

УДК 550.388.2;551.510.535

РЕЗУЛЬТАТ СОПОСТАВЛЕНИЯ ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ МЕЛКОМАСШТАБНЫХ НЕОДНОРОДНОСТЕЙ И НАПРАВЛЕНИЯ ДРЕЙФА В F -ОБЛАСТИ НАД МОСКОВСКИМ РЕГИОНОМ (В ПЕРИОД ЯНВАРЬ–МАРТ 2012 г.)

© 2022 г. Н. Ю. Романова¹ *, В. А. Телегин², В. А. Панченко², Г. А. Жбанков³

¹Федеральное государственное бюджетное научное учреждение
Полярный геофизический институт, Мурманск, Россия

²Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн имени Н.В. Пушкова
Российской академии наук, Москва, Россия

³Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования
“Южный федеральный университет”, Научно-исследовательский институт физики, Ростов-на-Дону, Россия

*E-mail: romanova@pgi.ru

Поступила в редакцию 15.10.2021 г.

После доработки 05.11.2021 г.

Принята к публикации 22.11.2021 г.

В период январь–март 2012 г. методом радиопросвечивания определена различная ориентация поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F -области ионосферы над московским регионом. Одновременно и пространственно-близко методом радиолокации определено направление дрейфа среднemasштабных неоднородностей. Проанализированы согласие и различие между сопоставленными экспериментальными данными.

DOI: 10.31857/S0367676522030206

ВВЕДЕНИЕ

F -область ионосферы имеет достаточно сложную структуру, включающую в себя неоднородности электронной плотности различных масштабов, перпендикулярные геомагнитному полю. Неоднородности с поперечными размерами от нескольких сотен метров до нескольких километров, называемые мелкомасштабными, анизотропны: вытянуты в большей степени вдоль геомагнитного поля и в меньшей степени – перпендикулярно ему. В ранних работах различные ориентации поперечной вытянутости не связывались с каким-либо физическим процессом, а только отмечались. Например, в работе [1] описана ориентация в направлении “север-юг”, в работах [2, 3] – в направлении “запад-восток”, в работе [4] – вдоль L -оболочки. Позднее в Полярном геофизическом институте (ПГИ) был разработан метод [5] приема и обработки амплитудных флуктуаций радиосигнала от низкоорбитальных (~1000 км) навигационных ИСЗ системы “Парус” с приполярными орбитами, который, пройдя через ионосферу, принимался на земле на двух когерентных частотах (~150 и ~400 МГц) с частотой оцифровки 50 Гц. Этот метод позволил детально исследовать анизо-

тропные неоднородности высокоширотной [6] и среднеширотной [7] F -области ионосферы.

В рамках данного метода физический смысл имеют не сами значения продольной и поперечной вытянутости неоднородностей, а только их соотношение. Численное определение данным методом величин продольной и поперечной вытянутости неоднородностей показало, что при различных геомагнитных условиях величина продольной вытянутости превышает величину поперечной вытянутости в несколько раз. Справедливость этого соотношения для неоднородностей высокоширотной и среднеширотной ионосферы позволяет представить модель изолированной неоднородности в виде эллипсоида (рис. 1), который не является эллипсоидом вращения, где буквенные обозначения α , β , Ψ_A обозначаются общим термином “параметры анизотропии”. Очевидно, что неоднородность вытянута преимущественно вдоль геомагнитного поля (ось α) и в некотором направлении перпендикулярно ему (ось β), при этом $\alpha > \beta > 1$. Поскольку $\beta > 1$, такие неоднородности называются “поперечно-анизотропными”, а ориентация оси β относительно направления на географический север получила термин “ориентация поперечной анизотропии” и буквенное обозначение Ψ_A . Вели-

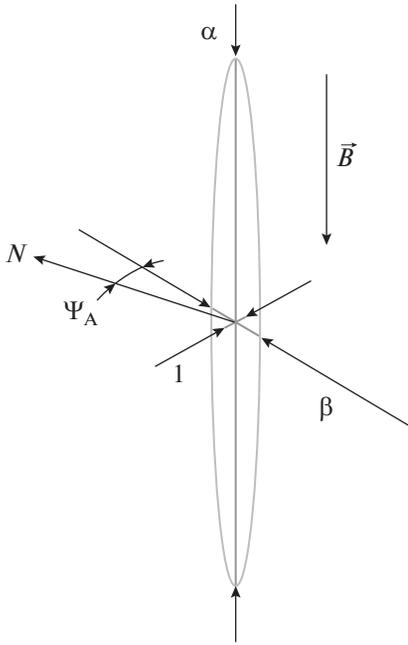


Рис. 1. Модель поперечно-анизотропной мелкомасштабной неоднородности в F -области ионосферы, где α и β – соответственно продольная и поперечная анизотропии неоднородности относительно геомагнитного поля, Ψ_A – ориентация поперечной анизотропии относительно географического севера.

чина Ψ_A измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке. Установлено, что в F -области высокоширотной ионосферы [6] и полярной шапке [8] ориентация поперечной анизотропии Ψ_A соответствует направлению электромагнитного дрейфа, а в работе [9] путем сравнения Ψ_A с моделью ветра в ионосфере средних широт установлено сходство Ψ_A с направлением горизонтального нейтрального ветра.

Настоящая работа – продолжение начатого в [10] исследования связи между ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей и направлением дрейфа среднemasштабных неоднородностей по данным ионозонда DPS-4 (установлен в ИЗМИРАН). Полученные на новом экспериментальном материале, эти величины будут сопоставлены численно. Данные получены одновременно в F -области ионосферы над московским регионом.

Под среднemasштабными подразумеваются неоднородности с размерами от порядка одной зоны Френеля до нескольких зон Френеля. В численном эквиваленте это составляет от 5–10 до 50–100 км в зависимости от высоты отражения и частоты зондирования. Для оценки скоростей и направления дрейфа использованы данные по угловому спектру радиоволн, отраженных от ионосферы и испытывавших по пути рассеяние на неоднородностях.

Данные получены при когерентной обработке сигналов с малоэлементной приемной антенной решетки, с доплеровской фильтрацией и так называемых “карт неба” [10–13], полученных при работе ионозонда DPS-4 (ИЗМИРАН). Подробности структуры и режимов работы DPS-4 можно найти в [12, 13, 15]. Отметим здесь только самые существенные для исследования неоднородной структуры особенности данного аппарата [10]. При зондировании ионосферы, из-за наличия магнитного поля Земли, излученная антенной плоскополяризованная волна распадается на две эллиптически поляризованные волны. Это так называемые обыкновенная волна (O -волна) и необыкновенная волна (X -волна). Они имеют различные показатели преломления и отражаются на разных высотах ионосферы. Обычно антенны ионозонда на земле принимают суперпозицию O - и X -волн. DPS-4 может аппаратным образом выделять одну из них, обычно, O -поляризацию. Это улучшает соотношение сигнал/шум на стандартных ионограммах и упрощает их автоматическую обработку. В другом режиме работы DPS-4 выделение одной поляризации также позволяет получить более корректные оценки углового спектра отраженных от неоднородной ионосферы радиоволн, используемые нами для определения характеристик неоднородностей в ионосфере. В этом режиме при работе поочередно на 4 близких фиксированных частотах записываются амплитуды и фазы (точнее, квадратурные составляющие) с четырех разнесенных антенн. Принятый импульсный сигнал когерентно обрабатывается в 4 приемниках с разбивкой по 5 км ячейкам дальности. Для каждой ячейки дальности производится разбивка по доплеровским ячейкам, обычно шириной 0.05 Гц. Далее разность фаз используется для определения углов прихода, для каждой из ячеек матрицы дальность – доплеровская частота. Получаемую таким способом дискретную оценку углового спектра отраженных от ионосферы с рассеивателями радиоволн в DPS-4 представляют в виде “карты неба” (“SkyMaps” в англоязычном варианте). При интенсивном F -рассеянии, обычно в ночных условиях, на карте неба за один двухминутный сеанс могут отображаться сотни или более тысячи измерений углов прихода. Доплеровская частота легко пересчитывается в радиальную скорость рассеивателя. Теперь можно оценить полный вектор скорости группы рассеивающих неоднородностей при некоторых простых предположениях. Пусть минимум три рассеивателя имеют одинаковый вектор скорости. Тогда для них можно записать несложные тригонометрические уравнения и исходя из комбинации данных радиальная скорость – углы прихода рассеянной волны однозначно получить все три составляющие вектора скорости для этой совместно перемещающейся тройки рассеивателей. Перебирая всевоз-

можные тройки, можно получить набор распределение их скоростей и их среднее значение. Если измерений достаточно много, то можно оценить и дисперсию скоростей. Именно такая методика обработки “карт неба” встроена в алгоритм работы и математическое обеспечение ионозонда DPS-4. В дальнейшем она прошла проверку сравнением с одновременно полученными данными некогерентного рассеяния [14, 15]. В последние годы эта методика широко применяется в исследованиях среднemasштабных неоднородностей (<http://www.digisonde.com/publications.html>).

НАБЛЮДЕНИЯ

Полярный геофизический институт (ПГИ) методом радиопросвечивания ИСЗ много лет исследует F -область ионосферы над московским регионом с помощью наземного приемника в МГУ им. М.В. Ломоносова. Мы выбрали произвольный период: с января по март 2012 г. Первичные данные радиопросвечивания отобраны по критерию: величина минимального угла между лучом зрения “приемник–спутник” и магнитным полем не должна превышать 18° – 20° . Иначе траектория ИСЗ находится далеко от приемника, из-за чего луч зрения “приемник–спутник” проходит больший путь в ионосфере, нарушая условия постоянства флуктуаций электронной плотности в просвечиваемом объеме, заложенное при выводе базовых математических соотношений в [16, 17]. Эти соотношения связывают дисперсию логарифма относительной амплитуды σ_χ^2 волны, рассеянной на трехмерно-анизотропных неоднородностях, с параметрами α , β , Ψ_A этих рассеивателей. Схематично соотношения можно представить в виде [18]:

$$\sigma_\chi^2 \sim \int_{z_u}^{z_d} \sigma_N^2(z) * f\{R_F(z), \theta(z), \alpha, \beta, \Psi_A, p\} dz,$$

где z_u и z_d – нижняя и верхняя границы неоднородного слоя вдоль оси z в направлении от приемника к спутнику (в данной работе границами интегрирования являлись действующие высоты ионозонда DPS-4: от 210 до 435 км), σ_N^2 – дисперсия флуктуации плотности, R_F – радиус Френеля, $\theta(z)$ – угол между направлением “приемник–спутник” и магнитным полем, p – показатель степени, α , β , Ψ_A – параметры анизотропии.

Схематичное соотношение показывает, что изменения дисперсии уровня амплитуды σ_χ^2 могут быть обусловлены тремя факторами:

1) пространственными изменениями дисперсии флуктуации плотности σ_N^2 ;

2) пространственными изменениями параметров спектра неоднородностей α , β , Ψ_A , p ;

3) поведением самой функции f в зависимости от геометрических факторов R_F и $\theta(z)$.

Эти три фактора могут действовать как по отдельности, так и в разных сочетаниях друг с другом. В простейшем случае, когда дисперсия флуктуаций плотности σ_N^2 и параметры спектра неоднородностей α , β , Ψ_A , p не меняются в пространстве и во времени, тогда изменения дисперсии уровня амплитуды σ_χ^2 определяются только геометрическими изменениями функции f , зависящими главным образом от параметров анизотропии неоднородностей α , β , Ψ_A и взаимного расположения луча зрения и вектора магнитного поля – угла θ . Изменения радиуса Френеля являются медленно меняющейся функцией, и влияние этих изменений на поведение σ_χ^2 незначительно. Угол θ можно рассчитать на основе модели магнитного поля. Следовательно, рассчитывая значения θ и подбирая теоретическую кривую, наилучшим образом согласующуюся с экспериментальной, можно определить параметры анизотропии мелкомасштабных неоднородностей α , β , Ψ_A .

Расчет σ_χ^2 в [16, 17] сделан в рамках приближения Рытова [19], применимого только к слабым флуктуациям, когда $\sigma_\chi^2 < 0.3$ (в среднеширотной ионосфере уровень флуктуаций редко превышает данное значение). Расчет σ_χ^2 выполнен для степенного спектра неоднородностей электронной плотности с показателем спектра $0 < p < 4$, определяемого по высокочастотной асимптоте амплитудного спектра экспериментальных данных. При расчете σ_χ^2 моделью пространственного распределения мелкомасштабных неоднородностей в слабо возмущенной ионосфере является протяженный статистически однородный слой с $\sigma_N^2 = \text{const}$.

Возвращаясь к экспериментальным данным, отметим: общее количество радиосеансов, удовлетворяющих критерию $\theta_{\min} < 18^\circ$ – 20° , в период январь–март 2012 г. составило 150. Под “общим количеством” подразумеваются радиосеансы, записи которых содержат квадратуры (т.е. радиосеансы, записи которых содержат только аппаратный шум или продолжительные потери радиосигнала, в “общее количество” не входят). Количество сеансов, когда в квадратурных компонентах радиосигнала наблюдались амплитудные флуктуации (преимущественно, в ночное время суток), составило 62. Количество радиосеансов, когда интенсивность амплитудных флуктуаций позволяла определить параметры анизотропии неоднородностей, составило 26. Из этого количества для 21 случая были получены одновременные данные

о направлении дрейфа среднemasштабных неоднородностей. На двух примерах сопоставим значения ориентации поперечной анизотропии с направлением дрейфа и проанализируем результаты.

Рассмотрим случай 9 февраля 2012 г. Если считать дисперсию логарифма относительной амплитуды радиосигнала ИСЗ и представить ее графически, то вблизи геомагнитного зенита наблюдается изолированный максимум (в 23:09 UT), образованный вследствие усиления амплитудных флуктуаций на мелкомасштабных неоднородностях (рис. 2а). Высота максимума в несколько раз превышает фоновый уровень, поэтому аппроксимация его теоретической функцией позволяет определить параметры анизотропии неоднородностей α , β , Ψ_A , они приведены в левом верхнем углу рисунка. Численные значения параметров α , β , Ψ_A определяются путем перебора их различных величин с целью минимизации различий между экспериментальной и теоретической кривыми. Ширина теоретического максимума зависит от величин α и β , а пространственное положение максимума — от значения Ψ_A . Исключение составляют траектории ИСЗ, для которых $\theta_{min} < 2^\circ$ (т. н. зенитные пролеты): фланговые части графика функции $\tilde{\sigma}_\chi^2$ практически не меняются при изменении β , а пространственное положение максимума малочувствительно к изменению Ψ_A . Для случаев не зенитных пролетов доверительный интервал величины Ψ_A в данной работе составляет несколько градусов (на разных высотах в F-слое значение Ψ_A остается в пределах доверительного интервала); доверительный интервал величин α и β в данной работе не оценивался, поскольку они входят в математическое соотношение мультипликативным образом.

Параметры α , β , Ψ_A считаются постоянными в широтно-долготной области, занимаемой максимумом. В данном примере это область с центром $\sim 55^\circ$ с. ш., в дальнейшем называемая “область наблюдения мелкомасштабных неоднородностей”. Пунктир — график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения с указанием минимального θ_{min} и максимального θ_{max} значений. Ионосферные условия в этот момент иллюстрирует ионограмма на рис. 2б.

Направление дрейфа (рис. 2в) для этого случая автоматически рассчитывается программным обеспечением DriftExplorer, поставляемым с DPS-4. Усредненное по всем отражателям (среднемасштабным неоднородностям, которые показаны серыми точками), направление дрейфа показано стрелкой. Значение скорости дрейфа v и его направление Ψ_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. Количество измерений углов прихода отраженных от неоднородной ионосферы радиоволн на этом рисунке — 1613. Положение области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей показано эллипсом, большая ось которого соответствует ориентации поперечной анизотропии. Сопоставление значений $\Psi_D = 347^\circ$ и $\Psi_A = 143^\circ \equiv 323^\circ$ (очевидно, что, если к текущему значению прибавить 180° , результат аппроксимации не изменится) показало различие между ними $\Delta\Psi = \Psi_A - \Psi_D = -24^\circ$. Мы находим эту величину относительно небольшой, но полагаем, что сопоставление экспериментальных данных можно сделать с большей точностью, поскольку область наблюдения мелкомасштабных неоднородностей находится не в центре карты неба, а смещена к югу, где направление дрейфа может отличаться от усредненного значения, рассчитанного программным обеспечением DriftExplorer.

С этой целью в работе [20] был разработан и реализован в виде программы новый метод расчета скорости и направления дрейфа среднemasштабных неоднородностей в наперед заданной локальной области. Программа получила название LocalDrift. Ее преимущество 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 неоднородностей, пространственное положение которой было 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.

На рис. 2г показано взаимное расположение области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и локальной области с ионосферными отражателями. Область с ионосферными отражателями (141 отражения) выбрана таким образом, чтобы количество измерений было одинаковым относительно центра области как в направлении “север–юг”, так и в направлении “запад–восток”. Параметры дрейфа, рассчитанные программой LocalDrift в области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и вокруг нее, приведены в правом верхнем углу рисунка. Согласно расчетам, направление дрейфа составляет $\Psi_D = 127^\circ$, что существенно отличается от полученного ранее значения Ψ_D . При этом различие $\Delta\Psi$ между Ψ_A и Ψ_D сократилось с $\Delta\Psi = -24^\circ$ до $\Delta\Psi = 16^\circ$. Отметим также, что скорость дрейфа в ло-

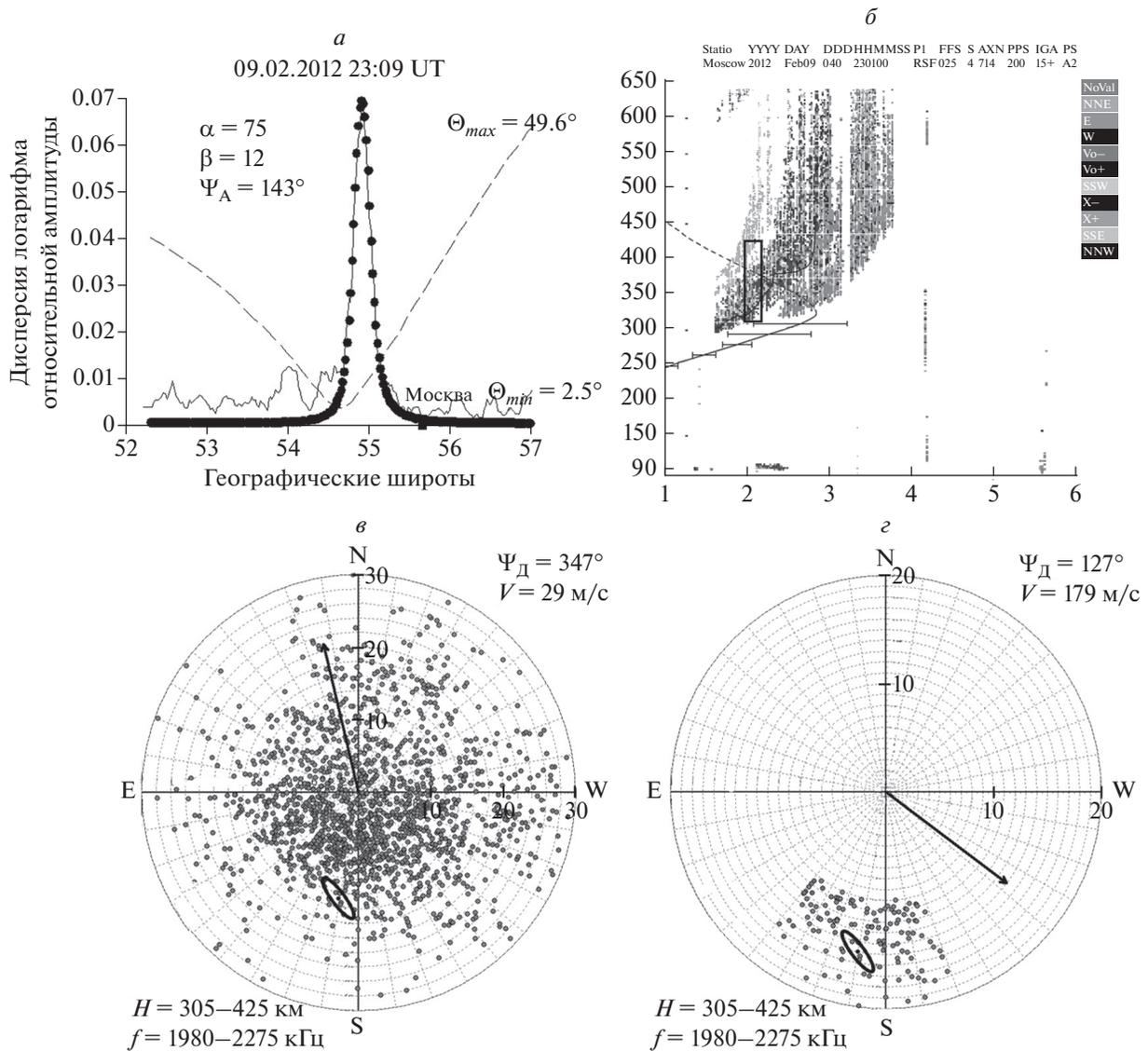


Рис. 2. Наблюдение 9 февраля 2012 г.: экспериментальный максимум в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды (сплошная кривая) и его аппроксимация теоретической кривой (кружки). В левом верхнем углу рисунка – параметры наилучшей аппроксимации α , β , Ψ_A (а); ближайшая по времени ионограмма с сильным F -рассеянием, где прямоугольником выделены отражения, принятые к расчету программой DriftExplorer (б); взаимное расположение на карте неба области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей (эллипс) и всех ионосферных отражателей (в) (серые точки) и отражателей в локальной области (г). Стрелка в центре рисунков – направление дрейфа согласно программам DriftExplorer и LocalDrift.

кальной области существенно превышает предыдущее значение, что позволяет доверять полученному результату.

При работе с DPS-4 были приняты все меры для улучшения точности измерения направления дрейфа неоднородностей (использовались 4 близкие фиксированные частоты, восьмикратное повторение измерений в одном цикле для увеличения статистики, селекция отражений по направлению для выделения нужной области). В результате, для программы LocalDrift авторы считают оптими-

стичной оценку доверительного интервала направления дрейфа $\pm 5^\circ$ азимута в хороших условиях при наличии широкого конуса рассеяния на карте неба. В случаях, когда F -рассеяние на ионограммах и картах неба слабо выражено или отсутствует, определение направления дрейфа может стать практически невозможным.

Сопоставление экспериментальных данных Ψ_A и Ψ_D для всех 21 случаев сделано с использованием программы LocalDrift. На гистограмме разностей $\Psi_A - \Psi_D$ (рис. 3), значения $\Delta\Psi$ сгруппирова-

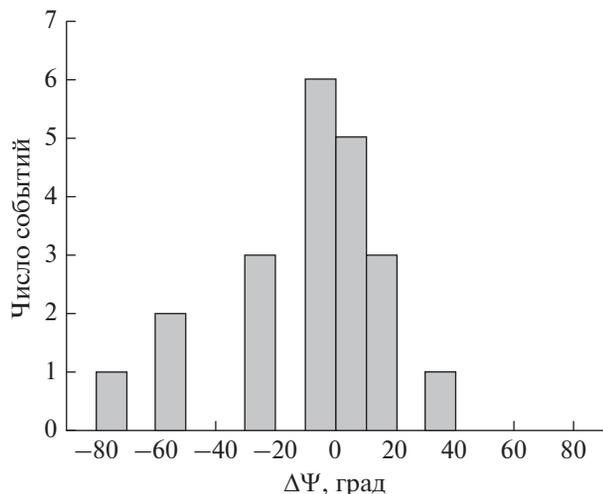


Рис. 3. Гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением дрейфа Ψ_D для 21 случая наблюдений.

ны по интервалам с шагом 10° . Ось абсцисс – величина $\Delta\Psi$, ось ординат – количество случаев, значения $\Delta\Psi$ которых находятся в данном интервале. Положительные значения оси X означают, что величина Ψ_A больше величины Ψ_D , отрицательные значения означают обратное. В 17 случаях значения $\Delta\Psi$ находятся в интервале $-30^\circ \dots -20^\circ$. Это позволяет сделать вывод, что дрейф среднemasштабных неоднородностей может влиять на поперечную вытянутость мелкомасштабных неоднородностей. Однако в 4 случаях величина $\Delta\Psi$ существенно больше, вплоть до $\sim 90^\circ$. Эти случаи делятся на две категории: в одних случаях максимум дисперсии уровня амплитуды был расположен далеко от локального геомагнитного зенита, другие случаи относятся к так называемым “зенитным пролетам” ИСЗ, когда $\theta_{min} < 2^\circ$.

Рассмотрим один из зенитных случаев на примере 6 марта 2012 г. (рис. 4а) с наблюдением мелкомасштабных неоднородностей в 19:01 UT. При $\theta_{min} = 1^\circ$ доверительный интервал определения величины Ψ_A составил $\pm 35^\circ$, в то время как при $\theta_{min} > 2^\circ$ он не превышал нескольких градусов. Для сопоставления с направлением дрейфа мы решили использовать этот случай, поскольку подобное сопоставление ранее не проводилось, и любой результат будет полезен в дальнейшем. Для центрального значения $\Psi_A = 68^\circ$ из интервала всех возможных направление дрейфа в обоих случаях составило $\Psi_D = 128^\circ$ (рис. 4б и 4в) и различие $\Psi_A - \Psi_D$ составило $\Delta\Psi = -60^\circ$, что не соответствует значениям ориентации поперечной анизотропии доверительного интервала. Таким образом, наблюдения мелкомасштабных неоднородностей в

условиях зенитных пролетов либо следует отбраковывать, либо привлекать дополнительные экспериментальные данные, например, о направлении горизонтального ветра.

В данной работе использована малая часть от общего объема экспериментальных данных, полученных приемником в МГУ и ионозондом DPS-4 в ИЗМИРАН. Исследование параметров мелкомасштабных неоднородностей при различных геофизических условиях будет продолжено на большем экспериментальном материале.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На примере 21 случая наблюдений, проведенных в январе–марте 2012 г. преимущественно в ночное время суток, параметры мелкомасштабных неоднородностей электронной плотности в F-области ионосферы над московским регионом исследованы двумя независимыми методами: методом радиопросвечивания сигналами ИСЗ с их регистрацией наземным приемником (МГУ им. М.В. Ломоносова) и методом радиолокации с поверхности земли ионозондом DPS-4 (ИЗМИРАН). Анализ амплитудных флуктуаций, полученных методом радиопросвечивания, показал, что мелкомасштабные неоднородности являются анизотропными в поперечном геомагнитному полю направлении, и ориентация поперечной анизотропии различна в разных сеансах. Сопоставление с одновременными данными направления дрейфа среднemasштабных неоднородностей, полученными методом радиолокации и программой LocalDrift, показало, что в 17 из 21 случая различие между ориентацией поперечной анизотропии и направлением дрейфа находится в интервале $-30^\circ \dots -20^\circ$, где в 14 случаях интервал составляет $-10^\circ \dots -20^\circ$. Интерпретируя эту величину как малую, можно сделать вывод, что направление дрейфа среднemasштабных неоднородностей оказывает влияние на вытянутость мелкомасштабных неоднородностей перпендикулярно геомагнитному полю. Вопрос о физическом механизме такого влияния (т.е. о том, какой именно процесс играет главную роль в формировании мелкомасштабных неоднородностей – неустойчивость Рэлея–Тейлора, градиентно-дрейфовая неустойчивость или какая-либо другая) остается открытым.

Авторы благодарят инженеров лаборатории радиопросвечивания ПГИ за проведение экспериментальных работ и сотрудников кафедры физики атмосферы физического факультета МГУ им. М.В. Ломоносова за размещение приемного оборудования и обеспечение непрерывных наблюдений. Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ в рамках темы государственного

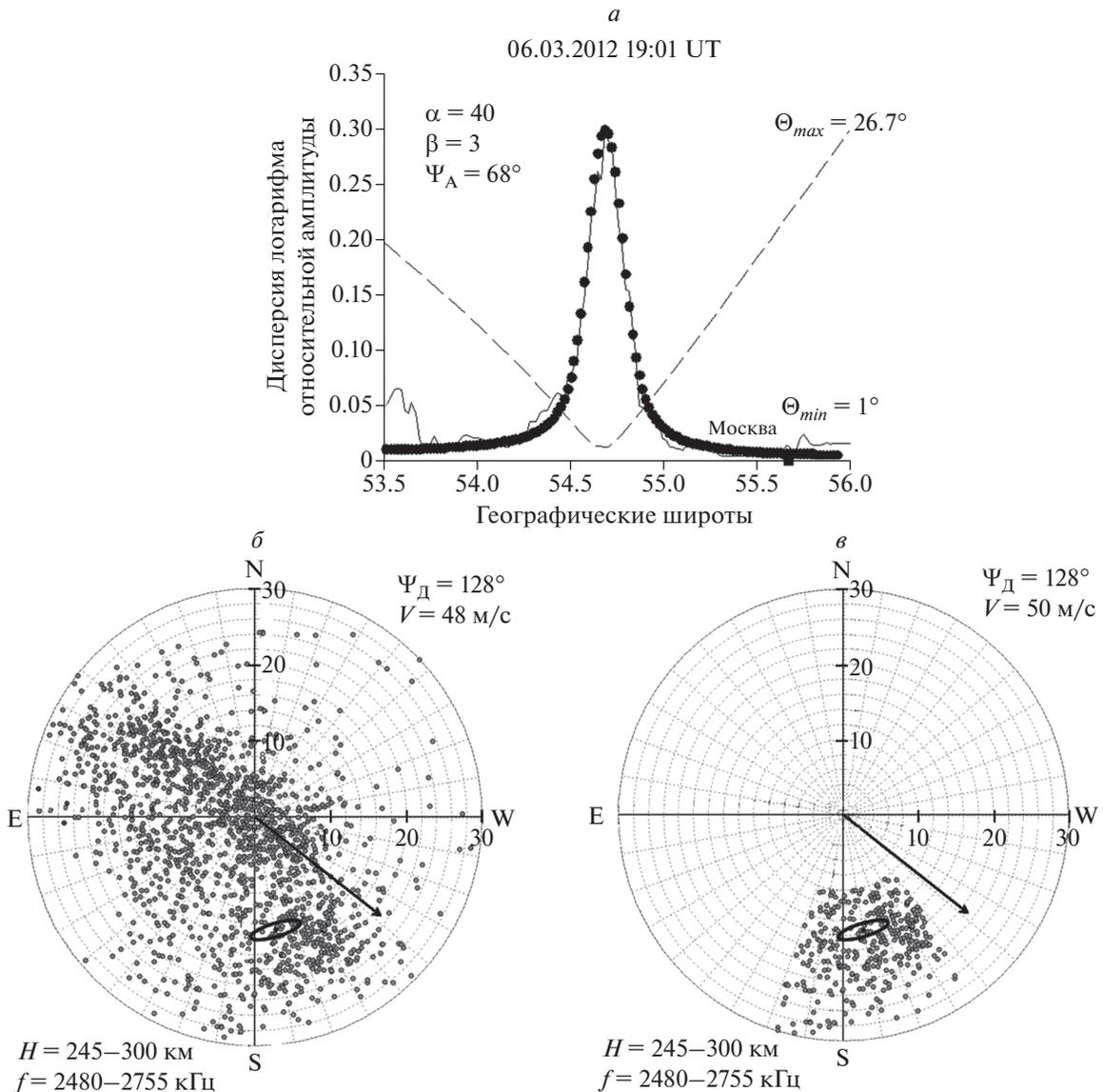


Рис. 4. Наблюдение 6 марта 2012 г.: (*a*) – экспериментальный максимум в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды и его аппроксимация теоретической кривой. (*б, в*) – взаимное расположение на карте неба области наблюдения мелкомасштабных неоднородностей и ионосферных отражателей. Условные обозначения те же, что на рис. 2.

задания в сфере научной деятельности №№ 0227-2019-0001, 0852-2020-0015 и 01201356396, а также Российского фонда фундаментальных исследований (проект № 19-52-25001_Кипр_а).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Moorcroft D.R., Arima K.S.* // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 1972. V. 34. P. 437.
2. *Fejer B.G., Kelley M.C.* // Rev. Geophys. Space Phys. 1980. V. 18. No. 2. P. 401.
3. *Fremouw E.J., Leadabrand R.L., Livingston R.C. et al.* // Radio Sci. 1978. V. 13. No. 1. P. 167.
4. *Rino C.L., Livingston R.C.* // Radio Sci. 1982. V. 17. No. 4. P. 845.
5. *Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T.* // Ann. Geophys. 1999. V. 17. No. 4. P. 508.
6. *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.
7. *Романова Н.Ю.* // Тр. 38 семин. "Физика авроральных явлений" (Апатиты, 2015). С. 157.
8. *Tereshchenko E.D., Romanova N.Yu., Koustov A.V.* // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 1725.

9. Романова Н.Ю. // Геомагн. и аэронавиг. 2017. Т. 57. № 4. С. 463.
10. Панченко В.А., Телегин В.А., Романова Н.Ю. // Изв. вузов. Радиоэлектрон. 2019. Т. 22. № 4. С. 53; Panchenko V.A., Telegin V.A., Romanova N.Yu. // Radioelectron. Commun. Syst. 2019. V. 22. No. 4. P. 53.
11. Reinisch B.W., Scali J.L., Haines D.M. // Ann. Geophys. 1998. V. 41. No. 5–6. P. 695.
12. Galushko V.G., Kascheev A.S., Paznukhov V.V. et al. // Radio Sci. 2008. V. 43. No. 4. Art. No. RS4013
13. Reinisch B.W., Galkin I.A., Khmyrov G.M. et al. // Radio Sci. 2009. V. 44. No. 1. Art. No. RS0A24.
14. Scali J.L., Reinisch B.W., Heinselman C.J., Bullett T.W. // Radio Sci. 1995. V. 30. No. 5. P. 1481.
15. Reinisch B.W., Huang X., Galkin I.A. et al. // J. Atm. Sol.-Terr. Phys. 2005. V. 67. P. 1054.
16. Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D. Ionospheric tomography. Springer, 2003. 260 p.
17. Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С. Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
18. Tereshchenko E.D., Kozlova M.O., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S. // Radio Sci. 2004. V. 39. Art. No. RS1S35.
19. Рытов С.М., Крайнов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные процессы. М.: Наука, 1978.
20. Zhbankov G.A., Telegin V.A., Panchenko V.A., Maltseva O.A. // Proc. RSEMW-2021. (Divnomorskoe, 2021). P. 337.

Result of comparison of the orientation of cross-field anisotropy of small-scale irregularities and drift direction in *F*-layer over Moscow region (during January–March 2012)

N. Yu. Romanova^{a,*}, V. A. Telegin^b, V. A. Panchenko^b, G. A. Zhbankov^c

^a Polar Geophysical Institute, Murmansk, 183010 Russia

^b Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia

^c Institute for Physics, Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia

*e-mail: romanova@pgi.ru

During January–March 2012, the radio-probing method determined the different orientation of cross-field anisotropy of the small-scale irregularities in the *F*-layer of ionosphere over the Moscow region. Simultaneously and spatially close by the radiolocation method, the drift direction of medium-scale irregularities is determined. The agreement and difference between the compared experimental data is analysed.