

УДК 550.388.2:550.389.3:551.510.535

ЛОКАЛЬНЫЕ ВАРИАЦИИ ОРИЕНТАЦИИ ПОПЕРЕЧНОЙ АНИЗОТРОПИИ И НАПРАВЛЕНИЕ ДРЕЙФА В F-ОБЛАСТИ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ

© 2024 г. Н. Ю. Романова^{1, *}, 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 24.08.2023

После доработки 13.11.2023

Принята к публикации 30.11.2023

Анализ флуктуаций радиосигналов ИСЗ, рассеянных на мелкомасштабных неоднородностях F-области ионосферы и принятых наземным приемником в Москве, показал, что в широтном профиле дисперсии логарифма относительной амплитуды можно наблюдать как единичный максимум, так и два-три максимума. Определена ориентация поперечной анизотропии неоднородностей и сопоставлена с направлением дрейфа, полученным ионозондом DPS-4 с использованием программы LocalDrift.

DOI: 10.31857/S0367676524030159, EDN: QLNTZG

ВВЕДЕНИЕ

Высокочастотные радиосигналы, получаемые с низкоорбитального спутника наземным приемником, часто испытывают флуктуации, называемые также сцинтилляциями [1]. Такие флуктуации происходят потому, что радиосигнал рассеивается в F-области ионосферы анизотропными неоднородностями с масштабами от нескольких сотен метров до нескольких километров, называемых мелкомасштабными. Хотя флуктуации ограничивают связь со спутником, они полезны для изучения неоднородностей. В Полярном геофизическом институте (ПГИ) разработан метод приема радиосигнала и записи его квадратур, а также разработана методика математического анализа его фазы и амплитуды [2–4]. С использованием этого метода применительно к амплитудным флуктуациям в работе [5] была исследована форма анизотропных мелкомасштабных неоднородностей в F-области высокоширотной ионосферы. Были численно определены: вытянутость неоднородностей вдоль геомагнитного поля (продольная анизотропия α) и вытянутость неоднородностей перпендикулярно геомагнитному полю (поперечная анизотропия 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 . Величина Ψ_A измеряется в градусах и отсчитывается от направления на географический север по часовой стрелке. В работе [5] было впервые показано, что ориентация поперечной анизотропии Ψ_A высокоширотных неоднородностей F-области близка к направлению дрейфа ионосферной плазмы по данным радара EISCAT, что подтвердилось в дальнейшем [6, 7] исследованиями ионосферы полярной шапки, где направление дрейфа определялось радаром SuperDARN.

Методом радиопросвечивания в ПГИ были исследованы параметры анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в среднеширотной ионосфере. По данным цепочки станций Острожск (50.87° с.ш., 39.06° в.д.) — Ростов-на-Дону (47.21° с.ш., 39.70° в.д.) — Сочи (43.58° с.ш., 39.77° в.д.) было установлено [8], что ориентация поперечной анизотропии Ψ_A находится в хорошем согласии с направлением горизонтального нейтрального ветра, рассчитанного моделью HWM07 [9, 10]. Поскольку в настоящее время стало возможным исследование среднеширотных мелкомасштабных неоднородностей путем привлечения экспериментальных данных о дрейфе с ионозонда DPS-4, установленного в ИЗМИРАН (г. Троицк,

г. Москва), то актуальный научный интерес стали представлять данные радиопросвечивания, полученные в Москве. Радиосигналы ИСЗ системы “Парус” поступали на разработанный в ПГИ двухчастотный приемник, установленный в МГУ имени М. В. Ломоносова и входящий в состав радиотомографической установки ПГИ (РТУ ПГИ) [11]. Были обработаны амплитудные флуктуации сигналов ИСЗ за разные месяцы нескольких лет и проведено сопоставление ориентации поперечной анизотропии Ψ_A с направлением дрейфа среднemasштабных неоднородностей. Сопоставление показало, что различие между ними в большинстве случаев находится в интервале 10° – 20° [12, 13]. Оценивая эту величину как малую, сделан вывод, что направление дрейфа среднemasштабных неоднородностей оказывает влияние на вытянутость мелкомасштабных неоднородностей перпендикулярно геомагнитному полю. В работе [13] также рассмотрен случай, когда в продолжение одного радиосезона вдоль траектории спутника были обнаружены две локальные области с мелкомасштабными неоднородностями, в одной из которых величина Ψ_A имела одно значение, а во второй — другое, т.е. ориентация поперечной анизотропии изменялась вдоль спутниковой траектории. В графике дисперсии логарифма относительной амплитуды это проявилось в виде двух максимумов, разнесенных вдоль траектории спутника. В этой работе мы подробно рассмотрим примеры других аналогичных случаев — наличие в графике дисперсии двух или трех максимумов, различно удаленных друг от друга, и дадим им интерпретацию путем сопоставления с данными ионозонда DPS-4 о направлении дрейфа среднemasштабных неоднородностей.

НАБЛЮДЕНИЯ

Метод Терещенко и др. [2] изначально был разработан для исследования высокоширотных трехмерно-анизотропных неоднородностей. Базовые математические соотношения связывают дисперсию логарифма относительной амплитуды σ_χ^2 волны, рассеянной на трехмерно-анизотропных неоднородностях, с параметрами α , β и Ψ_A этих неоднородностей. В работе [13] наглядно показано, что базовые математические соотношения хорошо описывают экспериментальные данные среднеширотной ионосферы. Кратко остановимся на теоретических положениях, заложенных при выводе этих соотношений для высокоширотной ионосферы и справедливых для средних широт.

Расчет σ_χ^2 сделан в рамках приближения Рытова [14], применимого только к слабым флуктуациям, когда $\sigma_\chi^2 < 0.3$. В среднеширотной ионосфере их уровень 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. В расчетах спектра учтено, что при приеме волн от ИСЗ ультракороткого волнового диапазона радиус Френеля будет иметь величину, не превышающую 1 км, в то время как внешний масштаб неоднородностей оценивается в несколько десятков километров, т.е. отношение радиуса Френеля к внешнему масштабу является малым параметром. При расчете σ_χ^2 моделью пространственного распределения мелкомасштабных неоднородностей в слабо возмущенной ионосфере является протяженный статистически однородный слой с дисперсией флуктуации электронной плотности $\sigma_N^2 = \text{const}$.

Базовые математические соотношения наглядно представимы в следующем виде [15]:

$$\sigma_\chi^2 \sim \int_{z_u}^{z_d} \sigma_N^2(z) f\{R_F(z), \Theta(z), \alpha, \beta, \Psi_A, p\} dz, \quad (1)$$

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 км до 435 км); σ_N^2 — дисперсия флуктуации плотности; R_F — радиус Френеля; $\Theta(z)$ — угол между направлением “приемник — спутник” и магнитным полем; α , β и Ψ_A — параметры анизотропии; p — показатель степени.

Соотношение (1) показывает, что изменения дисперсии логарифма относительной амплитуды σ_χ^2 могут быть обусловлены тремя факторами:

- 1) пространственными изменениями параметров спектра неоднородностей α , β , Ψ_A , p ;
- 2) пространственными изменениями дисперсии флуктуации электронной плотности σ_N^2 ;
- 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 флуктуации плотности σ_N^2 и параметры спектра неоднородностей α , β и Ψ_A , p не меняются в пространстве и во времени в ограниченном просвечиваемом объеме, тогда изменения дисперсии уровня амплитуды σ_χ^2 определяются только геометрическими изменениями функции f , зависящими главным образом от параметров анизотропии неоднородностей α , β и 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 и Ψ_A .

В рамках предположения о равномерном распределении неоднородностей с постоянными параметрами анизотропии по всему протяженному F-слою экспериментальная кривая дисперсии логарифма относительной амплитуды σ_{χ}^2 в своем широтном профиле имеет единственный максимум вблизи локального геомагнитного зенита приемника. Если максимум в несколько раз превышает уровень фона, то он может быть аппроксимирован теоретической кривой — моделью анизотропных мелкомасштабных неоднородностей. Минимизация различия между обеими кривыми позволяет определить параметры анизотропии α , β и Ψ_A . Анализ показывает: при любой геометрии “спутник—приемник” теоретический широтный профиль имеет единственный максимум.

Кратко об отборе данных радиопросвечивания. Были обработаны все радиосеансы периода май 2009 — март 2012 г. Несмотря на продолжительность наблюдательного периода, количество случаев, позволяющих определить параметры анизотропии, сравнительно невелико. Величина Ψ_A была определена в 218 из 621 радиосеансов, записи которых в свою очередь содержали флуктуации радиосигнала. Общее же количество радиосеансов составляло 2019. Под общим количеством подразумеваются радиосеансы с максимальным значением угла места ИСЗ не ниже 75° , согласно требованиям к геометрии эксперимента, о которой будет сказано ниже. В общее количество также не входят радиосеансы, записи которых содержат аппаратный шум, продолжительные потери радиосигнала или записи с низким отношением сигнал-шум. Таким образом, величину Ψ_A можно было определить в $\sim 11\%$ случаев от общего количества. Столь низкий процент обусловлен двумя факторами: во-первых, флуктуации в сигнале ИСЗ наблюдались, преимущественно, в ночное время суток. Во-вторых, даже при наличии флуктуаций их интенсивность не всегда была достаточной для того, чтобы высота максимума в графике дисперсии уровня амплитуды была выше уровня фона.

Возвращаясь к геометрии эксперимента. Максимальное значение угла места ИСЗ не ниже 75° выбрано в качестве пограничного значения, при котором минимальный угол между лучом зрения “приемник — спутник” и магнитным полем Θ_{\min} не превышает $18\text{--}20^\circ$. Превышение означает, что траектория ИСЗ находится далеко от наблюдателя, из-за чего луч зрения “приемник — спутник” проходит больший путь в ионосфере, что может нарушить условие постоянства дисперсии флуктуации электронной плотности вдоль луча зрения, заложенное при выводе базовых математических соотношений. Исходя из геометрии эксперимента мы также отбраковали случаи, где при соблюдении условия $\Theta_{\min} < 18\text{--}20^\circ$ максимум дисперсии уровня амплитуды находился далеко от локального геомагнитного зенита приемной станции. В этом случае

луч зрения “приемник — спутник” также проходит больший путь в ионосфере.

Итоговое количество сеансов радиопросвечивания, для которых были одновременные данные по дрейфу, составило 68. Приступая к сопоставлению экспериментальных данных отметим, что во всех 68 случаях высота максимума дисперсии уровня амплитуды не превышала 0.3, чему способствовали преимущественно спокойные геомагнитные условия: $Kp \leq 3+$ в 66 случаях, в двух других случаях $Kp = 4$ и $Kp = 5+$.

На рис. 1а и 1б приведены два примера аппроксимации одного максимума, в несколько раз превышающего уровень фона, в широтных профилях дисперсии логарифма относительной амплитуды σ_{χ}^2 . В радиосеансе 15 января 2010 г. при $Kp = 2+$ (см. рис. 1а) флуктуации рассеянного на неоднородностях радиосигнала наблюдались между 54.3° с.ш. и 55.3° с.ш. В радиосеансе 4 марта 2012 г. при $Kp = 2-$ (см. рис. 1б) неоднородности были обнаружены между 53.5° с.ш. и 55.1° с.ш. Согласно модели трехмерно-анизотропных неоднородностей при $2^\circ < \Theta_{\min} < 20^\circ$ ширина теоретического максимума определяется в основном вытянутостью неоднородностей вдоль α и перпендикулярно β к магнитному полю, а широтное положение максимума главным образом зависит от ориентации поперечной анизотропии Ψ_A . Параметры анизотропии α , β и Ψ_A , с которыми достигается наилучшая аппроксимация, приведены в левом верхнем углу каждого рисунка. Эти параметры считаются постоянными в широтно-долготной области, занимаемой максимумом. Пунктиром показан график значений углов между перемещающимся спутником и магнитным полем в точке наблюдения с указанием минимального (Θ_{\min}) и максимального (Θ_{\max}) значений. В работе [13] наглядно показано, что доверительный интервал величины Ψ_A составляет несколько градусов, если спутниковый пролет не является зенитным, т.е. $\Theta_{\min} > 2^\circ$. В рассматриваемых спутниковых сеансах это выполняется, что позволяет численно сопоставить ориентацию поперечной анизотропии Ψ_A с одновременным направлением дрейфа среднемасштабных неоднородностей.

Результаты сопоставления приведены на рис. 1б и 1г. На карте всего неба положение области с мелкомасштабными неоднородностями показано эллипсом, большая ось которого соответствует ориентации поперечной анизотропии Ψ_A . Относительно карты всего неба область, занимаемая максимумом, мала, поэтому ее широтно-долготные размеры показаны условно, т.е. размеры осей эллипса не несут физического смысла. Локальная область с ионосферными отражателями выбрана таким образом, чтобы количество отражателей было одинаковым относительно центра области как в направлении “север — юг”, так и в направлении “запад — восток”.

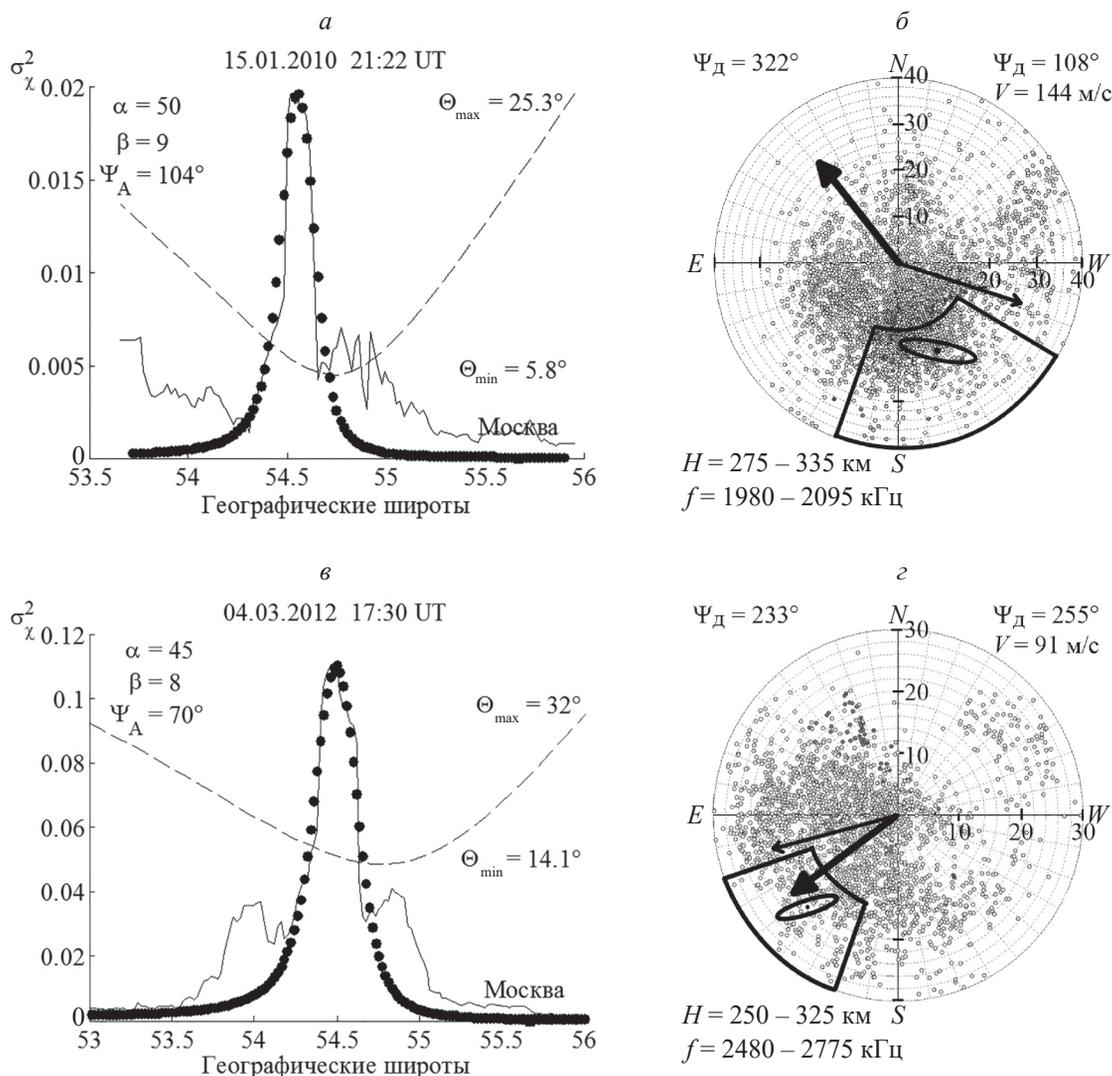


Рис. 1. Примеры определения параметров анизотропии только по одному изолированному максимуму при наличии дополнительных, высота которых близка к фоновому уровню: экспериментальный максимум в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды (сплошная кривая) и его аппроксимация теоретической кривой (кружки) (*а*, *в*); взаимное расположение на карте неба ионосферных отражателей (серые точки) и ориентации поперечной анизотропии Ψ_A (эллипс) (*б*, *г*). Стрелки в центре рисунка — направление дрейфа, рассчитанное по отражателям всей карты неба (толстая стрелка) и по отражателям в локальной области (тонкая стрелка). Границы локальной области обозначены черным цветом.

Основными критериями выбора размеров локальной области с ионосферными отражателями являются наличие в ее пределах достаточного количества отражателей, желательно более 100. Обычно проводится расчет для некоторого числа вариантов, в небольших границах варьируются размеры области. Если при попытке увеличить размеры области (число учитываемых отражателей) начинает существенно меняться определяемое направление дрейфа, то это означает, что нарушается критерий постоянства параметров в исследуемой области, и надо остановиться. Также следует учитывать энергетику отражений и точность определения направления на отражатель. Обычно направление движения в разных вариантах расчетов

отличались мало. Не имея возможности наглядно описать (в силу ограничения по рисункам) влияние изменения размера локальной области, где определялись направления дрейфа в каждом исследуемом случае, рассмотрим два, по сути, крайних случая (см. рис. 1*а*, 1*б* и 1*в*, 1*г*). Остальные случаи являются промежуточными между этими двумя.

На рис. 1*а* и 1*б* на карте неба наблюдается сильная неоднородность поля направления дрейфа в зависимости от полярных углов Θ и ϕ . При ограничении области углами места от $\Theta_{\min} = 15^\circ$ до $\Theta_{\max} = 25^\circ$ и азимутами от $\phi_{\min} = 140^\circ$ до $\phi_{\max} = 170^\circ$ в нее попадут 256 точек (отражателей), а направление дрейфа будет $\Psi_D = 97^\circ$. При расширении области от $\Theta_{\min} = 15^\circ$ до $\Theta_{\max} = 40^\circ$ и азимутами от

$\varphi_{\min} = 120^\circ$ до $\varphi_{\max} = 200^\circ$ в нее попадут 772 точки, а направление дрейфа будет $\Psi_{\text{д}} = 108^\circ$. При увеличении области до $\Theta_{\min} = 15^\circ$, $\Theta_{\max} = 40^\circ$ и $\varphi_{\min} = 100^\circ$, $\varphi_{\max} = 220^\circ$ в нее попадут 959 точек, а направление дрейфа будет $\Psi_{\text{д}} = 128^\circ$. Как видим, направление дрейфа плавно и незначительно меняется, пока учитываются точки вокруг направления на спутник, и лишь при включении в расчет точек вблизи зенита направление резко меняется (на почти перпендикулярное): $\Psi_{\text{д}} = 38^\circ$.

Если взять рис. 1в и 1г, то здесь поле направлений дрейфа довольно однородно и при примерно таких же изменениях размеров области, как в предыдущем случае (вплоть до учета точек вблизи зенита), направление $\Psi_{\text{д}}$ меняется слабо — от 245° до 255° .

Таким образом, даже в неблагоприятных случаях, подобных показанным рис. 1а и 1б, достаточно произвольный разумный выбор размера локальной области не может изменить вывод, лежат ли $\Psi_{\text{А}}$ и $\Psi_{\text{д}}$ близко друг к другу.

Направление и скорость дрейфа, рассчитанные в локальной области программой LocalDrift [16], приведены в правом верхнем углу рисунка. В левом верхнем углу для сравнения приведено направление дрейфа, рассчитанное по отражателям всей карты неба программой DriftExplorer, поставляемой с ионозондом DPS-4. Параметры дрейфа рассчитаны для действующих высот H на частотах f , значения которых приведены в левом нижнем углу рисунка. Стрелки в центре рисунка — направление дрейфа, рассчитанное по отражателям всей карты неба (толстая стрелка) и по отражателям в локальной области (тонкая стрелка). Видно, что направления дрейфа сильно различаются, что было ранее отмечено в [16], поэтому в целях данного исследования мы будем пользоваться программой LocalDrift. Сопоставление пространственно близких экспериментальных данных показало, что в обоих примерах различие $\Delta\Psi$ между $\Psi_{\text{А}}$ и $\Psi_{\text{д}}$ небольшое: в радиосеансе 15 января 2010 г. $\Delta\Psi = -4^\circ$, в радиосеансе 4 марта 2012 г. $\Delta\Psi = -5^\circ$. Можно заключить, что дрейф вытягивает мелкомасштабные неоднородности перпендикулярно магнитному полю. (Заметим: поскольку β — ось, то, при необходимости, к текущему значению $\Psi_{\text{А}}$ можно прибавить 180° , положение теоретического максимума не изменится.)

Очевидно, что предположение о слое, заполненном неоднородностями одинаковой формы с равномерным распределением их внутри слоя, является упрощением и может быть принято в качестве разумного приближения для очень ограниченной области. Если в ионосфере вблизи зенита приемника присутствуют пространственные изменения параметров анизотропии неоднородностей α , β , $\Psi_{\text{А}}$ или пространственные изменения дисперсии флуктуации плотности σ_N^2 (возможно, при одинаковых параметрах анизотропии), то

в поведении дисперсии амплитуды спутникового радиосигнала можно ожидать наличие двух и более максимумов. Анализ амплитудных флуктуаций показал, что за один спутниковый сеанс, действительно, можно наблюдать несколько максимумов. Однако второй и другие максимумы, как правило, были намного меньше, чем основной, и их не принимали во внимание. Пример этого мы рассмотрели на рис. 1а и 1в. В графике дисперсии σ_{χ}^2 на рис. 1а справа от высокого максимума наблюдается другой максимум с границами между 54.7° с.ш. и 55.3° с.ш. Максимум имеет “изрезанную” форму и близок к фоновому уровню, поэтому его невозможно аппроксимировать. В графике дисперсии σ_{χ}^2 на рис. 1в справа и слева от высокого максимума наблюдаются два меньших максимума, но их также затруднительно аппроксимировать, поскольку они не являются изолированными. Очевидно, что в обоих примерах амплитудные флуктуации свидетельствуют о более сложной структуре ионосферных неоднородностей, чем ее описывает аппроксимация только одного максимума. В обоих примерах параметры анизотропии дополнительных маленьких максимумов могут быть недостоверными в случае аппроксимации. Поэтому объяснить каждый случай как единое целое можно только с привлечением дополнительных данных о дрейфе и/или данных о пространственном распределении флуктуаций плотности.

Забегаая вперед, отметим, что пример 4 марта 2012 г. не является уникальным, ниже мы рассмотрим несколько аналогичных случаев. Рассмотрим подробнее пример 15 января 2010 г. Направление дрейфа 15 января 2010 г. в момент наблюдения мелкомасштабных неоднородностей в 21:22 UT было $\Psi_{\text{д}} = 108^\circ$, а до (в 21:03 UT) и после (в 21:33 UT) оно составляло соответственно $\Psi_{\text{д}} = 150^\circ$ и $\Psi_{\text{д}} = 70^\circ$. Величина скорости при этом изменялась мало. При $\Psi_{\text{А}} = 70^\circ$ теоретический максимум охватывает интервал широт, занимаемый “изрезанным” экспериментальным максимумом, т.е. при большей величине этого максимума его аппроксимация была бы возможна и сопоставление с направлением дрейфа показало бы сходство величин $\Psi_{\text{А}}$ и $\Psi_{\text{д}}$. Можно предположить, что в данном спутниковом сеансе зафиксировано начало изменения ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей.

Анализ данных радиопросвечивания за период с мая 2009 г. по март 2012 г. показал, что в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды σ_{χ}^2 кроме единственного максимума также наблюдаются два или три изолированных максимума выше уровня фона в несколько раз. Мы сопоставим одновременные данные радиопросвечивания и радиолокации для понимания влияния предположительно неоднородного дрейфа вблизи геомагнитного зенита приемника на ориентацию поперечной анизотропии. Мы также оценим, может ли

информация о наличии нескольких максимумов в широтном профиле быть использована для дополнения данных ионозонда о направлении дрейфа. При определении параметров анизотропии α , β и Ψ_A мы следуем предположению о равномерном распределении неоднородностей с постоянными параметрами в области, занимаемой максимумом. Дополнительные максимумы возникают либо вследствие пространственного изменения параметров анизотропии неоднородностей, либо вследствие пространственного изменения дисперсии флуктуации плотности. Оба эти фактора могут иметь место и одновременно. Каждый максимум будет аппроксимирован индивидуальной теоретической кривой. Представленные ниже примеры убедительно свидетельствуют о том, что в случае с несколькими максимумами в графике дисперсии σ_χ^2 метод Терещенко и др. [2] дает результаты, согласующиеся с результатами, полученными для

графиков дисперсии σ_χ^2 с единственным максимумом, подразумевающими оправданность исходного допущения.

За наблюдательный период было изучено 68 случаев одновременных данных радиолокации и радиопросвечивания, из которых 58 случаев — с одним максимумом в графике дисперсии σ_χ^2 . Случаев с двумя и тремя максимумами было 10, хотя могло быть больше при достаточной высоте дополнительных максимумов, как показано в примерах на рис. 1а и 1в.

На рис. 2а и 2в приведены два примера аппроксимации трех максимумов, каждый из которых в несколько раз превышает уровень фона. В примере радиосеанса 16 июля 2009 г. при $Kp = 1$ (см. рис. 2а) параметры α и β одинаковы для всех максимумов, их соотношение 5 : 1, означающее, что вдоль траектории нисходящего ИСЗ (с севера на

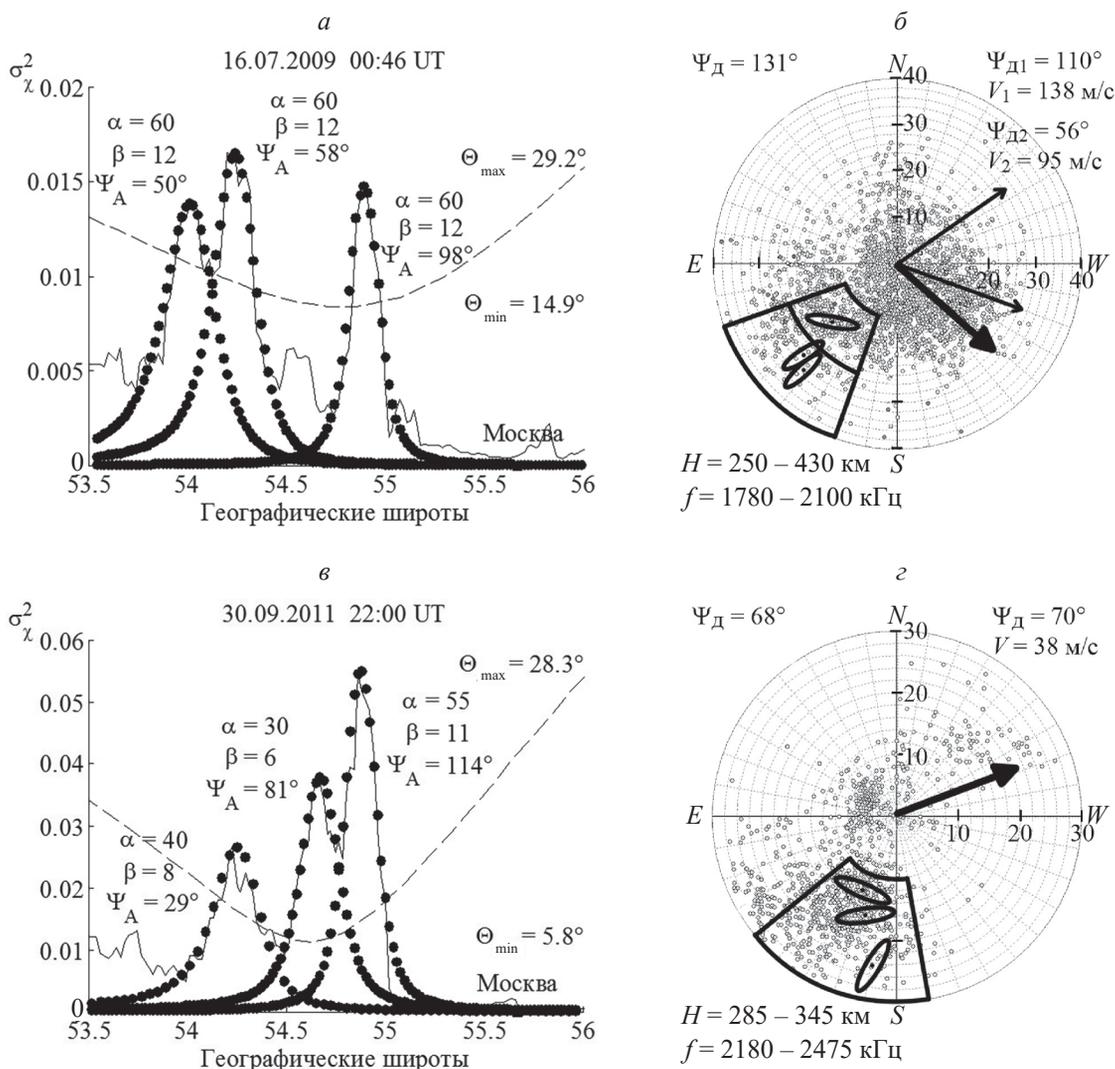


Рис. 2. Примеры определения параметров анизотропии по трем максимумам (а, в) и взаимное расположение на карте неба ионосферных отражателей и Ψ_A в трех областях наблюдения мелкомасштабных неоднородностей (б, з). Условные обозначения те же, что на рис. 1.

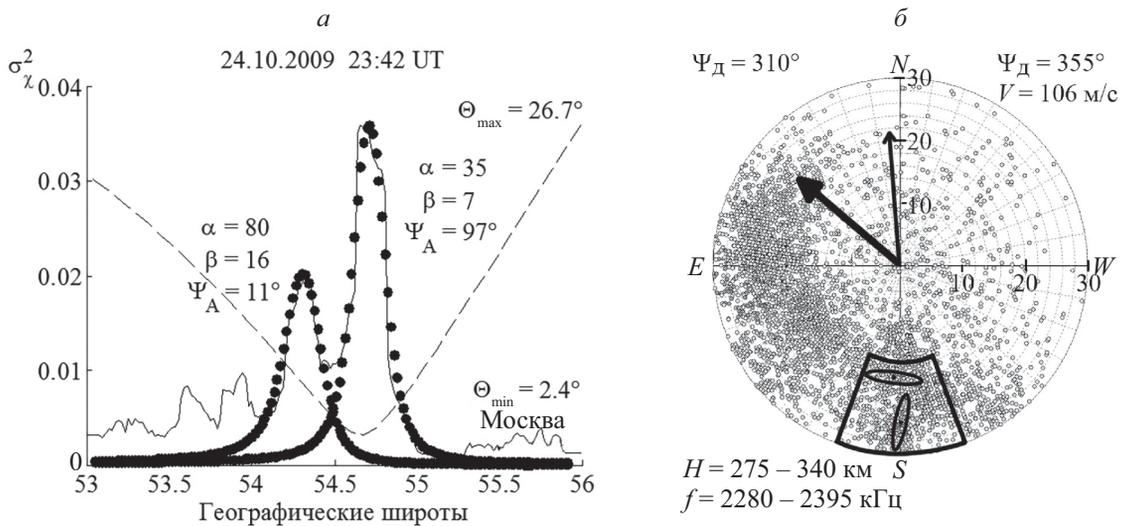


Рис. 3. Пример определения параметров анизотропии по двум максимумам (а) и взаимное расположение на карте неба ионосферных отражателей и Ψ_A в двух областях наблюдения мелкомасштабных неоднородностей (б). Условные обозначения те же, что на рис. 1.

юг) у неоднородностей изменялась только ориентация поперечной анизотропии: $\Psi_{A1} = 98^\circ$, $\Psi_{A2} = 58^\circ$ и $\Psi_{A3} = 50^\circ$. Траектория нисходящего ИСЗ системы “Парус” близка к меридиональной, поэтому расстояние между вершинами максимумов вдоль траектории соответствует расстоянию по координатной сетке. Один максимум находится на удалении от двух совмещенных, поэтому направление дрейфа было рассчитано в разных локальных областях ионосферы (рис. 2б): $\Psi_{D1} = 110^\circ$ и $\Psi_{D2} = 56^\circ$. Размеры локальных областей дрейфа здесь и далее определялись по принципу, описанному выше. Сопоставление показывает, что различие между Ψ_A и Ψ_D небольшое: $\Delta\Psi_1 = -12^\circ$, $\Delta\Psi_2 = 2^\circ$ и $\Delta\Psi_3 = -6^\circ$, что можно объяснить большими скоростями дрейфа. На широте 54.5° есть дополнительный незначительный максимум с высотой ~ 0.006 и по этой причине ориентация анизотропии не может быть определена. В примере радиосеанса 30 сентября 2011 г. при $Kr = 3$ (см. рис. 2в) параметры α , β и Ψ_A разные для всех максимумов, означающие, что вдоль траектории ИСЗ у неоднородностей изменялась как форма (т.е. α и β), так и ориентация поперечной анизотропии: $\Psi_{A1} = 29^\circ$, $\Psi_{A2} = 81^\circ$ и $\Psi_{A3} = 114^\circ$. Заметим, что соотношение $\alpha : \beta$ для всех максимумов сохраняется, составляя 5 : 1. Расчет дрейфа (рис. 2г) в локальной области показал, что его направление везде постоянно $\Psi_D = 70^\circ$ и соответствует направлению, рассчитанному по всей карте неба $\Psi_D = 68^\circ$, поэтому на рисунке эти векторы совпадают. Сопоставление показало, что различие между Ψ_A и Ψ_D небольшое только для центрального максимума: $\Delta\Psi_1 = -41^\circ$, $\Delta\Psi_2 = 11^\circ$ и $\Delta\Psi_3 = 44^\circ$. Анализ широтного профиля дисперсии σ_χ^2 может частично устранить противоречие между экспериментальными данными. Во-первых, максимум с вершиной на широте 54.2° находится на периферии карты неба

с малым количеством точек отражения. Это могло привести к увеличению ошибки при расчете дрейфа, поскольку расчет тем точнее, чем больше ионосферных отражателей принято во внимание. Во-вторых, два других максимума можно формально аппроксимировать единой теоретической кривой, предварительно усреднив экспериментальную кривую дисперсии σ_χ^2 так, чтобы два совместных максимума слились в один. Новое значение Ψ_A тогда составит $\Psi_A = 98^\circ$, уменьшая отличие от направления дрейфа до величины $\Delta\Psi = 28^\circ$. Однако для усреднения пришлось бы использовать больший временной интервал (16 с) вместо обычного (8–12 с) и сама процедура аппроксимации подразумевает постоянство параметров в области, ограниченной максимумом, а в данном случае форма кривой дисперсии σ_χ^2 свидетельствует об обратном. Возможно, большие величины $\Delta\Psi$ связаны с положением мелкомасштабных неоднородностей выше максимума F-слоя, где направление дрейфа не может быть определено ионозондом в силу его технических ограничений. Это предположение мы планируем исследовать в будущем с привлечением дополнительных данных.

На рис. 3а приведен пример аппроксимации двух максимумов, а на рис. 3б показано их сопоставление с дрейфом 24 октября 2009 г. при $Kr = 3$. Этот случай показывает, что не всегда ориентация поперечной анизотропии соответствовала направлению дрейфа. Расчет дрейфа в локальной области показал, что его направление меняется слабо в разных участках этой области при расчетах дрейфа для каждого максимума. Величина скорости дрейфа сохраняется большой, также велико количество ионосферных отражателей, что позволяет доверять полученному результату. Однако

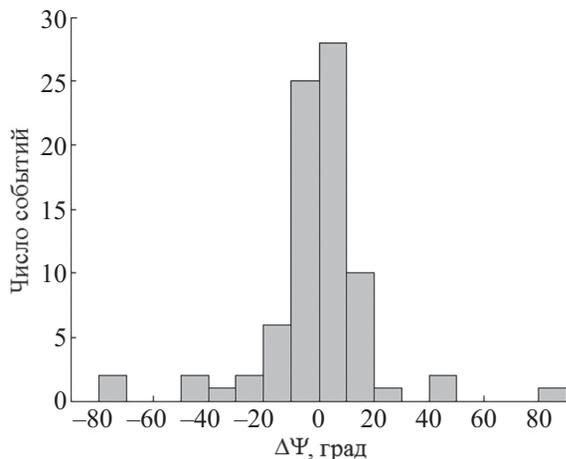


Рис. 4. Гистограмма различий между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением дрейфа Ψ_D для 80 случаев сопоставления этих экспериментальных данных.

несмотря на имеющееся согласие с дрейфом для меньшего максимума ($\Delta\Psi_1 = 16^\circ$) наблюдается полная противоположность дрейфу ($\Delta\Psi_2 = -78^\circ$) для большего максимума. Этот случай мы планируем исследовать в будущем.

После того как была достигнута уверенность в том, что наблюдаемые два или три максимума в широтном профиле дисперсии σ_χ^2 отражают изменение направления дрейфа среднemasштабных неоднородностей в F-области, различия $\Delta\Psi$ были систематизированы за весь период наблюдений. Результат приведен на рис. 4. Общее количество максимумов дисперсии уровня амплитуды, сопоставленных с данными по дрейфу, составило 80. Это количество состоит из 58 случаев с одним максимумом, 8 случаев с двумя максимумами и 2 случаев с тремя максимумами. Гистограмма показывает различие $\Delta\Psi$ между ориентацией поперечной анизотропии Ψ_A и направлением дрейфа Ψ_D в каждом конкретном случае. Значения $\Delta\Psi$ сгруппированы по интервалам с шагом 10° . Ось абсцисс — величина $\Delta\Psi$, ось ординат — количество случаев, значения $\Delta\Psi$ которых находятся в данном интервале. Положительные значения гистограммы показывают, что величина Ψ_A больше величины Ψ_D . Отрицательные значения показывают обратное. Очевидно, что для наибольшего числа событий величина $\Delta\Psi$ имеет значения, не превышающие 20° . Единая гистограмма для всех случаев сопоставления экспериментальных данных сделана не только с целью показать их сходство в большинстве случаев, но и наглядно систематизировать случаи большого различия между данными с целью проанализировать их в будущем. Например, исследовать влияние ветра, как это было сделано в [17].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Методом радиопросвечивания исследована ориентация поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы в период с мая 2009 г. по март 2012 г. Обнаружено, что за один радиосеанс в широтном профиле дисперсии логарифма относительной амплитуды радиосигнала ИСЗ, принятого станцией “Москва”, можно наблюдать как единственный максимум, так и два или три максимума. Следовательно, за один радиосеанс было определено как единичное значение ориентации поперечной анизотропии, так и два или три в различных участках ионосферы (вдоль траектории ИСЗ), занимаемых максимумами. Детальный анализ направления дрейфа среднemasштабных неоднородностей показал, что максимумы дисперсии расположены в областях с различным направлением дрейфа. Скорость и направление дрейфа рассчитывались программой LocalDrift по данным ионозонда DPS-4. В результате 80 численных сопоставлений между ориентацией поперечной анизотропии и направлением дрейфа было обнаружено, что различие между ними невелико, в основном в пределах $[-20; +20]$. Сопоставление проводилось в преимущественно спокойных геомагнитных условиях ($Kp \leq 3+$). Наблюдаемое сходство между экспериментальными данными позволяет заключить, что дрейф в F-области среднеширотной ионосферы оказывает влияние на поперечную анизотропию мелкомасштабных неоднородностей.

Исследование Г. А. Жбанкова проводилось при финансовой поддержке от Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (государственное задание Г30110/23-10-ИФ).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Aarons J.* // Proc. IEEE. 1982. V. 70. P. 360.
2. *Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O., Nygren T.* // Ann. Geophys. 1999. V. 17. No. 4. P. 508.
3. *Kunitsyn V.E., Tereshchenko E.D.* Ionospheric tomography. Springer, 2003. 260 p.
4. *Куницын В.Е., Терещенко Е.Д., Андреева Е.С.* Радиотомография ионосферы. М.: Физматлит, 2007. 336 с.
5. *Tereshchenko E.D., Khudukon B.Z., Kozlova M.O. et al.* // Ann. Geophys. 2000. V. 18. No. 8. P. 918.
6. *Терещенко Е.Д., Романова Н.Ю., Кустов А.В.* // Геомагн. и аэроном. 2004. Т. 44. № 4. С. 487; *Tereshchenko E.D., Romanova N.Yu., Kustov A.V.* // Geomagn. Aeronomy. 2004. V. 44. No. 4. P. 447.
7. *Tereshchenko E.D., Romanova N.Yu., Koustov A.V.* // Ann. Geophys. 2008. V. 26. P. 1725.

8. Романова Н.Ю. // Геомагн. и аэроном. 2017. Т. 57. № 4. С. 463; Romanova N.Yu. // Geomagn. Aeronomy. 2017. V. 57. No. 4. P. 426.
9. Drob D.P., Emmert J.T., Crowley G. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2008. V. 113. No. A12. Art. No. A013668.
10. Emmert J.T., Drob D.P., Shepherd G.G. et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2008. V. 113. Art. No. A013541.
11. Терещенко Е.Д., Юрик Р.Ю., Григорьев В.Ф., Романова Н.Ю. // Гелиогеофизические исследования в Арктике. 2016. С. 129.
12. Романова Н.Ю., Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А. // Изв. РАН. Сер. физ. 2022. Т. 86. № 3. С. 393; Romanova N.Yu., Telegin V.A., Panchenko V.A., Zhbakov G.A. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2022. V. 86. No. 3. P. 316.
13. Романова Н.Ю., Телегин В.А., Панченко В.А., Жбанков Г.А. // Геомагн. и аэроном. 2022. Т. 62. № 2. С. 211; Romanova N.Yu., Telegin V.A., Panchenko V.A., Zhbakov G.A. // Geomagn. Aeronomy. 2022. V. 62. No. 1-2. P. 239.
14. Рытов С.М., Кравцов Ю.А., Татарский В.И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2. Случайные поля. М.: Наука, 1978. 464 с.
15. Tereshchenko E.D., Kozlova M.O., Kunitsyn V.E., Andreeva E.S. // Radio Sci. 2004. V. 39. Art. No. RS1S35.
16. Zhbakov G.A., Telegin V.A., Panchenko V.A., Maltseva O.A. // Proc. RSEMW-2021 (Divnomorskoe, 2021). P. 337.
17. Романова Н.Ю. // Изв. РАН. Сер. физ. 2021. Т. 85. № 3. С. 410; Romanova N.Y. // Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 2021. V. 85. No. 3. P. 298.

Local variations of the cross-field transversal anisotropy orientation and drift direction in the F-region of the mid-latitude ionosphere

N. Yu. Romanova^{1,*}, V. A. Telegin², V. A. Panchenko², G. A. Zhbakov³

¹*Polar Geophysical Institute, Murmansk, 183010 Russia*

²*Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation of the Russian Academy of Sciences, Moscow, 108840 Russia*

³*Institute for Physics Southern Federal University, Rostov-on-Don, 344090 Russia*

*e-mail: romanova@pgi.ru

Analysis of fluctuations of the satellite radio-signals scattered on small-scale irregularities in F-region of the ionosphere and obtained recorded by a terrestrial ground-based receiver in Moscow showed has shown that often two or three maxima are present in the latitudinal profile of amplitude dispersion variance. The orientation of the cross-field transverse or transversal anisotropy of the irregularities was determined and compared with the drift direction obtained by the ionosonde DPS-4 using the LocalDrift program.

Keywords: mid-latitude ionosphere, ionosonde, drift, small-scale irregularities, transversal anisotropy orientation