает участок длиной  $\sim 20$  км, что в несколько раз больше характерных размеров мелкомасштабных неоднородностей.

На рисунке 3 видно, что в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды присутствует единственный максимум, образованный вследствие усиления амплитудных флуктуаций. Поскольку высота максимума в несколько раз превышает фоновый уровень, его можно аппроксимировать теоретической функцией, рассчитан-



**Рис. 3.** Зависимость дисперсии логарифма относительной амплитуды от времени для интервала, выделенного на рис. 2.

ной на основе базового соотношения (1), и определить параметры анизотропии неоднородностей  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$ . Базовое соотношение (1) содержит величину внешнего масштаба неоднородностей  $L_0$ , которая не может быть определена из экспериментальных данных радиопросвечивания. Поскольку  $L_0$  входит в соотношение (1) как масштабный коэффициент перед интегралом, он не искажает форму кривой  $\sigma_\chi^2$ , если представить соотношение (1) графически. Поэтому аппроксимация теоретической функцией  $\sigma_\chi^2$  будет выполняться функцией дисперсии, деленной на постоянный масштабный множитель, как это было сделано при апробации базового соотношения (1) на высокоширотных данных радиопросвечивания. Соотношение (1) приобретает вид

$$\sigma_\chi^2 = \alpha\beta \int_{z_0}^{z_d} \frac{\sigma^2(z)}{\sqrt{1+\gamma(z)}} R_F^{p-2}(z) F\left(1 - \frac{p}{2}, \frac{1}{2}, 1, \frac{\gamma(z)}{1+\gamma(z)}\right) \times \left[ C(z) - \sqrt{A^2(z) + B^2(z)} \right]^{-p/2} dz. \quad (2)$$

Прежде чем применить соотношение (2) к экспериментальному максимуму на рис. 3, продемонстрируем изменение этого графика функции при изменении переменных  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  для спутниковых пролетов с максимальными углами места  $75^\circ$ – $90^\circ$  для координат ст. Москва.

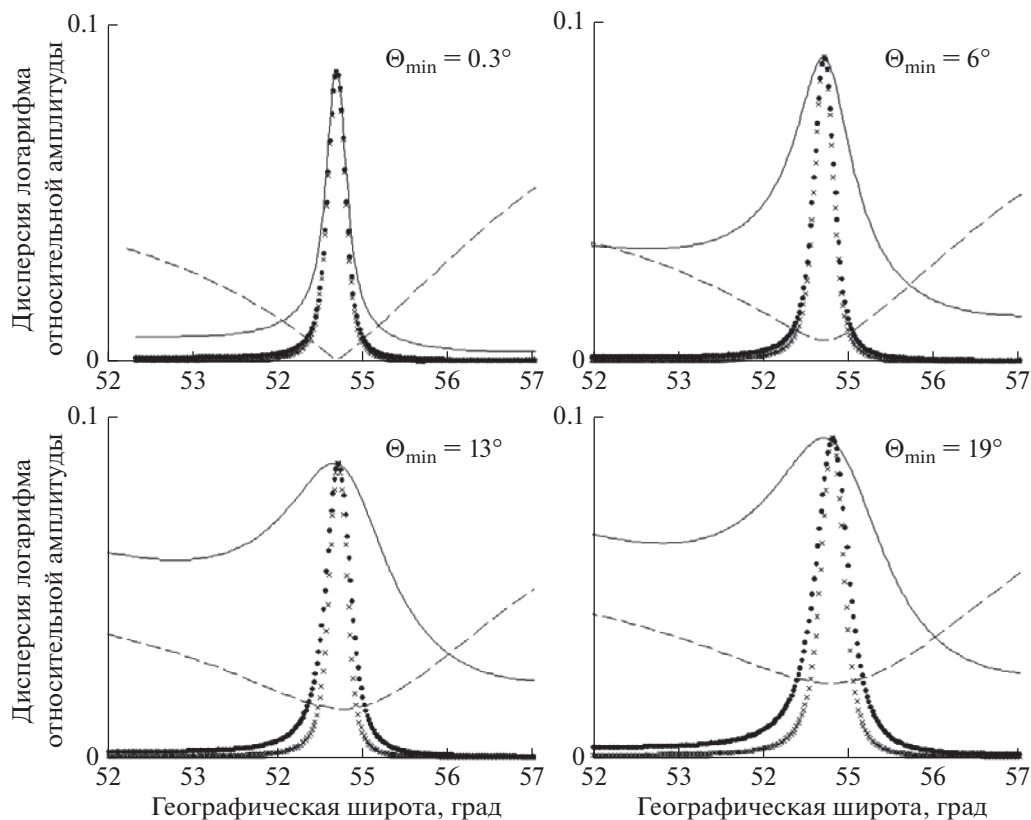
Важно отметить, что интервал  $75^\circ$ – $90^\circ$  выбран с тем расчетом, чтобы величина минимального угла между лучом зрения “приемник–спутник” и магнитным полем не превышала  $18^\circ$ – $20^\circ$ . Превышение означает, что траектория ИСЗ находится далеко от приемника, из-за чего луч зрения “приемник–спутник” проходит большой путь в ионо-

сфере, что может нарушить условие постоянства дисперсии флуктуаций электронной плотности  $\sigma^2$  вдоль луча зрения, заложенное при выводе соотношения (1).

Возвращаясь к соотношению (2), покажем, что ширина максимума зависит от величины вытянутости неоднородностей вдоль  $\alpha$  и перпендикулярно  $\beta$  к магнитному полю, а пространственное положение – от значения ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$ . На рис. 4 приведены сравнительные широтные профили дисперсии логарифма относительной амплитуды  $\sigma_\chi^2$  для модели поперечно-изотропных ( $\beta = 1$ ) и поперечно-анизотропных ( $\beta > 1$ ) неоднородностей при различной удаленности траектории ИСЗ относительно наблюдателя, как можно понять по вели-

чине  $\Theta_{\min}$ . При вычислении  $\sigma_\chi^2$  были использованы реальные траектории ИСЗ. Простейшей моделью пространственного распределения мелкомасштабных неоднородностей в слабо возмущенной ионосфере является протяженный статистически однородный слой с  $\sigma^2 = \text{const}$ . В расчетах предполагалось, что толщина слоя равна 100 км, высота максимума слоя равна 300 км и показатель спектра  $p = 3.7$  (применительно к экспериментальным данным радиопросвечивания, полученными над московским регионом, эти величины варьировались; при этом важно заметить, что эта вклад этих вариаций в форму и расположение максимума незначителен). При различной удаленности траектории ИСЗ относительно наблюдателя графики функции  $\sigma_\chi^2$  построены для  $\beta = 1$  (сплошная линия),  $\beta = 5$  (точки),  $\beta = 10$  (крестики) при фиксированных значениях  $\alpha = 30$  и  $\Psi_A = 80^\circ$ . Выбор величин  $\alpha$  и  $\Psi_A$  не случаен: величина  $\alpha = 30$  часто используется при аппроксимации экспериментальных кривых дисперсии, а угол  $\Psi_A = 80^\circ$  выбран с целью поместить максимум на широту локального магнитного зенита, для большей наглядности изменения максимума при вариации параметров анизотропии. Как видно из рисунков, при любом удалении траектории ИСЗ относительно наблюдателя и при любых величинах  $\beta$  изменяется только ширина максимума, не влияя на его пространственное положение. Исключение составляют траектории, для которых  $\Theta_{\min} < 2^\circ$ . Этот критерий определен опытным путем в высокоширотных экспериментах [Tereshchenko et al., 2004] и его справедливость наблюдается применительно к данным, полученным над московским регионом. На рисунке 4 видно, что при  $\Theta_{\min} = 0.3^\circ$  фланговые части графика функции  $\sigma_\chi^2$  практически не меняются при изменении  $\beta$  от 1 до 10.

Поскольку  $\alpha$  и  $\beta$  входят в соотношение (2) мультипликативным образом, изменение вели-



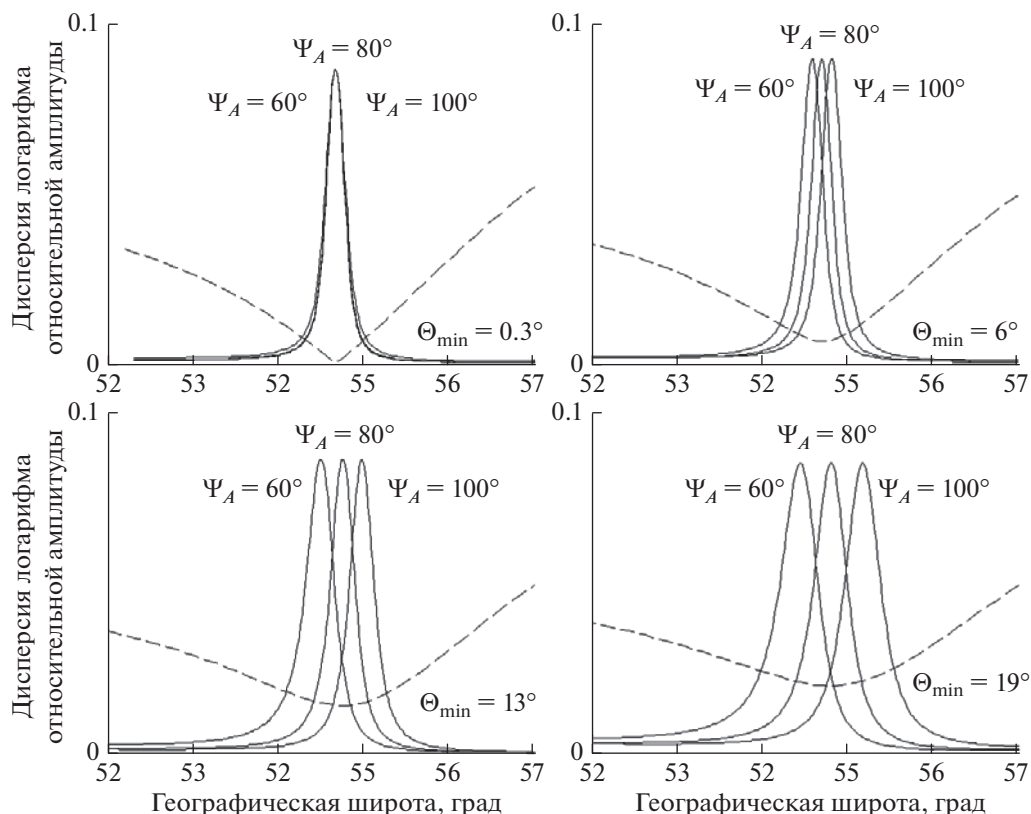
**Рис. 4.** Сравнительные широтные профили дисперсии логарифма относительной амплитуды  $\delta_{\chi}^2$  для моделей поперечно-изотропных ( $\beta = 1$ , сплошная линия) и поперечно-анизотропных неоднородностей ( $\beta = 5$ , точки;  $\beta = 10$ , крестики) при различной удаленности траектории спутника от наблюдателя. Штриховой линией обозначен график углов  $\Theta$  между лучом зрения на спутник и геомагнитным полем, образуемый при перемещении ИСЗ, с указанием минимального значения  $\Theta_{\min}$ .

чины  $\alpha$  при фиксированном  $\beta$  приводит к аналогичным изменениям графика функции  $\delta_{\chi}^2$ .

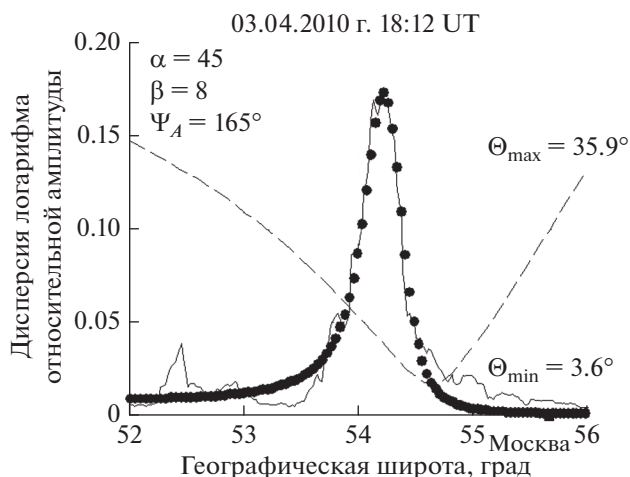
На рисунке 5 приведены сравнительные широтные профили дисперсии логарифма относительной амплитуды  $\delta_{\chi}^2$  при фиксированных величинах  $\alpha = 30$  и  $\beta = 5$ , но при различных величинах ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  для тех же траекторий ИСЗ. Как показал анализ данных над московским регионом, изменение  $\Psi_A$  существенно влияет на положение максимума при различной удаленности траектории ИСЗ относительно наблюдателя за исключением траекторий, для которых  $\Theta_{\min} < 2^\circ$ . С этой точки зрения, все пролеты ИСЗ могут быть классифицированы как зенитные и не зенитные в зависимости от величины  $\Theta_{\min}$ . При  $\Theta_{\min} < 2^\circ$  (зенитные пролеты) модель неоднородности практически не чувствительна к поперечной анизотропии. В этом случае точность определения величины  $\Psi_A$  может составлять несколько десятков градусов. При  $\Theta_{\min} > 2^\circ$  параметры анизотропии  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\Psi_A$  могут быть определены с большей точностью. В частности, величи-

на  $\Psi_A$  может быть определена с точностью в несколько градусов.

На рисунке 6 приведен пример аппроксимации для исследуемого случая 3 апреля 2010 г. в 18:12 UT. График построен для проекции траектории ИСЗ на высоту  $H = 270$  км. Теоретическая кривая нормирована на высоту экспериментального максимума. Параметры анизотропии  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  приведены в левом верхнем углу рисунка. Численные значения параметров определяются путем перебора их различных величин для минимизации различий между экспериментальной и теоретической кривыми. Параметры  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  считаются постоянными в широтно-долготной области, занимаемой максимумом. В данном примере это область с центром  $54.2^\circ$  N (в дальнейшем называемая “область наблюдения неоднородностей”). Соотношение осей  $\beta : \alpha$ , которое составляет  $\sim 1 : 6$ , означает, что неоднородности более вытянуты вдоль магнитного поля, чем поперек, в 6 раз. Расчеты в географической системе координат, имеющей постоянные направления осей для любой точки проекции траектории ИСЗ, позволяют наглядно представить ориентацию по-



**Рис. 5.** Сравнительные широтные профили дисперсии логарифма относительной амплитуды  $\sigma_{\chi}^2$  при фиксированных величинах  $\alpha = 30$  и  $\beta = 5$ , но при различных величинах ориентации поперечной анизотропии  $\Psi_A$  для тех же траекторий ИСЗ, что на рис. 4.



**Рис. 6.** Экспериментальный максимум в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды (сплошная кривая) и его аппроксимация теоретической кривой (кружки). Параметры наилучшей аппроксимации  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  приведены в левом верхнем углу рисунка. Штриховой линией показан график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения с указанием минимального ( $\Theta_{\min}$ ) и максимального ( $\Theta_{\max}$ ) значений.

перечной анизотропии неоднородностей. Например, угол  $\Psi_A = 0^\circ$  или  $\Psi_A = 180^\circ$  соответствует направлению “север–юг”, а угол  $\Psi_A = 90^\circ \equiv 270^\circ$  – направлению “запад–восток”. В примере на рис. 6 ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$  близка к направлению “север–юг”. Заметим: поскольку  $\beta$  – ось, то, при необходимости, к текущему значению  $\Psi_A$  можно прибавить  $180^\circ$ , положение теоретического максимума не изменится.

В заключение: при отборе данных радиопросвечивания мы придерживались правила, согласно которому максимальный угол места ИСЗ должен составлять  $75^\circ$ – $90^\circ$ . Общее количество сеансов радиопросвечивания, записи которых содержат квадратуры (т.е. радиосеансы, записи которых содержат только аппаратный шум или продолжительные потери радиосигнала, в “общее количество” не входят) в 2010 г. составило 669; из них только в 197 сеансах в квадратурных компонентах радиосигнала наблюдались амплитудные флуктуации (преимущественно, в ночное время суток). Это в  $\sim 3.5$  раза меньше общего количества. Количество радиосеансов, когда можно определить параметры анизотропии неоднородностей, составило 54. В разделе 4 для нескольких случаев



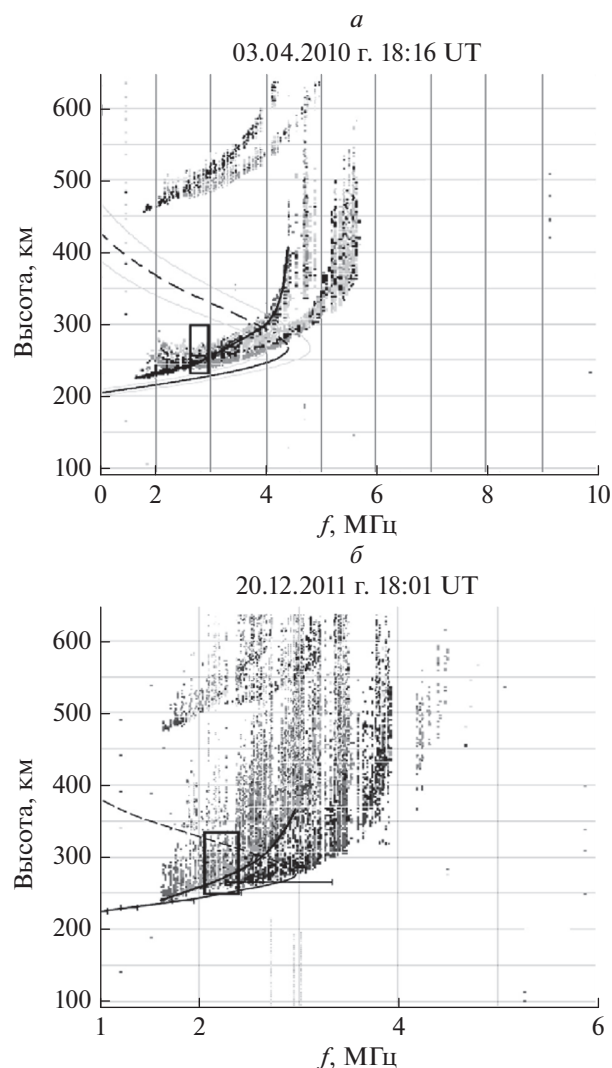
(с обоснованием их отбора) из 54 случаев мы сопоставим значения ориентации поперечной анизотропии с направлением дрейфа среднемасштабных неоднородностей, метод определения которого описан в разделе 3.

### 3. ОЦЕНКА СКОРОСТИ ДРЕЙФА СРЕДНЕМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ ПО ДАННЫМ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ ИЗМЕРЕНИЙ ИОНОЗОНДА *DPS-4*

Кратко опишем метод определения скорости и направления дрейфа среднемасштабных неоднородностей по данным всей карты неба, как это реализовано в алгоритме работы *DPS-4*. Основным режимом работы ионозонда *DPS-4* является снятие ионограмм и автоматический расчет профиля электронной концентрации. На рисунке 7а, б представлены ионограммы *DPS-4* для двух рассматриваемых далее сеансов измерений. Программой *ARTIST-5* по обыкновенной ветви ионограммы автоматически проведен трек (толстая линия на левой ветви каждой ионограммы), который используется этой же программой для расчета профиля электронной концентрации (тонкие сплошные линии, переходящие в штриховые выше максимума слоя). Таким образом, для каждой из излучаемых ионозондом *DPS-4* частот зондирования можно определить истинную высоту отражения.

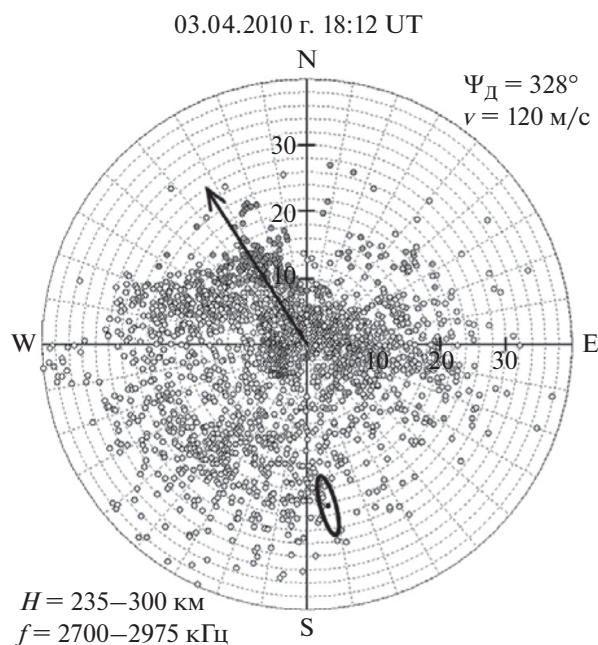
Сразу же после снятия ионограммы ионозонд *DPS-4* начинает работать как классический радиолокатор с доплеровской фильтрацией сигналов и определением углов прихода отраженных от ионосферы радиосигналов. В этом режиме *DPS-4* циклически перебирает несколько (обычно 4) фиксированных зондирующих частот. Вся процедура повторяется 8 раз. Это делается с целью повысить статистическую достоверность оценок углового спектра и скорости перемещения неоднородностей, так как аппаратная точность единичного измерения угла прихода (в идеальных условиях) оценивается производителем  $\sim 1^\circ$  или более.

Для простоты интерпретации в этом режиме излучаются и принимаются только волны обыкновенной поляризации (левые ветви на ионограммах на рис. 7). Амплитуды и фазы на каждой из четырех приемных антенн, полученные в процессе измерения, сохраняются в файлах специального формата *DFT*. В результате обработки этих данных определяются углы прихода каждой из парциальных радиоволн с разбивкой ячеек по дальности (обычно, через каждые 5 км) и доплеровскому сдвигу (обычно, через каждые 0.05 Гц) и строятся так называемые *карты неба* (или *Sky-Maps* в англоязычной литературе), условно отображающие распределение мощности отраженных



**Рис. 7.** Ионограммы с признаками  $F$ -рассеяния: (а) умеренного, (б) сильного. Толстая линия – трек идеализированной ионограммы. Тонкая сплошная линия, переходящая выше в штриховую линию – профиль электронной концентрации. Прямоугольниками показаны области частот–высот, где были определены направление и скорость дрейфа неоднородностей.

от неоднородной ионосферы радиоволн по углам прихода. На рисунке 8 представлена карта неба, рассчитанная с использованием файла *DFT*, записанного сразу после снятия ионограммы, приведенной на рис. 7а. На рисунке 8 для простоты восприятия убраны служебные колонки параметров программы. Карты неба в *DPS-4* обычно отображаются в пределах  $40^\circ$  от зенита (внешняя окружность на рис. 8). Как следует из рис. 8, отраженные от ионосферы сигналы приходят из конуса углов вокруг зенита. Такое распределение мощности по углам прихода типично при наличии умеренного и сильного  $F$ -рассеяния.



**Рис. 8.** Карта неба (с обозначениями сторон света) при ионосферном рассеянии во всей области принимаемых к расчету отражений (серые точки). Стрелка в центре рисунка — результирующее направление дрейфа, параметры которого приведены в правом верхнем углу. На ионограмме на рис. 7а этой карте соответствует область, показанная прямоугольником. Эллипс — схематичное изображение ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в области, ограниченной максимумом, приведенном на рис. 6. Точка в центре эллипса — положение вершины максимума.

Измерив углы прихода и соответствующие доплеровские сдвиги для каждой точки на карте неба, можно определить усредненные характеристики движения неоднородностей. Выберем, например, какую-либо совокупность точек на карте неба числом не менее трех. Предположим далее, что они порождены движением какой-то группы неоднородностей и эта группа неоднородностей (отражателей в классической радиолокации) движется как единое целое с одним и тем же вектором скорости. Тогда можно записать соответствующую систему уравнений и найти все три компоненты этого вектора [Reinisch et al., 2009; Galushko et al., 2008].

Доплеровские сдвиги частоты определяют лучевую скорость движения  $v = f_d \lambda / 2$ , которая связана с компонентами вектора скорости ( $V_x, V_y, V_z$ ) следующим соотношением:

$$v = V_x \sin \theta \cos \psi + V_y \sin \theta \sin \psi + V_z \cos \theta, \quad (3)$$

где  $\theta$  и  $\psi$  — соответственно, полярный и азимутальный углы прихода отраженного сигнала. При наличии трех отражений, компоненты ( $V_x, V_y, V_z$ ) вычисляются решением линейной системы.

Перебрав различные тройки точек, можно получить массив векторов скоростей и оценить среднее значение и дисперсию скоростей. Процедуру усреднения можно провести с учетом весовых коэффициентов, отображающих относительную мощность различных парциальных волн. Такой алгоритм реализован в прилагаемом к DPS-4 комплекте математического обеспечения ионозонда, позволяющем автоматически получать карты неба сразу после снятия стандартной ионограммы и, соответственно, 4 раза в час (или чаще) оценивать все 3 компоненты вектора усредненной скорости неоднородностей. Точность измерения скоростей зависит от интенсивности рассеяния. В дневные часы число неоднородностей, которые формируют отраженный от ионосферы сигнал, относительно мало. Соответственно, невелико и число точек на карте неба, а занимаемый ими конус вокруг зенита узок. В таких условиях точность измерения скоростей часто оказывается неудовлетворительной. В ночных условиях, когда на карте неба отображаются сотни или тысячи точек (т.е. имеется большое число единичных успешных измерений углов прихода рассеянных радиоволн), точность измерения скоростей выше, а оценка дисперсии скоростей, определяющая точность измерений, достаточно корректна. Удовлетворительными считаются измерения, когда средние значения скоростей в 3–5 раз превышают среднеквадратичные отклонения.

На рисунке 8 направление дрейфа, усредненное по всем отражателям карты неба, показано стрелкой. Значение скорости дрейфа  $v$  и его направление  $\Psi_d$  относительно географического севера приведены в правом верхнем углу рисунка. Эти параметры рассчитаны для действующих высот  $H$  на частотах  $f$ , значения которых приведены в левом нижнем углу рисунка. Положение области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей условно показано эллипсом, большая ось которого соответствует ориентации поперечной анизотропии.

К сожалению, поставляемое с DPS-4 программное обеспечение (*Drift Explorer*) позволяет определять только направление дрейфа, усредненное по всей карте неба, как это показано на рис. 8. Если в исследуемой области ионосферы имеется несколько групп неоднородностей, движущихся в разных направлениях, то усредненные по всей карте неба данные не будут соответствовать реальной ситуации. Для устранения этого недостатка Г.А. Жбанковым была разработана новая программа расчета скорости и направления дрейфа *Local Drift*, преимущество которой состоит в возможности выделять на карте неба интересующую область путем задания нужных углов прихода радиоволн и рассчитывать скорость и направление дрейфа максимально близко к области наблюдения мелкомасштабных неоднородно-

стей, пространственное положение которой различно в разных радиосеансах, согласно данным радиопросвечивания. Тестирование программы *LocalDrift* показало, что направление и скорость дрейфа, рассчитанные ею с использованием данных всей карты неба, совпадают с результатами программы *DriftExplorer*.

#### 4. СОПОСТАВЛЕНИЕ ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ И НАПРАВЛЕНИЯ ДРЕЙФА

Поскольку программа *LocalDrift* – наш пилотный проект, и настоящая работа – это апробация ее результатов на экспериментальных данных, полученных другим методом, авторы внимательно рассмотрели каждый конкретный случай.

Согласно данным радиопросвечивания, случаев, когда в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды наблюдается максимум, в несколько раз превышающий фоновый уровень, и определение ориентации поперечной анизотропии возможно, не так много относительно общего количества наблюдений. В конце раздела 2 было отмечено, что определить параметры анизотропии неоднородностей можно в 54 случаях. Это количество включает в себя 29 случаев, когда экспериментальная кривая дисперсии уровня амплитуды имеет единственный максимум, и 25 случаев, когда кривая имеет два (реже – три) максимума. Для сопоставления с направлением дрейфа мы отобрали 22 случая, когда кривая дисперсии имеет единственный максимум, расположенный вблизи локального магнитного зенита. Количество случаев, когда единичный максимум находился на большом удалении от магнитного зенита, составляет 7. В подобных случаях нет уверенности, что параметры анизотропии неоднородностей можно определить достоверно, поскольку луч зрения “приемник–спутник” также проходит большой путь в ионосфере, что может нарушить условие постоянства дисперсии флуктуаций электронной плотности  $\sigma^2$  вдоль луча зрения, заложенное при выводе соотношения (1). Такие случаи были отброшены.

Согласно данным радиолокации, из отобранных 22 случаев были отбракованы 2 случая, поскольку на ионограммах наблюдался сильный спорадический слой *Es*. Эти случаи требуют отдельного рассмотрения. Еще 2 случая были отбракованы, так как в локальной области на карте неба, где наблюдались мелкомасштабные неоднородности, полностью отсутствовали точки отражения, (скорее всего в этих 2 случаях в *DPS-4* использовались частоты, отражающиеся ниже нужной области), что не позволяет определить направление дрейфа программой *LocalDrift*. Таким образом, для сопоставления эксперимен-

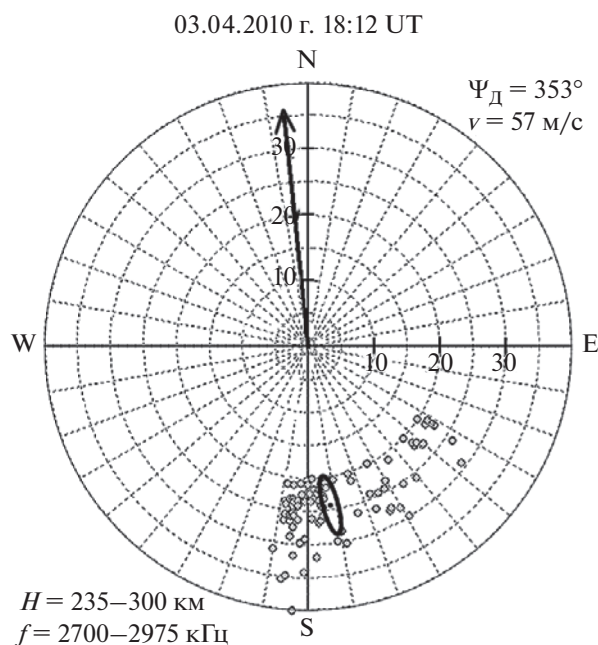
тальных данных, полученных обоими методами, было отобрано 18 случаев.

Подробно рассматриваемый случай сопоставления экспериментальных данных 3 апреля 2010 г. (рис. 8) – один из 18 случаев. Направление дрейфа  $\Psi_D = 328^\circ$  рассчитано для действующих высот  $h = [235–300]$  км (т.е. для истинных высот  $h = [215–280]$  км, согласно ионограмме на рис. 7а). Ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A = 165^\circ \equiv 345^\circ$  рассчитана для среднего значения данного интервала. Расчеты для граничных значений интервала высот показали, что величина  $\Psi_A$  изменяется в пределах точности ее определения, т.е.  $\pm 1^\circ$ . Поскольку экспериментальные данные  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  получены одновременно и количество среднemasштабных неоднородностей достаточно для расчета направления дрейфа  $\Psi_D$  с удовлетворительной точностью, величины  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  были численно сопоставлены. Различие между ними относительно невелико и составляет  $\Delta\Psi = 17^\circ$ , что можно назвать сходством между направлением дрейфа среднemasштабных неоднородностей и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей.

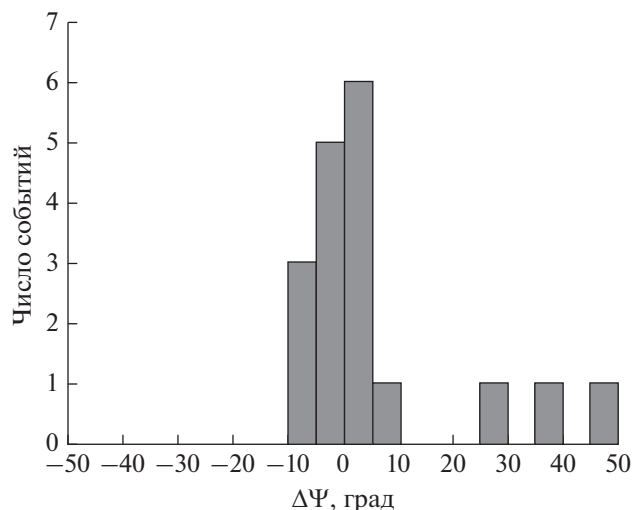
Однако, сопоставление величин  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  было сделано без учета пространственного положения области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей. На рисунке 8 видно, что эта область расположена к югу от зенита, где количество ионосферных отражателей меньше. Предполагая, что направление дрейфа в разных локальных областях карты неба может как различаться, так и быть постоянным, представляет интерес рассчитывать параметры дрейфа для локальной области на карте неба, где наблюдаются мелкомасштабные неоднородности, применяя разработанную для этого программу *LocalDrift*.

На рисунке 9 показано взаимное расположение области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и локальной области с ионосферными отражателями. Область с ионосферными отражателями выбрана таким образом, чтобы количество измерений было одинаковым в направлении “север–юг” и одинаковым в направлении “запад–восток” относительно расположения центра эллипса. В этом случае направление дрейфа (рассчитанное с использованием программы *LocalDrift*) составляет  $\Psi_D = 353^\circ$ , что немногим превышает полученное ранее значение  $\Psi_D = 328^\circ$ . При этом различие между  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  сократилось с  $\Delta\Psi = 17^\circ$  до  $\Delta\Psi = -8^\circ$ . Отметим также, что скорость дрейфа, рассчитанная по отражателям в локальной области (57 м/с, см. рис. 9) приблизительно в два раза меньше, чем скорость дрейфа, рассчитанная по всей карте неба (120 м/с, см. рис. 8).

На рисунке 10 приведен результат сопоставления экспериментальных данных  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  для всех



**Рис. 9.** Взаимное расположение на карте неба области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и локальной области с ионосферными отражателями. Условные обозначения те же, что на рис. 8.



**Рис. 10.** Гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  и направлением дрейфа  $\Psi_D$  для 18 случаев сопоставления этих экспериментальных данных.

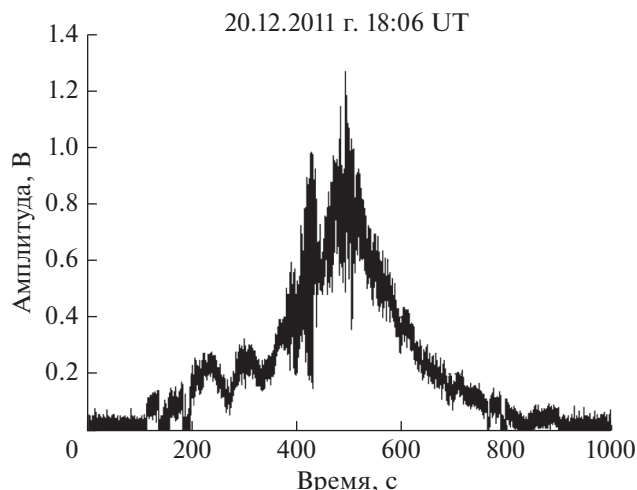
18 случаев. Результат представлен в виде гистограммы различий  $\Delta\Psi$  между ориентацией поперечной анизотропии  $\Psi_A$  и направлением дрейфа  $\Psi_D$  в каждом случае. Результат получен с использованием программы *LocalDrift* для определения направления дрейфа  $\Psi_D$  в локальной области ионосферы, близкой к области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей, простран-

ственное положение которой могло быть различным в различных радиосеансах. Значения  $\Delta\Psi$  сгруппированы по интервалам с шагом  $5^\circ$ . Ось абсцисс – величина  $\Delta\Psi$ , ось ординат – количество случаев, значения  $\Delta\Psi$  которых находятся в данном интервале. Положительные значения гистограммы показывают, что величина  $\Psi_A$  больше величины  $\Psi_D$ , отрицательные значения показывают обратное. Как видно из рис. 10, в 15 из 18 случаев, значения  $\Delta\Psi$  находятся в достаточно узком интервале  $[-10^\circ \dots +10^\circ]$ . Это позволяет сделать вывод, что мелкомасштабные неоднородности в перпендикулярной к магнитному полю плоскости вытянуты преимущественно вдоль направления дрейфа среднемасштабных неоднородностей.

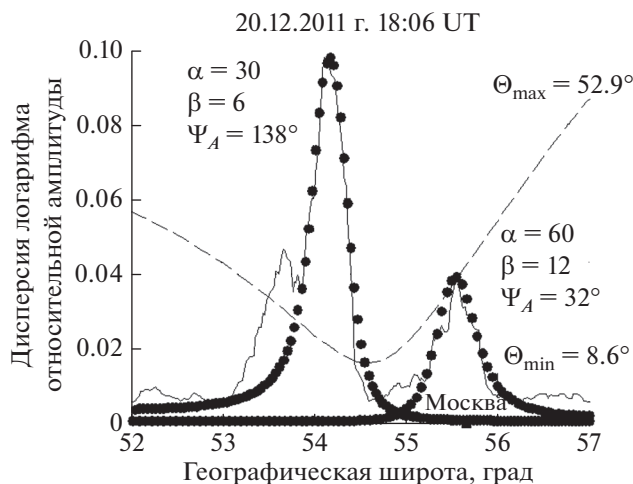
Случай 3 апреля 2010 г. является примером наблюдения единственного максимума в графике дисперсии. С этой точки зрения данный случай можно отнести к простым. Протестировав новый подход к расчету дрейфа, мы полагаем, что он подходит для детального исследования сложных случаев, когда в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды наблюдаются два максимума. Согласно данным радиопросвечивания ионосферы над московским регионом, такие случаи встречаются почти столь же часто, как и рассмотренный выше случай. В качестве примера рассмотрим случай 20 декабря 2011 г., интересный тем, что в одном радиосеансе параметры анизотропии можно определить не в одной, а в двух локальных областях ионосферы, расстояние между которыми по широте составляет  $\sim 1^\circ$ .

Заметим, что аналогичная возможность в одном радиосеансе определить параметры анизотропии в пространственно разнесенных вдоль траектории спутника локальных областях ионосферы, была при исследовании мелкомасштабных неоднородностей в полярной шапке [Tereshchenko et al., 2008]. В графике дисперсии логарифма относительной амплитуды радиосигнала, принятого в п. Баренцбург (арх. Шпицберген), наблюдались два (иногда три) изолированных максимума, часто равноценных по величине, поэтому каждый максимум был аппроксимирован индивидуальной теоретической кривой. Ориентация поперечной анизотропии была определена для каждого максимума и значения эти оказались различными, но при этом соответствующими направлению дрейфа по данным *SuperDARN*. Был сделан вывод, что наличие двух и более максимумов служит показателем непостоянства направления дрейфа вдоль траектории ИСЗ.

Предполагая непостоянство направления дрейфа в  $F$ -области ионосферы над московским регионом как возможную аналогичную причину различия между  $\Psi_{A1}$  и  $\Psi_{A2}$ , мы исследовали интересный с этой точки зрения случай 20 декабря 2011 г.,



**Рис. 11.** Амплитуда радиосигнала, принятого 20 декабря 2010 г. в течение 18 мин нахождения спутника в зоне радиовидимости. Увеличение интенсивности флуктуации амплитуды происходит на ~400 с и более сильное на ~430 и ~490 с (в 18:06 UT). Условные обозначения те же, что на рис. 2.



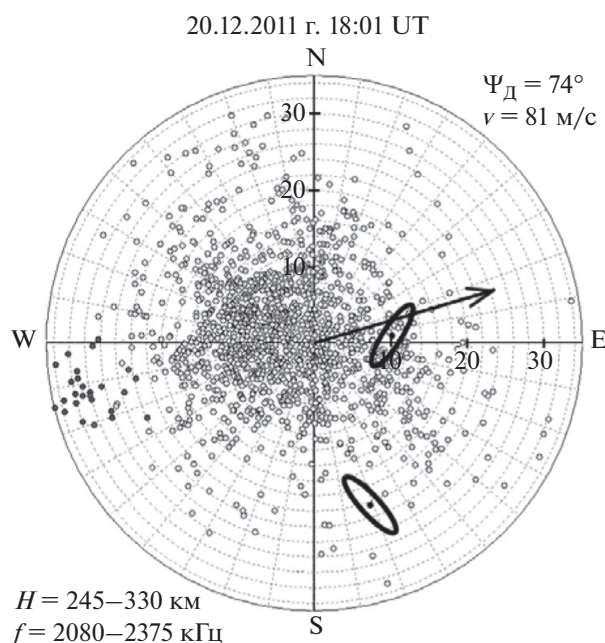
**Рис. 12.** Экспериментальные максимумы в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды и их аппроксимация индивидуальными теоретическими кривыми. Параметры наилучшей аппроксимации  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$  приведены при вершинах каждого максимума. Условные обозначения те же, что на рис. 6.

когда в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды наблюдались два максимума.

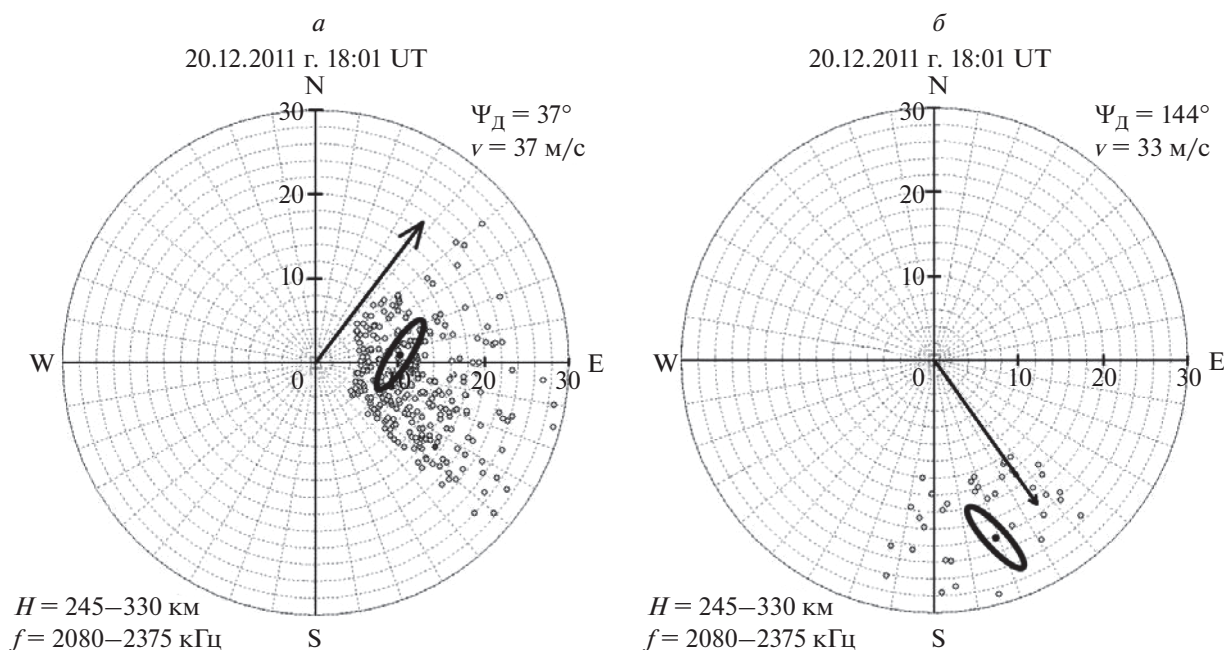
Соблюдая последовательность в представлении данных, рассмотрение начнем с графика амплитуды радиосигнала ИСЗ (рис. 11). В отличие от графика амплитуды на рис. 2, в графике амплитуды на рис. 11 наблюдаются три максимума мерцаний: на ~400 с, на ~430 с и на ~490 с (18:06 UT – время для двух последних максимумов мерцаний). В графике дисперсии логарифма относительной амплитуды (рис. 12), построенном по данным рис. 11, присутствуют два изолированных максимума, которые можно аппроксимировать теоретическими кривыми. Для третьего максимума (на ~400 с, который соответствует 53.7° N) нельзя подобрать теоретическую кривую, поскольку он не является изолированным. Поэтому параметры анизотропии неоднородностей  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\Psi_A$ , с которыми достигается наилучшая аппроксимация, определены только для двух областей, занимаемых максимумами с широтами 54.1° N и 55.5° N при вершинах. Параметры анизотропии приведены при вершине каждого максимума. Ориентация поперечной анизотропии определена для каждой локальной области, занимаемой максимумом, и имеет величины  $\Psi_{A1} = 138^\circ (\pm 1)$  и  $\Psi_{A2} = 32^\circ (\pm 1)$ . Эти значения были сопоставлены с направлением дрейфа  $\Psi_D$  (рис. 13), рассчитанного программой *DriftExplorer*. Несмотря на то, что данные дрейфа получены в 18:01 UT, т.е. с разницей 5 мин относительно данных радиопросвещения, направление дрейфа  $\Psi_D = 74^\circ$  отличается на несколько десятков градусов от каждого из значений ориентации поперечной анизотропии

$\Psi_{A1}$  и  $\Psi_{A2}$ . В этом случае нельзя говорить о связи между сопоставляемыми данными.

Использование при расчете направления дрейфа программы *LocalDrift*, в которой учитыва-



**Рис. 13.** Карта неба при ионосферном рассеянии для всей области принимаемых к расчету отражений и результирующее направление дрейфа (стрелка из центра). Мелкомасштабные неоднородности наблюдаются в двух локальных областях. Условные обозначения те же, что на рис. 8.



**Рис. 14.** Взаимное расположение на картах неба областей наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и локальных областей с ионосферными отражателями. Условные обозначения те же, что на рис. 8.

ется пространственное положение интересующей локальной области (рис. 14а, 14б), показало, что направление дрейфа было различным в различных участках карты неба. Сопоставление ориентации поперечной анизотропии с направлением дрейфа, рассчитанного в ближайших локальных областях, показало, что для области с центром  $55.6^\circ$  N (широта вершины максимума) различие между  $\Psi_A = 32^\circ$  и  $\Psi_D = 37^\circ$  (рис. 14а) составляет  $\Delta\Psi = -5^\circ$ . Для области с центром  $54.2^\circ$  N различие между  $\Psi_A = 138^\circ$  и  $\Psi_D = 144^\circ$  (рис. 14б) составляет  $\Delta\Psi = -6^\circ$ . Таким образом, выделяя в карте неба интересующую область, можно более корректно сопоставлять экспериментальные данные.

## 5. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Двумя независимыми методами, используя два многолетних архива данных, исследованы неоднородности электронной плотности в  $F$ -области ионосферы над московским регионом. Анализ архивов за 2010 г. выявил 18 случаев, когда экспериментальные данные обоих методов были получены одновременно, с соблюдением критерия применимости и хорошим техническим качеством. Сделано сопоставление между направлением дрейфа среднемасштабных неоднородностей и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей для каждого из 18 случаев.

Обработка данных радиопросвечивания показала, что неоднородности ионосферы структури-

рованы сложным образом: в различные дни и время суток в продолжение одного радиосеанса вдоль траектории ИСЗ обнаруживались как одна, так и две (реже три) локальные области, содержащие неоднородности. Внутри каждой локальной области пространственные параметры неоднородностей (продольная  $\alpha$  и поперечная  $\beta$  анизотропия, а также ориентация поперечной анизотропии  $\Psi_A$ ) постоянны, но в разных локальных областях эти параметры могут существенно отличаться.

Возникла задача определить параметры дрейфа среднемасштабных неоднородностей в локальных областях ионосферы. Решением задачи стала разработка новой программы *LocalDrift* (автор Г.А. Жбанков). Преимущество новой программы *LocalDrift* перед стандартной *DriftExplorer* состоит в возможности выделять на карте неба интересующую локальную область путем задания определенного диапазона углов прихода радиоволн. Контрольные тесты показали, что при использовании данных всей карты неба программа *LocalDrift* дает те же результаты, что и программа *DriftExplorer*.

*LocalDrift* позволяет с лучшим пространственным разрешением делать оценку скорости и направления дрейфа. В частности, при обнаружении вдоль траектории ИСЗ двух локальных областей с мелкомасштабными неоднородностями программа *LocalDrift* позволяет определять направление дрейфа  $\Psi_D$  в каждой области, что делает сопоставление величин  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  более физиче-

ски корректным. Рассмотренный в данной работе случай наблюдения вдоль траектории ИСЗ двух локальных областей с параметрами неоднородностей  $\Psi_{A1} \neq \Psi_{A2}$ , показал, что  $\Psi_{A1} \approx \Psi_{D1}$  и  $\Psi_{A2} \approx \Psi_{D2}$ .

В результате применения программы *LocalDrift* получен следующий результат: численное сопоставление ориентации поперечной анизотропии с направлением горизонтального дрейфа среднemasштабных неоднородностей, определенного в той же локальной области, показало, что в большинстве случаев (15 из 18) различие между этими величинами находится в пределах  $\pm 10^\circ$ . Это означает, что в F-области ионосферы на широте московского региона существует взаимосвязь между дрейфом среднemasштабных неоднородностей и ориентацией поперечной анизотропии мелко-масштабных неоднородностей.

Три из 18 случаев, когда различие между  $\Psi_A$  и  $\Psi_D$  превышает  $25^\circ$ , требуют дальнейшего исследования, которое планируется на большем экспериментальном материале.

## 6. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают благодарность инженерам лаборатории радиопросвечивания Полярного геофизического института за проведение экспериментальных работ и Р.Ю. Юрику за подготовку рис. 1. Авторы также выражают благодарность А.М. Падохину и Н.А. Дятко за интерес к работе и полезные обсуждения.

## ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания в сфере научной деятельности № 0227-2019-0001, № 0852-2020-0015 и № 01201356396, а также гранта Российского фонда фундаментальных исследований № 19-52-25001\_Кипр\_a.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. О фрактальных свойствах мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 50. № 4. С. 300–308. 2007.
- Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. О фрактальной структуре мелкомасштабных перемещающихся ионосферных возмущений // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 51. № 1. С. 22–30. 2008.
- Алимов В.А., Выборнов Ф.И., Рахлин А.В. О мультистепенном спектре мелкомасштабной ионосферной турбулентности // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 52. № 1. С. 14–22. 2009.
- Афраймович Э.Л., Вугмейстер Б.О., Захаров В.Н., Кахламан А.Д., Королев В.А. Исследование перемещающихся ионосферных возмущений методами когерент-

- ного приема // Исслед. по геомагнетизму, аэрoномии и физике Солнца. Вып. 41. М.: Наука, С. 149–159. 1977.
- Афраймович Э.Л. Интерференционные методы радиозондирования ионосферы // М.: Наука, 197 с. 1982.
- Боголюбов А.А., Ерухимов Л.М., Мясников Е.Н. и др. Измерение параметров дифракционной картины при просвечивании авроральной ионосферы сигналами ИСЗ // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 24. № 1. С. 147–149. 1984а.
- Боголюбов А.А., Ерухимов Л.М., Кряжев В.А., Мясников Е.Н. Об измерениях анизотропии неоднородностей авроральной ионосферы с помощью сигналов ИСЗ // Изв. вузов. Радиофизика. Т. 27. № 12. С. 1497–1504. 1984б.
- Голян С.Ф., Ким В.Ю., Лобачевский Л.А., Панченко В.А., Полиматиди В.П., Петров М.С., Шлюгер И.С. Экспериментальное исследование искусственных крупномасштабных неоднородностей в F-слое ионосферы при воздействии мощных радиоволн на гирочастоте электронов // М.: Препр. АН СССР. ИЗМИР, № 45(456). 24 с. 1983.
- Гусев В.Д. Влияние неоднородностей ионосферы на распространение радиоволн. Автореф. дисс. д-ра физ.-мат. наук // М.: Изд-во МГУ им. М.В. Ломоносова, 41 с. 1976.
- Гусев В.Д., Гайлит Т.А., Иванов М.И. Дифференциально-фазовый метод исследования анизотропии неоднородностей ионосферы / Исслед. по геомагнетизму, аэрoномии и физике Солнца. М.: Наука, Вып. 51. С. 80–86. 1980.
- Гусев В.Д., Овчинникова Н.П. Модельное определение объемных характеристик неоднородностей ионосферы // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 20. № 4. С. 626–631. 1980.
- Гусев В.Д., Раджабов Т.С. Дисперсия флуктуации фазы радиосигнала при нормальном зондировании ионосферы // Геомагнетизм и аэрoномия. Т. 23. № 5. С. 856–857. 1983.
- Ларюнин О.А., Агеева Е.Т., Афанасьев Н.Т. Диагностика случайных неоднородностей электронной плотности при вертикальном зондировании ионосферы // Вестн. ИрГТУ. № 1. С. 92–98. 2008.
- Козлова М.О. Исследование неоднородностей километрового масштаба в F-области высокоширотной ионосферы по данным о мерцаниях спутниковых радиосигналов. Автореф. дисс. канд. физ.-мат. наук // Мурманск: изд-во ПГИ КНЦ РАН, 30 с. 2002.
- Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы // М.: Физматлит, 336 с. 2007.
- Панченко В.А. Экспериментальные исследования искусственного возмущения ионосферы доплеровским методом. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М., 15 с. 1993.
- Полиматиди В.П. Исследование методов разделения многомодовых волновых полей радиоволн, отраженных от ионосферы. Автореф. дис. канд. физ.-мат. наук. М., 19 с. 1984.
- Романова Н.Ю. Определение параметров анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Proc. 38<sup>th</sup> Annual Seminar “Physics of Auroral Phenomena”. Apatity, 2–6 March 2015. P. 157–160. 2015.

- Романова Н.Ю. Взаимосвязь между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 57. № 4. С. 463–471. 2017. <https://doi.org/10.7868/S0016794017040150>
- Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля // М.: Наука, 464 с. 1978.
- Терещенко Е.Д., Черняков С.М. Влияние расстояния между приемными антеннами на измеряемые параметры ионосферных неоднородностей / Исследование высокоширотной ионосферы. Апатиты: Изд-во Кольского филиала АН СССР, С. 73–78. 1986.
- Терещенко Е.Д., Романова Н.Ю., Кустов А.В. Сопоставление поперечной к магнитному полю анизотропии мелкомасштабных неоднородностей с конвекцией по данным радаров SuperDARN // Геомагнетизм и аэрномия. Т. 44. № 4. С. 487–492. 2004.
- Терещенко Е.Д., Юрик Р.Ю., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю. Радиотомографическая установка Полярного геофизического института КНЦ РАН (РТУ ПГИ КНЦ РАН) // Гелиогеофизические исследования в Арктике. С. 129–132. 2016.
- Allen E.M., Thome G.D., Rao P.B. HF phased array observations of heater-Induced spread F // Radio Sci. V. 9. № 11. P. 905–916. 1974. <https://doi.org/10.1029/RS009i011p00905>
- Briggs B.H., Phillips G.T., Shinn D.H. The analysis of observation on spaced receivers of the fading of radio signals // Proc. Phys. Soc. № 63. P. 106–121. 1950.
- Briggs B.H., Elford W.J., Felgate D.J., Golley M.G., Rossiter D.E., Smith J.W. Buckland Park Aerial Array // Nature. № 223. P. 1321–1325. 1969.
- Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G. et al. An empirical model of the Earth's Horizontal Wind Fields: HWM07 // J. Geophys. Res. V. 113. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013668>
- Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G., Hernandez G., Jarvis M.J., Meriwether J.W., Niecejewski R.J., Sipler D.P., Tepley C.A. DWM07 global empirical model of upper thermospheric storm-induced disturbance winds // J. Geophys. Res. V. 113. 2008. <https://doi.org/10.1029/2008JA013541>
- Galushko V.G., Kascheev A.S., Paznukhov V.V., Yampolski Yu.M., Reinisch B.W. Frequency-and-angular sounding of traveling ionospheric disturbances in the model of three-dimensional electron density waves // Radio Sci. V. 43. № 4. 2008. <https://doi.org/10.1029/2007RS003735>
- Fejer B.G., Kelley M.C. Ionospheric irregularities // Rev. Geophys. Space Ge. V. 18. № 2. P. 401–454. 1980.
- Fremouw E.J., Leadabrand R.L., Livingston R.C. et al. Early results from the DNA wideband satellite experiment. Complex-signal scintillation // Radio Sci. V. 13. № 1. 1978.
- Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric tomography // Berlin: Springer, 260 p. 2003.
- Livingston R.C., Rino C.L., Owen J., Tsunoda R.T. The anisotropy of high-latitude nighttime F region irregularities // J. Geophys. Res. V. 87. № A12. P. 10519–10526. 1982.
- Moorcroft D.R., Arima K.S. The shape of the F-region irregularities which produce satellite scintillation – evidence for axial asymmetry // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 34. P. 437–450. 1972.
- Reinisch B.W., Scali J.L., Haines D.M. Ionospheric drift measurements with ionosondes // Ann. Geophysicae. V. 41. № 5–6. P. 695–702. 1998.
- Reinisch B.W., Huang X., Galkin I.A., Paznukhov V., Kozlov A. Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. V. 67. P. 1054–1062. 2005.
- Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M. et al. The new digisonde for research and monitoring applications // Radio Sci. V. 44. № 1. 2009. <https://doi.org/10.1029/2008RS004115>
- Rino C.L., Livingston R.C. On the analysis and interpretation of spaced-receiver measurements of transionospheric radio waves // Radio Sci. V. 17. № 4. P. 845–854. 1982.
- Scali J.L., Reinisch B.W., Heinselman C.J., Bullett T.W. Coordinated digisonde and incoherent scatter radar F region drift measurements at Sondre Stromfjord // Radio Sci. V. 30. № 5. P. 1481–1498. 1995. <https://doi.org/10.1029/95RS01730>
- Secan J.A., Bussey R.M., Fremouw E.J., Basu S. High-latitude upgrade to the Wideband ionospheric scintillation model // Radio Sci. V. 32. P. 1567–1574. 1997.
- 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. V. 17. P. 508–518. 1999.
- Tereshchenko E.D., Kozlova M.O., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S. Statistical tomography of subkilometer irregularities in the high-latitude ionosphere // Radio Sci. 39. RS1S35. 2004. <https://doi.org/10.1029/2002RS002829>
- 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. V. 26. P. 1725–1730. № 7. 2008.