ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4

ORIGINAL ARTICLE

Радиолокация и радионавигация
Radiolocation and Radio Navigation

УДК 621.396.6+551.510.535+550.388.2 https://doi.org/10.32603/1993-8985-2019-22-4-53-65

Связь ориентации поперечных осей мелкомасштабных анизотропных неоднородностей среднеширотной ионосферы с направлением дрейфа на высотах F-области

В. А. Панченко [1]✉, В. А. Телегин[1], Н. Ю. Романова[2]

[1]Институт земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн им. Н. В. Пушкова РАН
Калужское шоссе, д. 4, Москва, г. Троицк, 108840, Россия

[2]Полярный геофизический институт
ул. Халтурина, д. 15, Мурманск, 183010, Россия

✉ *panch@izmiran.ru*

Аннотация

Введение. Ранее было установлено, что в полярной ионосфере мелкомасштабные неоднородности (МН), вытянутые вдоль магнитного поля, анизотропны в поперечном к магнитному полю направлении. При этом бóльшая из поперечных осей МН имеет тенденцию ориентироваться вдоль направления дрейфа МН. Косвенно это подтверждалось и для ионосферы средних широт, однако прямые сопоставления направления анизотропии МН и направления ионосферного дрейфа для средних широт отсутствовали.

Цель работы. Прямое сопоставление экспериментальных данных о форме МН с параметрами движения неоднородностей при измерениях в одном и том же месте (Москва), в одно и то же время. Ранее экспериментально полученные значения ориентации поперечной анизотропии МН в среднеширотной ионосфере сравнивались только с моделью нейтральных ветров.

Материалы и методы. Для определения параметров анизотропии МН использован томографический подход – обработка радиомерцаний сигналов при пролете ряда навигационных спутников, излучающих частоты 150 и 400 МГц. В рамках модели МН в виде ориентированных по магнитному полю эллипсоидов с тремя разными характерными масштабами размеров вдоль и поперек магнитного поля Земли получены оценки соотношения осей эллипсоидов и ориентации поперечных осей анизотропии. Параметры неоднородностей получены подбором параметров модели, при которых расчетный ход дисперсии логарифма относительной амплитуды сигналов спутников по мере их движения по орбите наиболее близок к экспериментально полученной зависимости.

Оценки скорости и направления дрейфа среднемасштабных неоднородностей (СН) получены по данным ионозонда DPS-4, при радиолокации ионосферы декаметровыми волнами с поверхности земли. Используются так называемые карты неба, отражающие распределение энергии рассеянных радиоволн по углам прихода. Одновременные измерения доплеровских сдвигов частоты и углов прихода на землю рассеянных волн позволяют получить оценки трех компонент скорости дрейфа среднемасштабных неоднородностей.

Результаты. Обнаружено хорошее соответствие между направлением дрейфа среднемасштабных неоднородностей и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей.

Заключение. Обсуждаемая связь ориентации поперечной анизотропии вытянутых неоднородностей и направления их дрейфа может быть полезна в условиях дефицита информации о неоднородной ионосфере.

Ключевые слова: ионосфера, ориентация неоднородностей, дрейф неоднородностей, обратное рассеяние, загоризонтная радиолокация

© Панченко В. А., Телегин В. А., Романова Н. Ю., 2019

Контент доступен по лицензии Creative Commons Attribution 4.0 License
This work is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 License

Известия вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4
Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

Радиолокация и радионавигация
Radiolocation and Radio Navigation

ORIGINAL ARTICLE

Для цитирования: Панченко В. А., Телегин В. А., Романова Н. Ю. Связь ориентации поперечных осей мелкомасштабных анизотропных неоднородностей среднеширотной ионосферы с направлением дрейфа на высотах F-области // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2019. Т. 22, № 4. С. 53–65. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-53-65

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 25.04.2019; принята к публикации после рецензирования 03.06.2019; опубликована онлайн 27.09.2019

Correlation between the Orientation of Cross-Field Axes of Small-Scale Anisotropic Irregularities in Midlatitude Ionosphere and Drift Direction in the F Region

Valery A. Panchenko [1]✉, Viktor A. Telegin [1], Natalia Yu. Romanova [2]

[1]Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism,
Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences
4, Kaluzhskoe Hwy, 108840, Moscow, Troitsk, Russia

[2]Polar Geophysical Institute
15, Khalturina Str., 183010, Murmansk, Russia

✉ *panch@izmiran.ru*

Abstract

Introduction. It was previously reported that small-scale irregularities (SSI) in the polar ionosphere are elongated along the magnetic field and anisotropic in its cross-field direction. At the same time, the largest of the SSI cross-field axes tends to orient along the SSI drift direction. This is also indirectly confirmed for the midlatitude ionosphere, however, direct correlations of the SSI anisotropy and ionospheric drift directions in the middle latitudes are absent.

Objective. The main objective of this work is a direct comparison of the experimental data of SSI shape with motion parameters of irregularities, which are measured at the same place (Moscow) at the same time. Previously, experimentally obtained values of the SSI cross-field anisotropy orientation in the midlatitude ionosphere were compared only with the neutral winds model.

Materials and methods. A tomographic approach is used to determine the SSI anisotropy parameters by processing radio scintillation signals while overfly of several navigation satellites emitting on frequencies of 150 MHz and 400 MHz. Estimations of ratio between the ellipsoids axes and cross-field anisotropy orientations in the framework of SSI model in a form of magnetic field oriented ellipsoids with three different dimensions along and across the Earth's magnetic field are obtained. Irregularities parameters are obtained by selecting the model parameters when the calculated logarithm dispersion of the satellite signals relative amplitude while they orbiting is the closest to the experimentally obtained curve.

Estimations of the velocity and drift direction of medium-scale irregularities (MSI) by using DPS-4 ionosonde data acquired while decameter-wave radar studies of ionosphere from the Earth's surface are obtained. The so-called "sky maps" presenting the energy distribution of scattered radio waves on incident angles are used. Simultaneous measurements of Doppler frequency shifts and incident angles of scattered waves allow obtaining estimations of three components of the medium-scale irregularities drift velocity.

Results. A good correlation between the drift direction of medium-scale irregularities and cross-field anisotropy orientation of small-scale irregularities is found.

Conclusion. The correlation between the cross-field anisotropy orientation of the elongated irregularities and their drift direction can be useful under conditions of the lack of information on ionospheric irregularities.

Key words: ionosphere, cross-field anisotropy orientation, irregularities drift, backscattering, over-the-horizon radar

For citation: Panchenko V. A., Telegin V. A., Romanova N. Yu. Correlation between the Orientation of Cross-Field Axes of Small-Scale Anisotropic Irregularities in Midlatitude Ionosphere and Drift Direction in the F Region. Journal of the Russian Universities. Radioelectronics. 2019, vol. 22, no. 4, pp. 53–65. doi: 10.32603/1993-8985-2019-22-4-53-65

Conflict of interest. The authors declare no conflict of interest.

Submitted 25.04.2019; accepted 03.06.2019; published online 27.09.2019

Введение. Все методы и устройства дистанционного, бесконтактного контроля объектов используют волны в той или иной среде: акустические волны в гидролокации или звуковой пеленгации артиллерийских систем, акустические продольные и поперечные волны в толще Земли при регистрации сейсмических событий, электромагнитные волны оптического диапазона при лидарных измерениях, электромагнитные волны радиодиапазона $(10^5 \ldots 10^{12}$ Гц$)$ при радиолокации или местоопределении объектов. Во всех случаях ценность получаемой информации зависит от правильного задания законов распространения волн, свойств сигналов, априорных свойств объектов и, что очень важно, максимально полного учета характеристик среды распространения используемых сигналов. Для разных сред это различные характеристики, но общим является то, что эти параметры определяют коэффициент преломления используемых волн. Если в гидролокации важны распределения плотности и солености воды, распределение температуры, то при электромагнитном зондировании – распределение диэлектрической проницаемости среды.

Интерпретация результатов измерения характеристик контролируемого объекта может быть улучшена прямым измерением характеристик среды, например, использованием дополнительных каналов или систем в радиолокаторах для определения помех из-за рассеяния в среде распространения сигнала или применением многочастотных систем в системах спутниковой навигации. В ряде случаев такие реальные измерения малоэффективны, затруднительны или невозможны. В этих условиях важно выбрать модель среды, правильно описывающей основные свойства показателя преломления. Такие модели создаются для каждой из сред и должны включать в себя детерминированную часть, описывающую поведение усредненных параметров в пространстве и времени и случайную изменчивость во времени и в пространстве (неоднородности среды).

Областью интересов авторов настоящей статьи является распространение радиоволн в ионосфере, являющейся электропроводящей средой, где диэлектрическая проницаемость определяется плотностью электронного содержания в слабоионизированной плазме. Для ионосферы накоплен и систематизирован большой объем феноменологических данных [1, 2], построены и постоянно улучшаются модели регулярной структуры ионосферы, т. е. распределения ионизации в зависимости от географических координат региона, времени года и суток, усредненных индексов солнечной активности и текущей магнитной активности [3, 4] и даже лунных приливов. Предпринимаются усилия для построения распределения в пространстве и времени ионосферных неоднородностей (ИН) [5, 6], ответственных за поведение сигналов систем связи, местоопределения и радиолокации (замирания, искажения формы, расплывания по времени, искажения спектра принимаемых сигналов), свойства которых необходимо знать и учитывать в задачах радиолокации, в построении и функционировании систем местоопределения (GPS, GLONASS, Galileo и т. д.). Ухудшение точности определения координат таких систем и даже грубые сбои во время сильных ионосферных возмущений хорошо известны [7]. В задачах загоризонтной радиолокации обратное рассеяние от ИН является одним из главных источников помех, поэтому для обеспечения правильного проектирования и функционирования загоризонтной радиолокационной системы и систем связи полезны любые феноменологические данные или априорные сведения об ионосферных неоднородностях.

В настоящей статье параметры рассеивающих неоднородностей определяются исходя из представлений об ионосфере как о плоскослоистой среде, показатель преломления n которой зависит от высоты z и частоты радиоволны ω, в которую добавлены (погружены) неоднородности различных пространственных и временны́х масштабов.

В ионосфере без неоднородностей при зондировании с поверхности Земли радиоволны частоты ниже некоторой критической ω_0 испытывают полное внутреннее отражение в области, где показатель преломления $n(z, \omega)$, уменьшаясь с высотой, обращается в ноль [2]. Для плоскослоистой модели ионосферы без неоднородностей поверхности $n(z, \omega) = 0$ идут параллельно друг другу. При моностатическом зондировании ионосферы на фиксированной частоте $\omega \le \omega_0$ область отражения единственная, и волна возвращается на землю вертикально, из зенита. При добавлении в плоскослоистую ионосферу неоднородностей различного масштаба поверхности равной электронной концентрации уже не параллельны друг другу (рис. 1). Условием возвращения энергии зондирующей волны в точку излучения теперь является локальная перпендикулярность луча к поверхности отражения на участках поверхности, где $n(x, y, z, \omega) = 0$. Энергия отраженной радиоволны теперь поступает не из одной точки (зенита), а распределена в некотором конусе углов прихода из-за рассеяния на неоднородностях различных пространственных и временны́х масштабов.

Для процессов рассеяния имеет значение форма неоднородностей. Так называемые перемещающиеся волнообразные ионосферные возмущения с характерными пространственными масштабами $10^2 \ldots 10^3$ км, являющиеся причиной хорошо известных квазипериодических вариаций критических частот и высоты ионосферных слоев F1 и F2 с периодами от 5 мин до 2 ч, имеют произвольную форму. В то же время наблюдаемые сигналы обратного рассеяния говорят о присутствии неоднородностей масштаба $10^{-1} \ldots 10^3$ м [8] – так называемых мелкомасштабных неоднородностей (МН), сильно вытянутых вдоль магнитного поля (рис. 2). Схематично модель ионосферы с неоднородностями разных масштабов представлена на рис. 1.

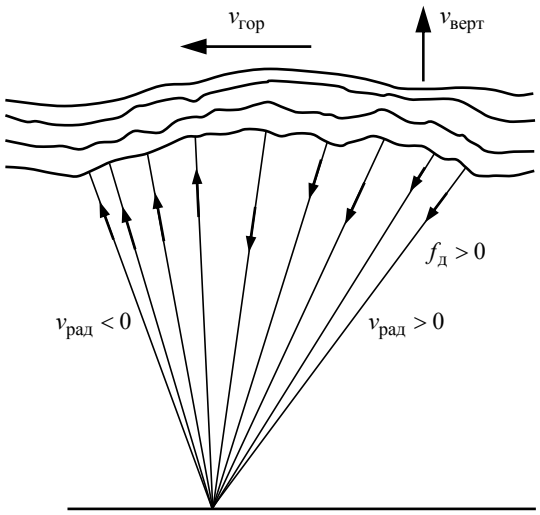
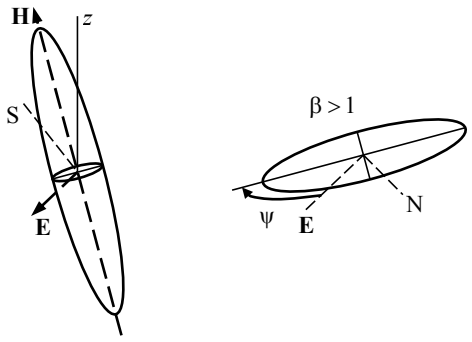


Рис. 1. Модель ионосферы с неоднородностями различных масштабов

Fig. 1. Ionosphere model with different scale irregularities

Случайные МН обычно описываются корреляционной функцией в виде эллипсоида, у которого главная, наибольшая ось направлена вдоль магнитного поля Земли (рис. 2, *а*). Такая вытянутость обусловлена тем, что коэффициенты диффузии электронов и ионов вдоль и поперек магнитного поля сильно различаются. Экспериментальные оценки отношения осей эллипсоида (степень вытянутости) сильно колеблются от $3 \ldots 4$ в [8], до нескольких сотен [9]. Часто считается, что МН можно представить в виде эллипсоидов вращения, однако исследования разных лет показывают, что это не всегда допустимо [10, 11], и далее МН рассмотрены поперечно-анизотропными, т. е. равенство поперечных осей эллипсоидов не предполагается (рис. 2, *б*).

Целью настоящей статьи является неочевидное сопоставление формы ионосферных неоднородностей с параметрами их движения, а именно ориентации поперечной анизотропии МН ионосферы, с направлением дрейфа среднемасштабных неоднородностей (СН) на высотах F-слоя, экспериментально измеренных в одно и то же время, в одном и том же месте (Москва). Под МН подразумеваются



а *б*

Рис. 2. Корреляционная функция мелкомасштабных неоднородностей

Fig. 2. Correlation function of small-scale inhomogeneities: *а* – correlation function; *б* – cross-section

неоднородности с размерами 0.1…3 км, под СН – неоднородности с размерами 5…50 км. При этом использованы существенно разные методы измерений параметров МН и СН. Форма и ориентация МН определялись по томографической методике [10] путем приема на поверхности Земли сигналов низколетящих навигационных спутников. Параметры дрейфа СН измерялись путем зондирования ионосферы с поверхности Земли с использованием ионозонда DPS-4 [12–15].

Томографический метод определения ориентации поперечной анизотропии разработан в [10]. Рассмотрена модель хаотично расположенных МН в виде вытянутых вдоль магнитного поля эллипсоидов. Считается, что их форма и местоположение неизменны за время измерения. Лучевые траектории от пролетающего искусственного спутника Земли (ИСЗ) до наземного приемника пересекают область, содержащую МН. В предположении слабых неоднородностей и отсутствия рассеяния назад с помощью приближения Рытова [16] получены выражения для дисперсии логарифма относительной амлитуды сигнала ИСЗ $\chi = \ln(A/A_0)$, где A – флуктуирующая амплитуда сигнала в присутствии неоднородностей; A_0 – амплитуда нефлуктуирующего сигнала в среде без неоднородностей и способ экспериментальной оценки χ. В выражение для χ в [10] входят вытянутость неоднородностей вдоль магнитного поля α, вытянутость неоднородностей перпендикулярно магнитному полю β (бóльшая из поперечных осей эллипсоида) и угол ψ этой оси с направлением на восток (см. рис. 2). При этом $\alpha > \beta > 1$. Угол ψ называется ориентацией поперечной анизотропии. Определение параметров анизотропных МИ α, β и ψ возможно в результате обработки амплитуды сигналов пролетных ИСЗ.

Моделирование показывает [10], что параметры анизотропии существенно влияют на изменение дисперсии логарифма относительной амплитуды сигнала (χ) по мере прохождения спутника вблизи магнитного зенита. Напротив, высота расположения слоя с неоднородностями, его толщина и степень спадания пространственного спектра неоднородностей влияют на χ не очень существенно. Подробности методики обработки экспериментального материала, дополнительные предположения о параметрах неоднородностей и высоте их расположения представлены в [10].

На практике применяется следующий порядок действий. При нахождении спутника в зоне радиовидимости наземным приемником записывается радиосигнал на частоте 150 МГц, который искажается при прохождении через F-слой ионосферы, содержащий МН. На основе соотношений из [10] по экспериментальным данным рассчитываются значения дисперсии $\sigma^2(\chi)$ в зависимости от положения спутника. При пересечении лучом "спутник–приемник" области с МН может наблюдаться повышенная изменчивость амплитуды принимаемой радиоволны из-за рассеяния, приводящая к росту $\sigma^2(\chi)$ (рис. 3, кривая *1*) и к образованию максимума, пространственно охватывающего область с неоднородностями. Если значение в максимуме в несколько раз превышает уровень фона, можно определить пространственные параметры неоднородностей α, β и ψ. Для этого нужно построить аппроксимацию экспериментальной зависимости (рис. 3, кривая *2*) по соотношениям из [10]. Аппроксимация происходит путем подбора числовых значений α, β и ψ. В [10] показано, что ширина теоретического максимума зависит в основном от величин α и β. Пространственное положение теоретического максимума существенно зависит от величины ψ и в большинстве случаев определяется с точностью 2...3°.

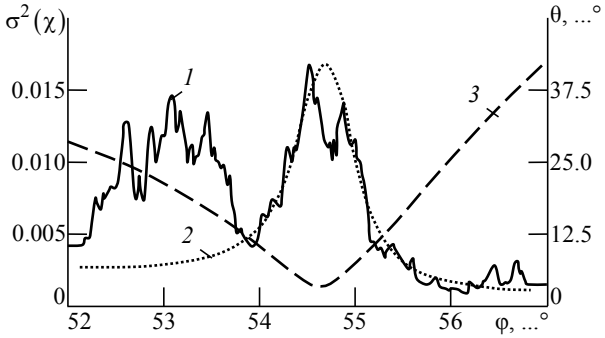


Рис. 3. Зависимость дисперсии логарифма относительной амплитуды сигнала и угла между вектором магнитного поля и направлением на спутник от географической широты спутника (Москва, 11.01.2014 00:25 UT)

Fig. 3. The dependence between the logarithm dispersion of signal relative amplitude and angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude (Moscow, 11.01.2014 00:25 UT):
1 – experiment; *2* – simulation;
3 – angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude

Представленные в настоящей статье измерения проведены в Москве. Угол между направлением в зенит и вектором магнитного поля составлял 14°.

Поскольку траектория спутника и карты обычно даны в географических координатах, то вместо угла ψ в магнитных координатах будем использовать угол ψ_a, получаемый проекцией направления ψ на горизонтальную плоскость, но в отличие от [10] будем отсчитывать этот угол стандартно – по часовой стрелке от направления на географический север.

Продемонстрируем метод определения параметров α, β и ψ_a на примере, представленном на рис. 3 (φ – географическая широта спутника). В данном сеансе угол между вектором магнитного поля и направлением на спутник θ сначала спадал от 31 до 3.5º, а затем возрастал до 44.9º (рис. 3, кривая *3*). При этом вблизи магнитного зенита $(\theta_{\min} = 3.5^{\circ})$ на графике $\sigma^2(\chi)$ (кривая *1*) сформировался пик шириной около 1º. Моделирование (кривая *2*) показало, что наилучшее согласие получается при параметрах $\alpha = 9$, $\beta = 2$, $\psi_a = 95^{\circ}$. Показательно, что аппроксимация МИ в виде эллипсоидов вращения $(\beta = 1)$ оказалась неудовлетворительной.

Радиолокационный метод оценки дрейфа среднемасштабных неоднородностей. Размещенный в Москве (ИЗМИРАН) ионозонд DPS-4 [12] с аппаратной точки зрения является импульсным доплеровским радиолокатором с применением сверток фазоманипулированных кодовых последовательностей (ФКМ-сигналов). Он имеет фазированную приемную малоэлементную антенную решетку. Ионозонд работает на переменной частоте зондирования в диапазоне 1…40 МГц. Подробности функционирования DPS-4 и способов обработки ионограмм можно найти в [12, 13, 15]. Отметим здесь только самые существенные для исследования неоднородной структуры особенности данного аппарата. При зондировании ионосферы из-за наличия магнитного поля Земли излученная антенной плоскополяризованная волна распадается на две эллиптически поляризованные волны. Это так называемые обыкновенная волна (О-волна) и необыкновенная волна (Х-волна). Они имеют различные показатели преломления и отражаются на разных высотах ионосферы. Обычно антенны ионозонда на земле принимают суперпозицию О- и Х-волн. При анализе поля принимаемых на земле радиоволн для определения характеристик рассеивающих неоднородностей нужно обеспечить прием радиоволн только одной из двух поляризаций (обычно обыкновенной). В DPS-4 эта задача решается применением в качестве приемных антенн скрещенных рамок и совмещенных с ними переключателей поляризации (рис. 4). Поскольку магнитное поле в ионосфере над Москвой отклонено от вертикали на 13…14°, О- и Х-волны поляризованы практически циркулярно, поэтому для подавления нежелательной поляризации в каждой антенне достаточно сложить сигналы рамок, сдвинув один из них по фазе на ±90°. Для улучшения подавления нежелательной поляризации в DPS-4 [12] на передачу также используется антенна циркулярной поляризации (рис. 4), на каждое из скрещенных полотен которой подается сигнал от своего передатчика, причем эти сигналы сдвинуты по фазе относительно друг друга на ±90°.

Основным режимом работы DPS-4 является снятие ионограмм (рис. 5) – измерение зависимости задержки отраженного от ионосферы сигнала (так называемой кажущейся высоты) от зондирующей частоты *f*. Типичная ионограмма в

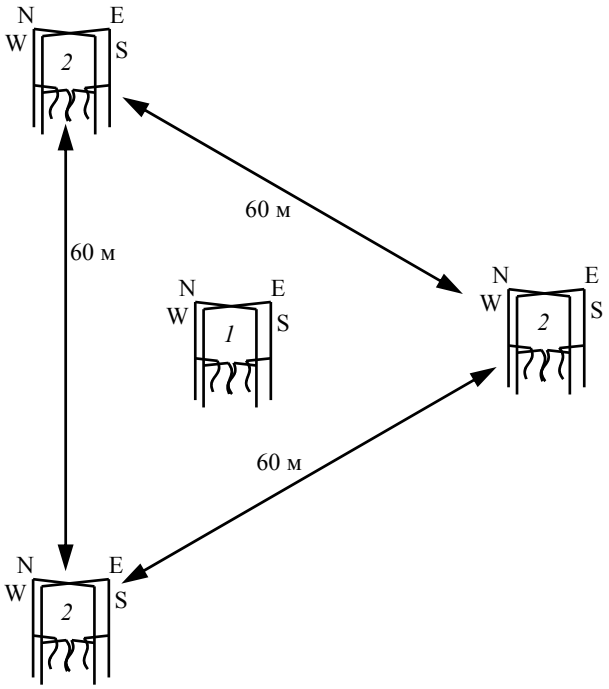


Рис. 4. Приемная антенная система ионозонда DPS-4

Fig. 4. The receiving antenna system of the DPS-4 ionosonde

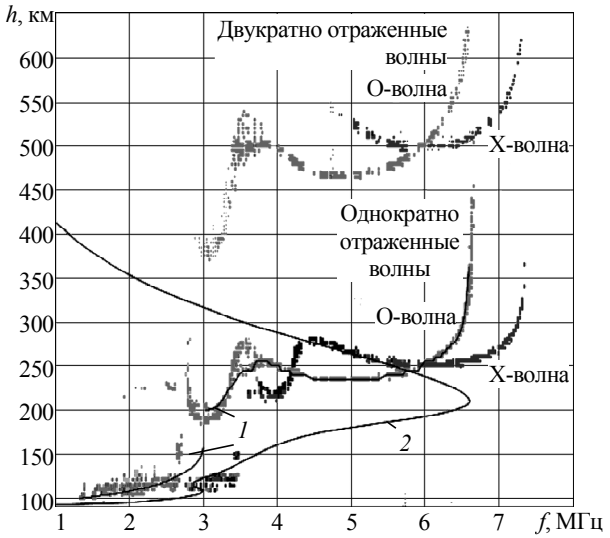


Рис. 5. Ионограмма и рассчитанный профиль электронной концентрации в спокойных ионосферных условиях

Fig. 5. Ionogram and calculated electron concentration profile under calm ionospheric conditions

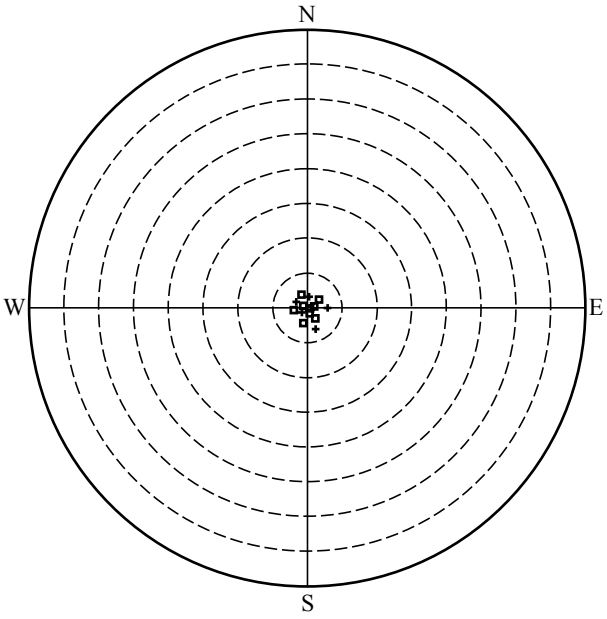


Рис. 6. Карта неба, построенная по данным ионограммы рис. 5

Fig. 6. The skymap constructed from the ionogram data at Fig. 5

спокойных ионосферных условиях приведена на рис. 5. Амплитуда принятого сигнала отображается плотностью почернения меток. Видны четыре ветви сигналов: однократно отраженные О- и Х-сигналы и двукратно отраженные О- и Х-сигналы. В спокойных условиях, когда рассеяние в ионосфере практически отсутствует, ионограммы представляют собой четкие следы, как на рис. 5.

Для расчетов обычно берется сигнал однократно отраженной О-волны, по которому программой построен трек (рис. 5, *1*), который используется для автоматического расчета распределения электронной концентрации по высоте ионосферы (рис. 5, *2*) – профиля электронной концентрации.

Кроме сканирования диапазона частот DPS-4 может работать как классический радиолокатор с доплеровской фильтрацией сигналов и определением углов прихода отраженных от цели (ионосферы) радиосигналов. В этом режиме DPS-4 циклически перебирает несколько фиксированных интервалов частот. Амплитуды и фазы на каждой из четырех антенн (рис. 4), полученные в процессе измерения, сохраняются в файлах специального формата DFT [12]. В результате обработки этих файлов определяются углы прихода каждой из парциальных радиоволн (с разбивкой ячеек по дальности и доплеровскому сдвигу) и строятся так называемые карты неба (КН) (Skymaps), отображающие распределение мощности отраженных от неоднородной ионосферы радиоволн по углам прихода. КН в DPS-4 обычно отображаются в пределах 40° от зенита (внешняя окружность на рис. 6, 8, 10 и 12). На рис. 6 представлена КН, полученная по данным, на основании которых построена ионограмма рис. 5. Как следует из рис. 6, отраженные от ионосферы сигналы приходят из очень узкого конуса углов вблизи зенита (крестовые маркеры – сигналы с положительным доплеровским сдвигом, квадратные – с отрицательным доплеровским смещением). Такое распределение мощности по углам прихода типично для спокойных ионосферных условий, когда отсутствуют ионосферные неоднородности и, соответственно, нет рассеяния на них.

Бóльшую часть времени в среднеширотной ионосфере наблюдается рассеяние зондирующих сигналов в той или иной степени [6]. При этом треки ионограмм расширяются по высоте и частоте и ионограммы приобретают вид, показанный на рис. 7 (часть ионограммы, изображенная сплошной линией, получена в результате прямых измерений; часть, изображенная штриховой линией, – компьютерным моделированием). В данном случае конус, из которого на землю приходят рассеянные радиоволны расширяется, а его центр может существенно отклоняться от зенита (рис. 8). Причем области максимальной локализации волн

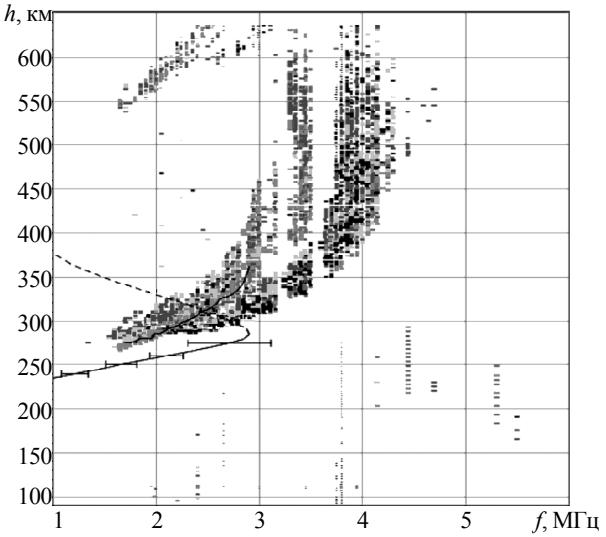


Рис. 7. Ионограмма при рассеянии на ионосферных неоднородностях (Москва, 11.01.2014 00:25 UT)

Fig. 7. Ionogram showing scattering on ionospheric irregularities (Moscow, 11.01.2014 00:25 UT)

с положительным (крестовые маркеры, зона выделена сплошной линией) и отрицательным доплеровским сдвигом (квадратные маркеры, зона выделена штриховой линией) могут различаться. Измерив углы прихода и соответствующие доплеровские сдвиги для каждого отражателя (СН ионосферы) при не менее трех отражателях, можно выполнить следующие процедуры.

Предположив, что три выбранных отражателя имеют один и тот же вектор скорости, можно записать систему уравнений и найти все три компоненты этого вектора [11, 13, 15]. Перебрав различные тройки отражателей, можно получить массив векторов и оценить среднее значение и дисперсию скоростей. Процедуру усреднения можно провести с учетом весовых коэффициентов, отражающих относительную мощность различных парциальных волн.

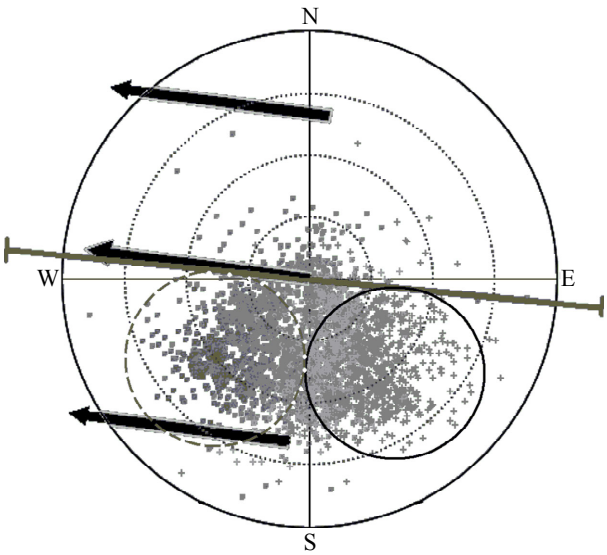


Рис. 8. Карта неба при ионосферном рассеянии (Москва, 11.01.2014 00:25 UT) (см. рис. 7)

Fig. 8. Skymap under conditions of ionospheric scattering (Moscow, 11.01.2014 00:25 UT) (see Fig. 7)

Алгоритм, аналогичный описанному, использован в поставляемом комплекте математического обеспечения ионозонда DPS-4. В стандартном режиме после снятия ионограммы автоматически выбираются четыре фиксированные частоты, на которых проводится зондирование. Далее строятся КН и определяются три компоненты скорости неоднородностей. Полученные значения выводятся и фиксируются в массиве с построением суточных графиков.

Рис. 8 представляет собой автоматически сформированное DPS-4 изображение (несколько упрощенное). Оригинальные цветные изображения ионограмм и КН можно найти в [14]. КН на рис. 8 соответствует ионограмме на рис. 7. Стрелки на рис. 8 показывают направление дрейфа, усредненное по всем отражателям на данном рисунке. Горизонтальное движение неоднородностей происходит в направлении от области с преимущественно положительными сдвигами доплеровской частоты в сторону области с преимущественно отрицательными сдвигами (см. стрелки $v_{\text{верт}}$ на рис. 1 и рис. 8).

Точность измерения скоростей зависит от интенсивности рассеяния. В дневные часы, когда ионосферное рассеяние меньше (меньше неоднородностей на КН и узок занимаемый ими конус вокруг зенита), точность измерения скоростей часто неудовлетворительна. В ночных условиях, когда неоднородностей на КН сотни или тысячи, точность измерения скоростей выше, а оценка дисперсии скоростей, определяющая точность измерений достаточно корректна. Удовлетворительными можно считать измерения, где средние значения скоростей в 3–5 раз превышают среднеквадратические отклонения.

Именно измерения в темное время суток использованы в представленных далее результатах для сравнений.

Результаты экспериментов. Ранее амплитудный томографический метод был успешно применен в ряде работ [10, 17–20]. Использовалась система российских навигационных спутни-

ков, работающих на частотах 150 и 400 МГц, с почти круговыми орбитами высотой около 1000 км. Было показано, что в полярной шапке и авроральной зоне ориентация поперечной анизотропии ψ_a коррелирует с направлением дрейфа плазмы $\psi_{др}$, определенным по данным радаров некогерентного рассеяния и системы SuperDARN. Вытянутость высокоширотных неоднородностей вдоль геомагнитного поля (ось α) меняется от 10 до 100…150, а вытянутость перпендикулярно геомагнитному полю (ось β) – от 3 до 30…40, т. е. неоднородности поперечно-анизотропны. Исследование среднеширотных неоднородностей показало, что они также вытянуты преимущественно вдоль геомагнитного поля, в некотором направлении перпендикулярно ему, и параметры α и β численно схожи с параметрами высокоширотных неоднородностей [21], а ориентация их поперечной анизотропии ψ_a различна при различных геофизических условиях [21].

Из-за отсутствия радаров некогерентного рассеяния или радаров SuperDARN в европейской части России не имелось данных о дрейфе плазмы в среднеширотной ионосфере, а ориентация ψ_a для средних широт ранее сравнивалась только с моделью нейтральных ветров [21]. Сравним ориентацию ψ_a с экспериментальными данными о дрейфе плазмы, полученными радиолокационным методом в регионе Москвы, в одни и те же моменты времени.

Для сравнения были выбраны сеансы, когда по данным приемного пункта в Москве были успешно определены ориентации ψ_a МН. Из всего массива данных об амплитуде сигналов ИСЗ это удалось сделать только примерно в 3 %, так как критерий применимости метода состоит, во-первых, в наличии максимума в графике дисперсии логарифма относительной амплитуды, и, во-вторых, этот максимум не должен превышать значения 0.3, поскольку расчеты теоретической модели рассеивающих неоднородностей сделаны в рамках приближения Рытова [16]. Для января 2014 г. таких успешных сеансов оказалось три: 11 января в 00:25 UT (рис. 3, 7, 8), 15 января в 16:46 UT (рис. 9, 10) и 26 января в 02:18 UT (рис. 11, 12). Именно результаты измерений в этих сеансах сравнивались с оценками скорости и направления дрейфа плазмы, автоматически полученными радиолокационным методом на размещенном в ИЗМИРАН ионозонде DPS-4 при обычном зондировании в 15-минутном режиме. Для сравнения с направлениями ориентации ψ_a из архива были извлечены наиболее близкие к указанным моментам КН в географических координатах. На рис. 8 представлены данные для 00:19 UT 11 января 2014 г. Направление дрейфа СН $\psi_{др} = 278^\circ$ показано стрелками. Поскольку ориентация ψ_a симметрична повороту на 180º, на рис. 8 ориентация МН показана отрезком $\psi_a = 95^\circ \equiv 275^\circ$. В сеансе 16:46 UT 15 января получено $\alpha = 30$, $\beta = 7$, $\psi_a = 50^\circ \equiv 230^\circ$ и $\psi_{др} = 235^\circ$ (рис. 9, 10).

На КН для 11 (рис. 8) и 15 (рис. 10) января наблюдается хорошее согласие между ориентацией поперечной анизотропии ψ_a и измеренным практически в это же время направлением дрейфа СН $\psi_{др}$.

Однако случай 26 января демонстрирует несколько иную ситуацию. Сначала для расчета $\psi_{др}$ была использована вся КН (рис. 11), как и в случаях 11 и 15 января. Расчет делался автоматически программой DriftExplorer, поставляемой с DPS-4. Было получено значение $\psi_{др} = 320^\circ$ (стрелки на рис. 12). В то же время значение ориентации поперечной анизотропии в этом сеансе $\psi_a = 85^\circ \equiv 265^\circ$ (рис. 11, а также отрезок на рис. 12). Это расхождение потребовало дополнительного рассмотрения.

В результате Г. Н. Жбанковым была разработана программа определения направления дрейфа по КН, аналогичная программе DriftExplorer, но более гибкая в управлении. При обработке всей КН рис. 10 она дала то же значение ориентации $\psi_{др} = 320^\circ$. Однако при ограничении области принимаемых к расчету отражений на рис. 10 окрестностью направления на область, где наблюдается максимум флуктуаций амплитуды, получено существенно лучшее согласие измеренных направлений ψ_a и $\psi_{др}$. Этот факт объясняется тем, что теперь направление дрейфа было определено в ограниченной области, максимально близкой к пространственному положению МН [22].

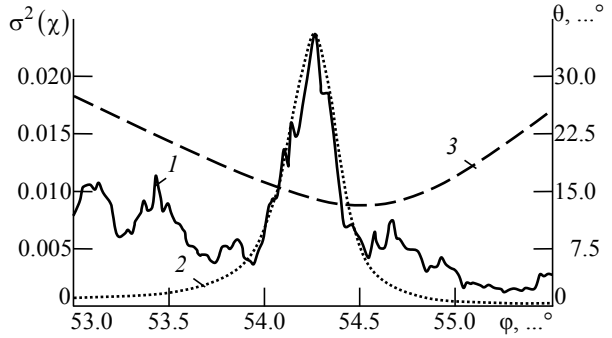


Рис. 9. Зависимость дисперсии логарифма относительной амплитуды сигнала и угла между вектором магнитного поля и направлением на спутник от географической широты спутника (Москва, 15.01.2014 16:46 UT)

Fig. 9. The dependence between the logarithm dispersion of signal relative amplitude and angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude (Moscow, 15.01.2014 16:46 UT):
1 – experiment; *2* – simulation;
3 – angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude

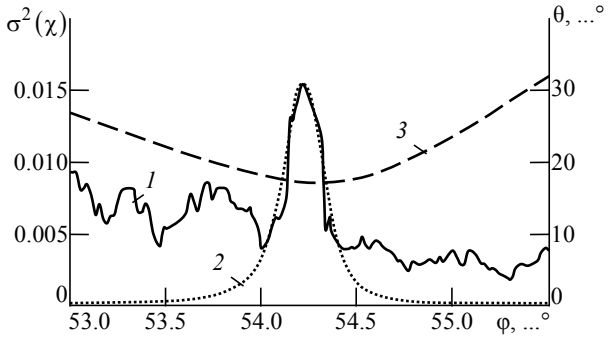


Рис. 11. Зависимость дисперсии логарифма относительной амплитуды сигнала и угла между вектором магнитного поля и направлением на спутник от географической широты спутника (Москва, 26.01.2014 02:18 UT)

Fig. 11. The dependence between the logarithm dispersion of signal relative amplitude and angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude (Moscow, 26.01.2014 02:18 UT):
1 – experiment; *2* – simulation; *3* – angle between the magnetic field vector and line connecting the satellite with its latitude

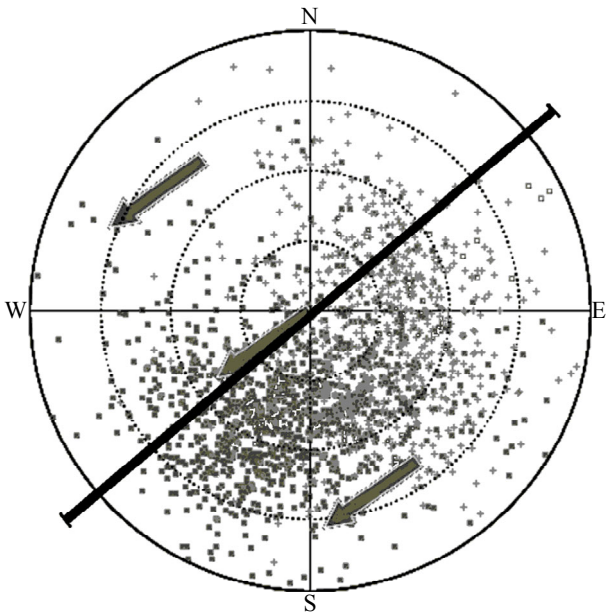


Рис. 10. Карта неба при ионосферном рассеянии (Москва, 15.01.2014 16:46 UT) (см. рис. 9)

Fig. 10. Skymap under conditions of ionospheric scattering (Moscow, 15.01.2014 16:46 UT) (see Fig. 9)

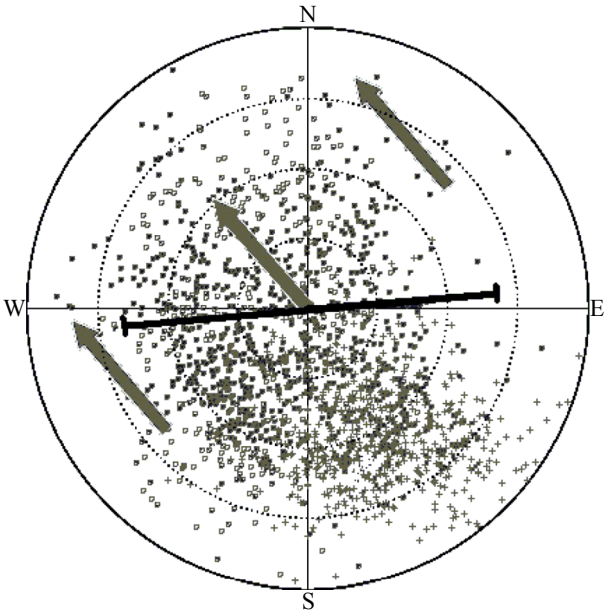


Рис. 12. Карта неба при ионосферном рассеянии (Москва, 26.01.2014 02:18 UT) (см. рис. 11)

Fig. 12. Skymap under conditions of ionospheric scattering (Moscow, 26.01.2014 02:18 UT) (see Fig. 11)

Заключение. Обработка экспериментальных кривых дисперсии логарифма относительной амплитуды сигнала по мере прохождения спутника показала, что неоднородности в F-слое в средних широтах поперечно-анизотропны, как и в высоких широтах, поскольку ни один максимум не удалось аппроксимировать при $\beta = 1$, т. е. моделью изотропных вытянутых неоднородностей. МН в среднеширотной ионосфере склонны вытягиваться в поперечном направлении, близком к направлению перемещения СН. Согласие данных тем лучше, чем качественнее привлеченные данные и чем подробнее учтены особенности конкретных случаев. Выявленная связь ориентации поперечной анизотропии вытянутых неоднородностей и направления их дрейфа может быть полезна в условиях дефицита информации о неоднородной ионосфере.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 526 с.

2. Альперт Я. Л. Распространение электромагнитных волн и ионосфера. 2-е изд. М.: Наука, 1972. 564 с.

3. International Reference Ionosphere. URL: http://irimodel.org (дата обращения: 21.07.2019)

4. SMF2 Global Model of F2 Layer Peak Maximum From Satellite and Ground-Based Observation / V. N. Shubin, A. T. Karpachev, V. A. Telegin, K. G. Tsybulya. URL: http://smf2.izmiran.ru (дата обращения: 21.07.2019)

5. Явление F-рассеяния в ионосфере / Б. Н. Гершман, Э. С. Казимировский, В. Д. Кокоуров, Н. А. Чернобровкина. М: Наука, 1984. 140 с.

6. Spread F in the Midlatitude Ionosphere According to DPS-4 Ionosonde Data / V. A. Panchenko, V. A. Telegin, V. G. Vorob'ev, G. A. Zhbankov, O. I. Yagodkina, V. I. Rozhdestvenskaya // Geomagnetizm i Aeronomiya. 2018. Vol. 58, № 2. P. 241–249.

7. Влияние ионосферной и магнитосферной возмущенности на сбои глобальных навигационных спутниковых систем / Ю. В. Ясюкевич, И. В. Живетьев, А. С. Ясюкевич, С. В. Воейков, В. И. Захаров, Н. П. Перевалова, Н. Н. Титков // Соврем. проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14, № 1. С. 88–98.

8. Насыров А. М. Рассеяние радиоволн анизотропными ионосферными неоднородностями. Казань: Изд-во Казан. ун-та, 1991. 150 с.

9. Результаты комплексных исследований возмущенной области ионосферы с помощью коротковолновой локации в широкой полосе частот и искусственного излучения ионосферы / Е. Н. Сергеев, Е. Ю. Зыков, А. Д. Акчурин, И. А. Насыров, Г. Г. Вертоградов, В. Г. Вертоградов, В. Ю. Ким, В. П. Полиматиди, С. М. Грач // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 1/2. С. 79–93.

10. Anisotropy of Ionospheric Irregularities Determined from the Amplitude of Satellite Signals at a Single Receiver / E. D. Tereshchenko, B. Z. Khudukon, M. O. Kozlova, T. Nygren // Ann. Geophysicae. 1999. Vol. 17. P. 508–518.

11. The Anisotropy of High-Latitude Nighttime F Region Irregularities / R. S. Livingston, C. L. Rino, J. Owen, R. T. Tsunoda // J. Geophys. Res. 1982. Vol. 87, № 12. P. 10519–10526.

12. Digisonde4DManual_LDI-web1-2-6. Technical Manual. Ver. 1.2.6. URL: http://digisonde.com/dps-4dmanual.html (дата обращения: 21.07.2019)

13. The New Digisonde for Research and Monitoring Applications / B. W. Reinisch, I. A. Galkin, G. M. Khmyrov, A. V. Kozlov, K. Bibl, I. A. Lisysyan, G. P. Cheney, X. Huang, D. F. Kitrosser, V. V. Paznukhov, Y. Luo, W. Jones, S. Stelmash, R. Hamel, J. Grochmal // Radio Sci. 2009. Vol. 44, iss. 1. doi: 10.1029/2008RS004115

14. URL: http://147.231.47.3 (дата обращения: 21.07.2019)

15. Frequency-and-Angular Sounding of Traveling Ionospheric Disturbances in the Model of Three-Dimensional Electron Density Waves / V. G. Galushko, A. S. Kascheev, V. V. Paznukhov, Yu. M. Yampolski, B. W. Reinisch // Radio Sci. 2008. Vol. 43, iss. 4. doi: 10.1029/2007RS003735

16. Рытов С. М., Кравцов Ю. А., Татарский В. И. Введение в статистическую радиофизику. Ч. 2: Случайные поля. М.: Наука, 1978, 463 с.

17. Comparison of the Orientation of Small Scale Electron Density Irregularities And F Region Plasma Flow Direction / E. D. Tereshchenko, B. Z. Khudukon, M. O. Kozlova, O. V. Evstafiev, T. Nygren, A. Brekke // Ann. Geophysicae. 2000. Vol. 18, № 8. P. 918–926.

18. Anisotropy of Ionospheric Irregularities Determined from the Amplitude of Satellite Signals at a Singlereciver / E. D. Tereshchenko, B. Z. Khudukon, M. O. Kozlova, O. V. Evstafiev, T. Nygren // Ann. Geophysicae. 1999. Vol. 17, № 4. P. 508–518.

19. 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 // Annales Geophysicae. 2008. Vol. 26, iss. 7. P. 1725–1730. doi: 10.5194/angeo-26-1725-2008

20. Терещенко Е. Д., Романова Н. Ю., Кустов А. В. Сопоставление поперечной к магнитному полю анизотропии мелкомасштабных неоднородностей с ионосферной конвекцией по данным радаров SuperDARN // Геомагнетизм и аэрономия. 2004. Т. 44, № 4. С. 487–492.

21. Романова Н. Ю. Взаимосвязь между направлением горизонтального ветра и ориентацией поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей в F-области среднеширотной ионосферы // Геомагнетизм и аэрономия. 2017. Т. 57, № 4. С. 463–471.

22. Об ориентации поперечной анизотропии мелкомасштабных неоднородностей F-области в направлении дрейфа над Москвой в январе 2014 года / В. А. Телегин, Н. Ю. Романова, В. А. Панченко, Г. Н. Жбанков // Physics of Auroral Phenomena, Abstracts of 42nd Annual Seminar, Апатиты, 11–15 March, 2019. P. 58.

Информация об авторах

Панченко Валерий Алексеевич – кандидат физико-математических наук (1993), старший научный сотрудник ИЗМИРАН. Автор более 80 научных публикаций. Сфера интересов – доплеровский и другие радиометоды в исследовании неоднородной структуры ионосферы.
E-mail: panch@izmiran.ru
https://orcid.org/0000-0003-2870-618X

Телегин Виктор Алексеевич – кандидат физико-математических наук (1984), заведующий лабораторией в ИЗМИРАН. Автор более 100 научных публикаций. Сфера интересов – исследование ионосферных неоднородностей методами вертикального и внешнего зондирования.
E-mail: telegin@izmiran.ru
https://orcid.org/0000-0002-1837-6335

Романова Наталья Юрьевна – дипломированный специалист по специальности "Учитель физики и общетехнических дисциплин" (1999, Мурманский государственный педагогический университет), младший научный сотрудник Полярного геофизического института КНЦ РАН. Автор 20 научных публикаций. Сфера интересов – структура полярной и среднеширотной ионосферы, ионосферы в полярной шапке.
E-mail: romanova@pgi.ru
https://orcid.org/0000-0001-6867-4851

References

1. Bryunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Ionosphere Physics]. Moscow, *Nauka*, 1988, 526 p. (In Russ.)

2. Al'pert Ya. L. *Rasprostranenie elektromagnitnykh voln i ionosfera* [Propagation of Electromagnetic Waves and Ionosphere]. 2nd ed. Moscow, *Nauka*, 1972, 564 p. (In Russ.)

3. International Reference Ionosphere. Available at: http://irimodel.org (accessed 21.07.2019)

4. Shubin V. N., Karpachev A. T., Telegin V. A., Tsybulya K. G. SMF2 Global Model of F2 Layer Peak Maximum From Satellite and Ground-Based Observation. Available at: http://smf2.izmiran.ru (accessed 21.07.2019)

5. Gershman B. N., Kazimirovskii E. S., Kokourov V. D., Chernobrovkina N. A. Yavlenie F-rasseyaniya v ionosfere [The F-Scattering Phenomenon in the Ionosphere]. Moscow, *Nauka*, 1984, 140 p. (In Russ.)

6. Panchenko V. A., Telegin V. A., Vorob'ev V. G., Zhbankov G. A., Yagodkina O. I., Rozhdestvenskaya V. I. Spread F in the Midlatitude Ionosphere According to DPS-4 Ionosonde Data. Geomagnetizm i Aeronomiya. 2018, vol. 58, no. 2, pp. 241–249.

7. Yasyukevich Yu. V., Zhivet'ev I. V., Yasyukevich A. S., Voeikov S. V., Zakharov V. I., Perevalova N. P., Titkov N. N. Influence of Ionospheric and Magnetospheric Disturbances on Failures of Global Navigation Satellite Systems. Current Problems in Remote Sensing of the Earth from Space. 2017, vol. 14, no. 1, pp. 88–98. (In Russ.)

8. Nasyrov A. M. *Rasseyanie radiovoln anizotropnymi ionosfernymi neodnorodnostyami* [Radio Wave Scattering by Anisotropic Ionospheric Inhomogeneities]. Kazan, *Izdvo Kazanskogo un-ta*, 1991, 150 p. (In Russ.)

9. Sergeev E. N., Zykov E. Yu., Akchurin A. D., Nasyrov I. A., Vertogradov G. G., Vertogradov V. G., Kim V. Yu., Polimatidi V. P., Grach S. M. The Results of Comprehensive Studies of the Perturbed Region of the Ionosphere Using a Short-Wavelength Location in a Wide Frequency Band and Artificial Radiation of the Ionosphere. Radiophysics and Quantum Electronics. 2012, vol. 55, no. 1/2, pp. 79–93. (In Russ.)

10. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Kozlova M. O., Nygren T. Anisotropy of Ionospheric Irregularities Determined from the Amplitude of Satellite Signals at a Single Receiver. Ann. Geophysicae. 1999, vol. 17, pp. 508–518.

11. Livingston R. S., Rino C. L., Owen J., Tsunoda R. T. The Anisotropy of High-Latitude Nighttime F Region Irregularities. J. Geophys. Res. 1982, vol. 87, no. 12, pp. 10519–10526.

12. Digisonde4DManual_LDI-web1-2-6. Technical Manual. Ver. 1.2.6. Available at: http://digisonde.com/dps-4dmanual.html (accessed 21.07.2019)

13. Reinisch B. W., Galkin I. A., Khmyrov G. M., Kozlov A. V., Bibl K., Lisysyan I. A., Cheney G. P., Huang X., Kitrosser D. F., Paznukhov V. V., Luo Y., Jones W., Stelmash S., Hamel R., Grochmal J. The New Digisonde for Research and Monitoring Applications. Radio Sci. 2009, vol. 44, iss. 1. doi: 10.1029/2008RS004115

14. Available at: http://147.231.47.3 (accessed 21.07.2019)

15. 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. 2008, vol. 43, iss. 4. doi: 10.1029/2007RS003735

16. Rytov S. M., Kravtsov Yu. A., Tatarskii V. I. *Vvedenie v statisticheskuyu radiofiziku. Ch. 2. Sluchainye polya* [Introduction to Statistical Radiophysics. Part 2. Random Fields.]. Moscow, *Nauka*, 1978, 463 p. (In Russ.)

17. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Kozlova M. O., Evstafiev O. V., Nygren T., Brekke A. Comparison of the Orientation of Small Scale Electron Density Irregularities And F Region Plasma Flow Direction. Ann. Geophysicae. 2000, vol. 18, no. 8, pp. 918–926.

18. Tereshchenko E. D., Khudukon B. Z., Kozlova M. O., Evstafiev O. V., Nygren T. Anisotropy of Ionospheric Irregularities Determined from the Amplitude of Satellite Signals at a Singlereciver. Ann. Geophysicae. 1999, vol. 17, no. 4, pp. 508–518.

19. 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. Annales Geophysicae. 2008, vol. 26, iss. 7, pp. 1725–1730. doi: 10.5194/angeo-26-1725-2008

20. Tereshchenko E. D., Romanova N. Yu., Kustov A. V. Comparison of Transverse to Magnetic Field Anisotropy of Small-Scale Inhomogeneities with Ionospheric Convection

According to SuperDARN Radars. Geomagnetism and Aeronomy. 2004, vol. 44, no. 4, pp. 487–492. (In Russ.)

21. Romanova N. Yu. The Relationship Between the Direction of the Horizontal Wind and the Orientation of the Transverse Anisotropy of Small-Scale Inhomogeneities in the F Region of the Mid-Latitude Ionosphere. Geomagnetism and Aeronomy. 2017, vol. 57, no. 4, pp. 463–471.

22. Telegin V. A., Romanova N. Yu., Panchenko V. A., Zhbankov G. N. *Ob orientatsii poperechnoi anizotropii melkomasshtabnykh neodnorodnostei F-oblasti v napravlenii dreifa nad Moskvoi v yanvare 2014 goda* [On the Orientation of the Transverse Anisotropy of Small-Scale Inhomogeneities of the F-Region in the Direction of Drift over Moscow in January 2014]. Physics of Auroral Phenomena, Abstracts of 42nd Annual Seminar 11–15 March, 2019, Apatity, p. 58. (In Russ.)

Information about the authors

Valery A. Panchenko – Cand. Sci. (Physics) (1993), Senior Scientist in Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences. The author of more than 80 scientific publications. Area of expertise: Doppler and other radio methods of the irregular structure of the ionosphere investigations.
E-mail: panch@izmiran.ru
https://orcid.org/0000-0003-2870-618X

Viktor A. Telegin – Dr. Sci. (Physics) (1984), Head of Laboratory in Pushkov Institute of Terrestrial Magnetism, Ionosphere and Radio Wave Propagation Russian Academy of Sciences. The author of more than 100 scientific publications. Area of expertise: investigation of ionospheric irregularities by vertical and external sounding methods.
E-mail: telegin@izmiran.ru
https://orcid.org/0000-0002-1837-6335

Natalia Yu. Romanova – Researcher at the Polar Geophysical Institute KSC RAS. The author of 20 scientific publications Area of expertise: structure of a high- and middle-latitude ionosphere, ionosphere of polar cap.
E-mail: romanova@pgi.ru
https://orcid.org/0000-0001-6867-4851