УДК 550.388.2

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ДЕКАМЕТРОВЫХ РАДИОВОЛН В УСЛОВИЯХ ВОЛНОВЫХ ВОЗМУЩЕНИЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ

Г. Г. Вертоградов¹, В. П. Урядов^{2,3}, Ф. И. Выборнов²*, А. В. Першин²

¹ Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону; ²Научно-исследовательский радиофизический институт ННГУ им. Н. И. Лобачевского, г. Нижний Новгород;

³ Научно-производственное предприятие «Полёт», г. Нижний Новгород, Россия

Представлены результаты численного моделирования распространения декаметровых радиоволн на слабонаклонной трассе Васильсурск—Нижний Новгород в условиях перемещающихся ионосферных возмущений. Проведено сопоставление с данными зондирования с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ), полученными зимой при средней солнечной активности. Определены направленноскоростные характеристики волновых возмущений. Показано, что в дневные часы в условиях спокойной магнитной обстановки за серпообразные треки на ионограммах могут быть ответственны среднемасштабные волновые возмущения электронной концентрации с размерами около 100 км, периодом 15 мин и относительной амплитудой $\delta \approx 0,1$. Волновые возмущения распространяются со скоростью 110 м/с под углом $\beta \approx -45^{\circ}$ к горизонту с преимущественной ориентацией волнового вектора в восточно-западном направлении.

ВВЕДЕНИЕ

Известно, что концентрация электронов в ионосфере изменяется со временем суток и географическим положением, что приводит к горизонтальным градиентам ионизации, отклонению траектории от плоскости дуги большого круга, образованию волноводных и комбинированных мод распространения. При ионосферном распространении радиоволн важную роль играют неоднородности электронной концентрации с масштабами от долей метра до сотен километров, существенно влияющие на характеристики радиосигналов. Информация о структуре и динамике пространственно-временны́х вариаций электронной концентрации имеет большое значение для геофизических исследований и решения практических задач радиосвязи, радионавигации, радиопеленгации и загоризонтной коротковолновой радиолокации.

Для обеспечения эффективной работы радиоэлектронных систем различного назначения важнейшим элементом является численное моделирование распространения радиоволн с использованием сведений о состоянии ионосферы на базе существующих её моделей, а также данных, получаемых в реальном времени с помощью различных средств наземного и космического базирования.

Среди комплекса технических средств, предназначенных для исследования ионосферы и решения практических задач, важное место занимают ионозонды вертикального, наклонного и возвратно-наклонного зондирования. Так, средства возвратно-наклонного зондирования являются важным элементом управления частотой загоризонтного коротковолнового радара [1]. При этом моделирование ионограмм является необходимым инструментарием для интерпретации ионограмм возвратно-наклонного зондирования [2].

462

^{*} vybornov@nirfi.unn.ru

Численное моделирование распространения коротких радиоволн играет важную роль при интерпретации ионограмм вертикального и наклонного зондирования. Особое значение результаты моделирования приобретают в условиях ионосферных возмущений, когда на ионограммах вертикального зондирования регистрируются дополнительные треки в виде «серпов» [3–5], на ионограммах наклонного зондирования — z-образования [6], за которые ответственны перемещающиеся ионосферные возмущения, а также наблюдаются аномальные моды распространения, обусловленные боковым отражением от Земли и рассеянием на мелкомасштабных неоднородностях [7]. Типичными ионосферными возмущениями, наблюдаемыми на средних широтах, являются среднемасштабные перемещающиеся ионосферные возмущения с размерами 100÷500 км и периодами от 15 минут до 1 часа [8]. Наличие перемещающегося ионосферного возмущения, снижает эффективность функционирования радиоэлектронных систем различного назначения, вызывая девиацию углов прихода, увеличение временно́го интервала задержки сигнала, уширение доплеровского спектра, замирания сигнала и ошибки позиционирования [9, 10].

При наличии возмущений возникают сложности с интерпретацией результатов наблюдений и сравнением экспериментальных и расчётных характеристик радиосигналов.

Моделирование распространения коротких радиоволн в условиях перемещающегося ионосферного возмущения, особенно на трассах с малой протяжённостью, когда среду распространения необходимо рассматривать как трёхмерно неоднородную магнитоактивную ионосферу, позволяет определять параметры возмущений, ответственных за наблюдаемые особенности на ионограммах, и использовать эти сведения для решения практических задач ионосферного распространения радиоволн.

При вертикальном или слабонаклонном зондировании ионосферы *z*-образования на следах ионограмм наклонного зондирования трансформируются в серпообразные треки. В то же время при моделировании на коротких трассах, близких к казивертикальному зондированию, имеются свои особенности, когда система характеристических уравнений распространения радиоволн в магнитоактивной ионосфере имеет особую точку для обыкновенной волны в виде «острия» на лучевой траектории. В горизонтально неоднородной ионосфере при имитационном моделировании указать заранее начальные условия, при которых реализуется указанная особенность, не представляется возможным. Анализ такой ситуации и способы обхода особой точки при решении характеристических уравнений приведены в работе [11].

В данной работе проведено исследование серпообразных треков на ионограммах зондирования сигналами с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ) на слабонаклонной трассе Васильсурск— Нижний Новгород. На основе разработанного алгоритма имитационного моделирования распространения коротких волн в трёхмерно неоднородной магнитоактивной ионосфере проведён синтез траекторий ионограмм в условиях перемещающегося ионосферного возмущения. В расчётах используется прогностическая справочная модель ионосферы International Reference Ionosphere (IRI) [12].

Цель работы состоит в том, чтобы на основе имитационного моделирования результатов слабонаклонного зондирования ионосферы показать, что серпообразные треки на ионограммах связаны с среднемасштабными перемещающимися возмущениями, а также получить оценки параметров этих возмущений.

1. ЭКСПЕРИМЕНТ И МОДЕЛИРОВАНИЕ КВАЗИВЕРТИКАЛЬНОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

В разделе представлены результаты моделирования на слабонаклонной трассе Васильсурск (56,13° с. ш., 46,1° в. д., стенд «Сура»)—Н. Новгород (56,0° с. ш., 44,0° в. д.) и проведено сравне-



Рис. 1. Экспериментальные (*a*) и расчётная (*б*) ионограммы. Трасса Васильсурск—Нижний Новгород, 10:34 UT 09.02.2015. На панели (*a*) интенсивность увеличивается от синего к красному цвету, на панели (*б*) красные и синие кривые отвечают компонентам с обыкновенной и необыкновенной поляризацией соответственно



Рис. 3. То же, что на рис. 1, для момента времени 10:38 UT



Рис. 4. То же, что на рис. 1, для момента времени 10:40 UT

ние с экспериментальными данными. На панелях (a) рис. 1–4 приведены характерные примеры ионограмм на трассе Васильсурск—Н. Новгород, полученных в феврале 2015 года. Магнитная обстановка была спокойная, индекс $K_p = 1 \div 2$. На ионограммах видны серпообразные треки движущихся ионосферных возмущений на обеих магнитоионных компонентах, которые с течением времени перемещаются с бо́льших на меньшие групповые задержки. Это типичное проявление перемещающегося ионосферного возмущения на ионограммах вертикального зондирования. Для определения параметров возмущения проводилось моделирование распространения декаметровых радиоволн (ДКМВ).

Моделирование распространения ДКМВ на короткой трассе Васильсурск—Н. Новгород при наличии среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений выполнено с помощью структурно-физической модели, подробное описание которой приведено в работах [13–18]. Длина анализируемой трассы составляет 130 км, азимут со стороны приёмника (Н. Новгород) 82,8°, со стороны передатчика (Васильсурск) 264,5°. При моделировании учитывалось реальное геомагнитное поле, рассчитанное по модели IGRF [19]. Распределение электронной концентрации в пространстве задавалось трёхмерной моделью IRI-2016 [12], при этом для обеспечения её непрерывности в трёхмерном пространстве вместе с её первыми и вторыми производными таблично заданную функцию аппроксимировали трёхмерным сглаживающим кубическим сплайном. Таким образом, моделирование выполнялось на основе решения характеристических лучевых уравнений в трёхмерно неоднородной магнитоактивной ионосфере. Среднемасштабные ионосферные возмущения моделировались на основе гармонической функции:

$$N_{\rm e}(\varphi,\lambda,r,t) = N_0(\varphi,\lambda,r,t) \left[1 + \sum_{i=1}^n \delta_i \cos\left(\frac{2\pi}{T}t - \mathbf{p}_i \mathbf{r} + \Phi_i\right) \right],$$

где $N_{\rm e}(\varphi, \lambda, r, t)$ — электронная концентрация в точке со сферическими координатами (φ, λ, r) в момент времени $t; N_0(\varphi, \lambda, r, t)$ — электронная концентрация в невозмущённой ионосфере, заданная согласно модели IRI-2016, n — количество возмущений, δ_i и $\mathbf{p}_i = 2\pi/\Lambda_i \{\cos \beta_i \sin \alpha_i, \cos \beta_i \times \\ \times \cos \alpha_i, \sin \beta_i \}$ — относительная амплитуда и волновой вектор возмущения, α_i — азимут, β_i — угол места распространения возмущения в точке расположения передатчика (азимут отсчитывается от направления на север; угол места всегда отсчитывается от плоскости горизонта и имеет знак «-», если волновой вектор направлен вниз от плоскости горизонта), T и Φ_i — период и начальная фаза гармонического возмущения соответственно. При моделировании использовалось одно гармоническое возмущение, параметры которого варьировались.



Рис. 5. Невозмущённый профиль электронной концентрации, пересчитанной в критическую частоту ионосферы, в соответствии с адаптированной моделью IRI-2016 для 10:30 UT 09.02.2015

Перед началом имитационного моделирования параметры модели IRI-2016 корректировались. Для этого выбиралась близкая по временному интервалу ионограмма, на которой не видны следы возмущений. Адаптация модели IRI обеспечивала близость невозмущённой экспериментальной и модельной дистанционно-частотных характеристик (ДЧХ) на трассе зондирования. Для адаптации использовались два параметра модели IRI: число солнечных пятен W и индекс солнечной активности IG. Первый в модели IRI определяет параметры нижней ионосферы, включая *E*-слой, а индекс IG — параметры F-слоя. Индекс IG изменялся так, чтобы обеспечить соответствие экспериментальной и модельной ДЧХ в невозмущённой ионосфере. Модельный невозмущённый профиль электронной концентрации показан на рис. 5.

При моделировании параметры перемещаю-

щегося ионосферного возмущения варьировались следующим образом: $\delta = 0.05; 0.07; 0.10; 0.15; 0.20; \beta = 0^\circ; -30^\circ; -45^\circ; -60^\circ; -75^\circ;$ значения α изменялись от азимута трассы на передатчик (82,8°) до азимута на приёмник (264,5°) с шагом $\pm 15^\circ$.

На рис. 6 показаны изменения ДЧХ в зависимости от пространственного размера перемещающегося ионосферного возмущения Λ для трёх последовательных моментов времени 10:36; 10:38 и 10:40 UT. Значения остальных параметров: $\delta = 0,10$, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$, T = 900 с. Конкретная величина периода в данном случае не имеет большого значения, т.к. она определяет на небольших промежутках времени только квазипериод повторения картины. В данном случае принципиальное значение имеет только отношение шага по времени к временному периоду. Из рис. 6 видно, что при уменьшении Λ усиливается влияние перемещающегося ионосферного возмущения на форму ДЧХ за счёт увеличения пространственного градиента электронной концентрации. Серпообразные возмущения на ДЧХ более интенсивны и хорошо развиты при укорочении длины волны. При Λ более 150 км «серпов» на ДЧХ обыкновенных и необыкновенных волн не наблюдается.

На рис. 7 показаны изменения ДЧХ под влиянием перемещающихся ионосферных возмущений с различными амплитудами. Приведены модельные ДЧХ для обеих магнитоионных компонент и трёх последовательных моментов времени: 10:34; 10:36 и 10:38 UT. Значения других параметров: $\Lambda = 100$ км, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$, T = 900 с. Если сравнивать модельные ДЧХ с экспериментальными, то становится понятным, что при $\delta > 0,1$ в окрестности максимальной применимой частоты магнитоионных компонент наблюдается слишком сильное расщепление каждой из кривых. В этих случаях следует уже говорить не о «серпах» на ДЧХ, а о расщеплениях ДЧХ, подобных диффузным отражениям от ионосферы.

На рис. 8 показано изменение ДЧХ при вариации направления распространения перемещающегося ионосферного возмущения относительно плоскости горизонта, $\delta = 0,1$. Это направление распространения характеризуется углом β , отрицательное значение угла означает направление фазовой скорости сверху вниз. Из рис. 8 видно, что на модельных ДЧХ обеих магнитоионных компонент наблюдаются хорошо развитые «серпы» только при вариации угла места β в интервале от -30° до -50° . При малых углах β «серпы» регистрируются редко и только при существенных

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин



Рис. 6. Влияние на ДЧХ изменения пространственного размера возмущения для моментов времени 10:36 UT (*a*, *e*, *жc*), 10:38 UT (*b*, *d*, *s*) и 10:40 UT (*b*, *e*, *u*). Панели *a*−*b* соответствуют $\Lambda = 75$ км, панели *z*−*e* − $\Lambda = 100$ км, панели *ж*−*u* − $\Lambda = 150$ км. Красные и синие кривые отвечают компонентам с обыкновенной и необыкновенной поляризациями соответственно

значениях относительной амплитуды. При углах места более 60° «серпы» на ДЧХ превращаются в расщепление, подобное образованию расслоения *F*-области ионосферы. Как следствие, выполненный анализ весьма ограничивает диапазон изменений параметров квазигармонической модели перемещающегося ионосферного возмущения: $0.05 \leq \delta \leq 0.10$; 75 км $\leq \Lambda \leq 120$ км; $-50^{\circ} \leq \beta \leq -30^{\circ}$.

На рис. 9 показаны изменения ДЧХ магнитоионных компонент при вариации азимутального направления распространения перемещающегося ионосферного возмущения. Приведены ДЧХ для трёх азимутальных углов 22°, 83° и 142°, т. е. при отклонении на 60° от направления от приёмника к передатчику. Установлено, что наиболее сильное влияние перемещающегося ионосферного возмущения на ДЧХ проявляется для угла $\alpha = 83^\circ$, т. е. в восточном направлении по линии приёмник—передатчик.

В качестве иллюстрации влияния возмущения на характеристики траекторий радиоволн на рис. 10 показаны примеры траекторий для ряда частот (8÷12 МГц), когда ионосфера возмущена гармонической перемещающейся волновой неоднородностью. В табл. 1 приведены значения углов прихода на частоте 10 МГц: угол места (отсчитываемый от горизонтали) β_r и девиация пеленга в пункте приёма $\delta \alpha$ (отклонение азимута прихода волны от направления на передатчик, знак – означает уменьшение азимута) Из рис. 10 и табл. 1 видно, что наличие возмущения приводит к многолучевости сигнала и отклонению пеленга на передатчик до 6,4°, более сильному для обыкновенной компоненты.



Рис. 7. Влияние на ДЧХ изменения относительной амплитуды возмущения для моментов времени 10:34 UT (*a*, *z*, *ж*, *к*), 10:36 UT (*б*, *d*, *s*, *n*) и 10:38 UT (*e*, *e*, *u*, *m*). Панели *a*-*e* соответствуют $\delta = 0,05$, панели *z*-*e* - $\delta = 0,10$, панели *ж*-*u* - $\delta = 0,15$, панели *к*-*m* - $\delta = 0,20$. Красные и синие кривые отвечают компонентам с обыкновенной и необыкновенной поляризациями соответственно

На основе проведённых расчётов на рис. 1–4 показаны результаты сопоставления экспериментальных (a) и модельных (b) ДЧХ для параметров перемещающегося ионосферного возмущения, наилучшим образом обеспечивающих согласование данных наблюдений и моделирования. Установлено, что во время эксперимента ионосфера была возмущена перемещающейся неоднородностью, параметры которой есть $\delta \approx 0,1$, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$, $\Lambda = 100$ км и скорость $V = \Lambda/T \approx 110$ м/с. Такие параметры неоднородности хорошо согласуются с характеристиками среднемасштабных возмущений [8].

Согласно расчётам, на данной широтной трассе направление движения перемещающегося ионосферного возмущения, когда существенно его влияние на ДЧХ, близко к ориентации волнового вектора вдоль трассы зондирования. Для того, чтобы определить реальное направление распространения возмущения, необходимо проведение одновременных наблюдений на трассах

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин



Рис. 8. Влияние на ДЧХ изменения угла β для моментов времени 10:34 UT (*a*, *г*, *ж*, *к*, *н*), 10:36 UT(*б*, *d*, *s*, *n*, *o*) и 10:38 UT (*e*, *e*, *u*, *m*, *n*). Панели *a*-*e* соответствуют $\beta = 0^{\circ}$, панели *г*-*e* - $\beta = -30^{\circ}$, панели *ж*-*u* - $\beta = -45^{\circ}$, панели *к*-*m* - $\beta = -60^{\circ}$, панели *н*-*n* - $\beta = -75^{\circ}$. Красные и синие кривые отвечают компонентам с обыкновенной и необыкновенной поляризациями соответственно

с различной ориентацией. Актуальность таких измерений определяется ещё тем обстоятельством, что направление движения перемещающегося ионосферного возмущения может служить индикатором (трассером) общей атмосферной циркуляции, поскольку тропосферный и термосферный ветры действуют подобно фильтру и определяют преимущественное направление распростране-



Рис. 9. Влияние на ДЧХ изменения угла α для моментов времени 10:36 UT (*a*, *z*, *ж*), 10:38 UT (*b*, *d*, *s*) и 10:40 UT (*b*, *e*, *u*). Панели *a*-*b* соответствуют $\alpha = 22^{\circ}$, панели *z*-*e* - $\alpha = 83^{\circ}$, панели *жu* - $\alpha = 142^{\circ}$. Красные и синие кривые отвечают компонентам с обыкновенной и необыкновенной поляризациями соответственно

Ы

Таблица 1

ния гравитационных волн [20–23].

Что касается источника возмущений, то в период наблюдений трасса зондирования находилась вдали от терминатора и поэтому его, вероятно, можно исключить как возможный источник волновых неоднородностей. С другой стороны, результаты многочисленных исследований (см., например, работы [24–27] и цитируемую там литературу) указывают, что в спокойных геомагнитных условиях генерация гравитационных

волн и их ионосферного отклика в виде среднемасштабных перемещающихся ионосферных возмущений в значительной мере определяется метеорологическими явлениями и тропосферной конвекцией (неустойчивостями струйного потока, ветровым сдвигом, погодными фронтами). Решение этой задачи далеко до завершения, и необходимо продолжение систематических комплексных исследований динамических процессов в нижней и верхней атмосфере.



Рис. 10. Траектории лучей волн с обыкновен-

ной (красные кривые) и необыкновенной (синии

кривые) поляризациями для момента времени 10:36 UT (см. для сравнения рис. 26) с частота-

ми 8 МГц (*a*); 9 МГц (*б*), 10 МГц (*b*), 11 МГц (*b*) и 12 МГц (*d*). Ионосфера возмущена гармониче-

ской перемещающейся ионосферной неоднородностью с параметрами $\delta = 0,1, \alpha = 83^{\circ}, \beta = -45^{\circ},$

 $\Lambda=100$ км. Маркеры $1\,_{\rm o},\,1_{\rm x}$ относятся к отраже-

нию от регулярной ионосферы, маркеры 206, 306,

2_{хв}, 3_{хв} — к отражениям при наличии волнового

возмущения



Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин

выводы

В работе основное внимание уделено разработке методики расчёта ионограмм на слабонаклонной трассе в трёхмерно-неоднородной магнитоактивной ионосфере при наличии волновых возмущений и сопоставлению результатов вычислений с экспериментом. Решение этой задачи имеет важное значение для выявления природы волновых возмущений, существенно влияющих на характеристики коротковолнового сигнала и, в частности, вызывающих его замирания и девиацию его пеленга.

Основные результаты работы состоят в следующем.

Развит численный метод моделирования ионограмм квазивертикального зондирования ионосферы в условиях наличия перемещающегося ионосферного возмущения, позволивший выявить основные особенности проявления среднемасштабных волновых возмущений в ионозондовых наблюдениях. На основе сопоставления экспериментальных и расчётных ДЧХ определены направленно-скоростные характеристики среднемасштабных возмущений, обеспечивающих хорошее соответствие временной эволюции отклика широкополосного сигнала на прохождение волнового возмущения на трассе зондирования. Показано, что наилучшее согласование экспериментальных и модельных ДЧХ имеет место для возмущения с параметрами $\delta \approx 0,1$, $\alpha = 83^{\circ}$, $\beta = -45^{\circ}$, $\Lambda = 100$ км и скоростью $V = \Lambda/T \approx 110$ м/с.

В дальнейшем для определения источников волновых возмущений планируется продолжение исследований путём одновременного ЛЧМ-зондирования ионосферы на трассах с малой и средней протяжённостью и различной ориентацией.

Работа В. П. Урядова, Ф. И. Выборнова и А. В. Першина выполнена при финансовой поддержке базовой части госзадания Минобрнауки РФ (шифр 3.7939.2017/8.9).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- 1. Earl G. F., Ward B. D. // Radio Sci. 1987. V. 22, No. 2. P. 275.
- 2. Coleman C. J. // Radio Sci. 1998. V. 33, No. 4. P. 1187.
- Варшавский И. И., Калихман А. Д. // Исследования по геомагнетизму, аэрономии и физике Солнца. 1988. Вып. 80. С. 90.
- 4. Крашенинников И.В., Лянной Б.Е. // Геомагнетизм и аэрономия. 1991. Т. 31, № 3. С. 427.
- 5. Ларюнин О.А. // Солнечно-земная физика. 2016. Т. 2, № 3. С. 52.
- Вертоградов Г.Г., Вертоградов В.Г., Урядов В.П. // Изв. вузов. Радиофизика. 2006. Т. 49, № 12. С. 1015.
- Uryadov V. P., Vertogradov G. G., Vertogradova E. G., Vertogradov V. G. // IEEE Trans. Antennas Propag. Magazine. 2017. V. 59, No. 6. P. 62.
- 8. Hunsucker R. D. // Rev. Geophys. Space Phys. 1982. V. 20, No. 2. P. 293.
- 9. Lambert S. //Trans. South African Institute of Electrical Engineers. 1985. V. 76, No. 1. P. 19.
- Вертоградов Г. Г., Урядов В. П., Чайка Е. Г. и др. // Изв. вузов. Радиофизика. 2017. Т. 60, № 12. С. 1072.
- 11. Вертоградов Г. Г. // Материалы Международной научной конф. «Излучение и рассеяние ЭМВ ИРЭМВ-2005», Таганрог, 20–25 июня, 2005. С. 397.
- 12. Bilitza D., Altadill D., Zhang Y., et al. // J. Space Weather Space Clim. 2014. V. 4. Art. no. A07.
- 13. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г. // Радиотехника. 1995. № 12. С. 29.
- 14. Барабашов Б. Г., Вертоградов Г. Г. // Математическое моделирование. 1996. Т. 8, № 2. С. 3.

Г. Г. Вертоградов, В. П. Урядов, Ф. И. Выборнов, А. В. Першин

- Barabashov B. G., Vertogradov G. G. // Mill. Conf. on Antennas Propag. AP2000: ESA (SP-444). Davos, Switzerland, 9–14 April, 2000. V. 2. P. 17.
- 16. Вертоградов Г. Г. // Радиотехника и электроника. 2003. Т. 48, № 11. С. 1 322.
- 17. Вертоградов Г. Г. // Изв. вузов. Радиоэлектроника. 2003. Т. 47, № 8. С. 51.
- Vertogradov G. G., Vertogradova E. G. // Proc. 11th Int. Conf. Anten. Propag. (IEE Conf. Publ. No. 480), Manchester, UK, 17–20 April, 2001. V.2. P. 797.
- 19. Thébault E., Finlay C. C, Beggan C. D,. et al. // Earth, Planets Space. 2015. V. 67. Art. no. 79.
- 20. Kalikhman A. D. // J. Atm. Terr. Phys. 1980. V. 42, No. 8. P. 697.
- 21. Waldock J. A., Jones T. B. // J. Atmos. Terr. Phys. 1984. V. 46, No. 3. P. 217.
- 22. Crowley G., McCrea I. W. // Radio Sci. 1988. V. 23, No. 6. P. 905.
- Medvedev A. V., Ratovsky K. G., Tolstikov M. V., et al. // J. Geophys. Res. Space Phys. 2017. V. 122. P. 7567.
- 24. Bertin F., Testud J., Kersley L. //Planet Space Sci. 1975. V. 23, No. 3. P. 493.
- 25. Bertin F., Testud J., Kersley L., Rees P. R. // J. Atm. Terr. Phys. 1978. V. 40, No. 10–11. P. 1 161.
- 26. Rice C. J., Sharp L. R. // Geophys. Res. Lett. 1977. V. 4, No. 8. P. 315.
- 27. Waldock J. A., Jones T. B. // J. Atmos. Terr. Phys. 1987. V. 49, No. 2. P. 105.

Поступила в редакцию 10 мая 2018 г.; принята в печать 29 июня 2018 г.

MODELING OF DECAMETER RADIO-WAVE PROPAGATION UNDER CONDITIONS OF A WAVE-LIKE DISTURBANCE OF THE ELECTRON DENSITY

G. G. Vertogradov, V. P. Uryadov, F. I. Vybornov, and A. V. Pershin

We present the results of numerical modeling of decameter radio-wave propagation on a weakly oblique Vasilsursk — Nizhny Novgorod path under conditions of traveling ionospheric disturbances. A comparison is made with the chirp sounding data obtained in winter with an average solar activity. The direction–velocity characteristics of the wave-like disturbances are determined. It is shown that in the daytime, in a quiet magnetic environment, medium-scale wave-like disturbances of the electron density with sizes about 100 km, a period of 15 min, and relative amplitude $\delta \approx 0.1$ can be responsible for the crescent traces on the ionograms. wave-like disturbances propagate at a velocity of 110 m/s at the angle $\beta \approx -45^{\circ}$ to the horizon with the wave vector oriented predominantly in the east–west direction.