

УДК 550.388.2

С. В. Гринченко

Інститут іоносфери Національної академії наук і Міністерства освіти і науки України, Харків

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ ПО ЕГО ГЕОМЕТРИЧЕСКИМ ПАРАМЕТРАМ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ОБЛАСТИ F2 И ВНЕШНЕЙ ЧАСТИ ИОНОСФЕРЫ

Запропоновано алгоритм побудови профілю електронної концентрації за його характеристиками (висотою головного максимуму, значенням електронної концентрації в максимумі шару F2, верхньою і нижньою півтовщинами, значенням електронної концентрації і шкалою висот на 1000 км). Зроблено огляд виразів, які використовуються для опису висотного профілю електронної концентрації. Показано перевагу запропонованого автором алгоритму побудови профілю електронної концентрації. Проілюстровано результати розрахунків профілю при варіаціях його характеристик. Запропонований алгоритм використано для розв'язання конкретної задачі теоретичного моделювання області F2 іоносфери.

ВВЕДЕНИЕ

Понятие ионосферной модели. Основными физическими параметрами, характеризующими состояние ионосферы, являются концентрация электронов, ионный состав, температуры электронов и ионов, скорость движения ионосферной плазмы, частоты соударений нейтральных и заряженных частиц. Все эти параметры позволяют измерять метод некогерентного рассеяния [8, 11, 12].

Для решения многих прикладных задач, в частности для задач, связанных с распространением радиоволн, используются модели, описывающие состояние ионосферы. Суть таких моделей — определение зависимости физических характеристик ионосферной плазмы (являющихся выходными параметрами моделей) от некоторой совокупности величин (входных параметров), описывающих распределение характеристик состояния ионосферы во времени и пространстве, а также ионизирующее воздействие солнечного излучения и состояние магнитного поля Земли.

Входными величинами, определяющими распределение ионосферных характеристик во

времени, являются местное время и порядковый номер текущих суток в году. Распределение ионосферных параметров в пространстве описывают географическими (или геомагнитными) координатами и высотой над уровнем земной поверхности.

Таким образом, для любого параметра ионосферы (обозначим его буквой p), ионосферная модель определяет функциональную зависимость $p = p(t, d, h, \varphi, \lambda; k_c, k_z)$, где t — местное время, d — порядковый номер суток в годичной последовательности, h — высота, φ — широта, λ — долгота; k_c — индекс (или набор таковых) солнечной активности, k_z — индекс (или набор их) геомагнитной активности.

За несколько десятилетий регулярных измерений параметров ионосферы методом некогерентного рассеяния, проводимых на радаре Института ионосферы, собран массив экспериментальных данных, позволяющий строить модельные зависимости характеристик ионосферы для координат радара (так называемые региональные модели) [1, 2, 5, 6, 10]. Построенные по данным радара эмпирические модели электронной концентрации, температуры ионов и электронов представлены в виде таблиц. Естественно, представляет интерес построение компьютерной версии эмпирической модели, которая мо-

жет быть адаптивной, т. е. учитывающей помимо основного статистического массива данных результаты текущих измерений.

Глобальное распределение концентрации электронов выше главного максимума F2 изучено в меньшей степени, чем в слоях, лежащих ниже. Прямые спутниковые измерения дают только одну точку высотного профиля. Измерения с помощью геофизических ракет дают результаты в непродолжительном интервале времени. Поэтому особо ценными представляются данные, получаемые на комплексах некогерентного рассеяния, дающие полный высотный профиль измерений в течение длительного времени.

Методологические основы моделирования ионосферы. Модели ионосферы принято делить на три категории: теоретические, эмпирические и полуэмпирические (гибридные).

Теоретическое содержание физических процессов, происходящих в ионосфере, в основном состоит из описания фотохимического баланса (ионизации нейтральных молекул, ионно-молекулярного обмена, рекомбинации ионов) и диффузии плазмы. Естественно, необходимо проводить расчёты параметров нейтральной среды, интенсивности ультрафиолетового излучения Солнца. При таком подходе приходится решать систему уравнений различного типа с некоторыми крайними условиями. Решение системы даёт распределение параметров ионосферы, т. е. задаёт её состояние. Основные трудности на пути построения теоретических моделей связаны со сложностью (и некоторой неопределённостью) физических процессов, определяющих состояние ионосферы. Например, при теоретическом описании ионизирующего воздействия Солнца некоторым исследователям приходилось корректировать используемые зависимости интенсивности ультрафиолетового излучения от индекса $F_{10.7}$ солнечной активности до 1.5 раз. Поэтому сложно говорить о высокой точности теоретических расчётов ионосферных параметров. Теоретические расчёты имеют практическое применение для установления взаимосвязи параметров ионосферы [3], подтверждения экспериментальных результатов измерений ионосферных параметров [4].

Возможен принципиально иной подход к моделированию ионосферы. При наличии обширной и разнообразной информации об ионосферных параметрах, получаемой на радарх некогерентного рассеяния, станциях вертикального зондирования, в результате спутниковых и ракетных измерений, проводится статистический анализ экспериментального материала. В результате устанавливается связь между величинами, характеризующими состояние ионосферы, и параметрами, определяющими изменения этих величин, т. е. находится эмпирическое распределение $p = p(t, d, h, \varphi, \lambda; k_e, k_3)$ для каждого физического параметра p ионосферы. Построенная таким способом модель называется эмпирической.

В полуэмпирических (гибридных) моделях комбинируются методы теоретического и эмпирического моделирования. Например, в качестве реперной точки высотного профиля электронной концентрации берётся точка максимума профиля, задаваемая какой-либо эмпирической моделью максимума слоя F2, а остальная часть профиля моделируется теоретически.

Обзор формул, используемых для описания высотного профиля электронной концентрации. На рис. 1 изображены типичные профили электронной концентрации для магнитоспокойных условий равенства в дневное и ночное время.

В достаточно малых интервалах высот, исключая окрестности экстремумов, любой учас-

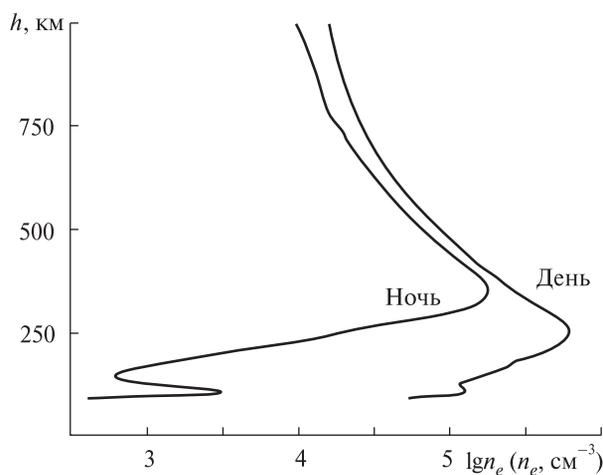


Рис. 1. Структура высотных профилей электронной концентрации

ток профиля электронной концентрации можно аппроксимировать линейным участком вида [7]: $n_e - n_{e0} = \alpha(h - h_0)$, где α — градиент электронной концентрации, n_{e0} — концентрация электронов на высоте h_0 . На практике линейное приближение может оказаться полезным, поскольку любой реальный профиль $n_e(h)$ можно разбить на большое число линейных частей.

Для аппроксимации электронной концентрации на больших высотах используется уравнение экспоненциального слоя [7]:

$$n_e(h) = n_e(h_0) e^{-\frac{h-h_0}{H}}, \text{ т. е. } \ln n_e(h) = \ln n_e(h_0) - \frac{h-h_0}{H},$$

где H — шкала высот. Это уравнение можно использовать для описания внешней части профиля.

При описании профиля около максимума электронной концентрации часто используют уравнение параболического слоя [7]:

$$n_e(h) = n_{e\max} \left[1 - \left(\frac{h-h_{\max}}{H} \right)^2 \right],$$

где H — полутолщина параболы, т. е. половина расстояния между высотами, на которых электронная концентрация равна нулю; h_{\max} — высота максимума слоя F2; $n_{e\max} = n_e(h_{\max})$.

В работе [15] диапазон высот внешней ионосферы разбивается на два интервала: $2h_{\max} - h_1 \leq h \leq h_1$ и $h > h_1$. Высота h_1 определяется равенством $n_e(h_1) = 0.9 \cdot n_{e\max}$. На первом участке профиль описывается параболой $n_e(h) = -Ah(h-B) = Ah(B-h)$. Так как $n_e(h_{\max}) = Ah_{\max}(B-h_{\max}) = n_{e\max}$, то $A = \frac{n_{e\max}}{h_{\max}(B-h_{\max})}$. Поэтому аналитическая формула для аппроксимации профиля $n_e(h)$ на рассматриваемом высотном интервале принимает вид $n_e(h) = \frac{n_{e\max} h(B-h)}{h_{\max}(B-h_{\max})}$. На втором участке профиль описывается экспоненциальной зависимостью $n_e(h) = 0.9 n_{e\max} e^{-p(h-h_1)}$.

Широко известна модель ионосферы IRI (International Reference Ionosphere), построенная на основании обобщения эмпирических данных [13]. Модель реализует вычисление четырёх главных характеристик ионосферы: электронной концентрации, температуры ионов, температуры электронов, ионного состава. Для анали-

тического описания профиля $n_e(h)$ диапазон высот ($h \leq 1000$ км) разделён на шесть частей, в каждой из которых используются свои аналитические зависимости. Первая версия программы модели IRI-78 была реализована на языке MS Fortran (работающая в операционной системе DOS). Практически каждый год выходят новые модификации программы. Последние версии программы выполнены в Visual Fortran. Хотя в опубликованных работах не приводятся аналитические зависимости $n_e(h)$, из анализа фортрановского кода видно, что при описании профиля электронной концентрации в районе области F2 и выше используется зависимость вида $\lg n_e(h) = -Kh + L - A \lg(B + e^{Ch}) - D \lg(E + e^{Fh})$, где K, L, A, B, C, D, E, F — некоторые числовые коэффициенты.

В Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн (ИЗМИРАН) Российской академии наук создана модель трёхмерного распределения электронной концентрации внешней ионосферы по данным зондирования со спутников [14]. Для описания профиля электронной концентрации использована формула:

$$n_e(h) = 4n_{e\max} \frac{e^{-\frac{h-h_{\max}}{B}}}{\left(1 + e^{-\frac{h-h_{\max}}{B}}\right)^2},$$

где $B = B_0 + k(h - h_{\max})$. Видно, что $n_e(h_{\max}) = n_{e\max}$, при этом $n_e(h \pm B) = 4n_{e\max} \frac{e}{(1+e)^2} \approx 0.7864 \cdot n_{e\max}$.

Величину B называют параметром толщины слоя F2. Однако это представляется некорректным, так как B — функция высоты, а не постоянная величина, характеризующая толщину конкретного высотного профиля $n_e(h)$. Эта формула учитывает изменение шкалы высот профиля электронной концентрации с высотой. Заметим, что представленная формула имеет четыре параметра: h_{\max} , $n_{e\max}$, B_0 и k . Параметры h_{\max} и $n_{e\max}$ задают точку главного максимума, а параметры B_0 и k определяют характер высотного профиля $n_e(h)$ выше максимума. Использование только двух величин для характеристики профиля электронной концентрации в интервале высот от 250 до

1000 км представляется недостаточным для корректного описания профиля в интервале около 750 км.

ПОСТРОЕНИЕ ПРОФИЛЯ ЭЛЕКТРОННОЙ КОНЦЕНТРАЦИИ И ЕГО ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ДЛЯ ЭМПИРИЧЕСКОГО И ТЕОРЕТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Геометрические параметры профиля электронной концентрации. Для использования в эмпирическом моделировании электронной концентрации желательно иметь в распоряжении формулу $n_e(h)$, имеющую в качестве параметров величины, которые наглядно характеризовали профиль. Такими величинами в приведенных выше формулах являются $n_{e\max}$ и h_{\max} . Изменение формы профиля при вариации остальных числовых коэффициентов без вычислений непредсказуемо. Поэтому была поставлена задача создания алгоритма построения высотного профиля электронной концентрации по геометрическим параметрам профиля, которые визуально легко снимались бы с графического изображения профиля. К геометрическим параметрам относятся, в частности, величины $n_{e\max}$ и h_{\max} .

Для описания профиля $\lg n_e(h)$ будем использовать следующие параметры: $q = \lg n_{e\max}$ — значение логарифма электронной концентрации в максимуме слоя F2; $p = h_{\max}$ — высота максимума слоя F2; t_u — верхняя полутолщина слоя F2, под которой будем понимать изменение высоты вверх от h_{\max} , при котором концентрация электронов уменьшается в два раза; t_l — нижняя полутолщина; $g = \lg n_e(h = 1000 \text{ км})$ — значение логарифма электронной концентрации на высоте 1000 км; s — величина, равная перепаду высоты, при котором концентрация электронов при экспоненциальном распределении, характерном для высоты 1000 км, уменьшается в десять раз (тогда величина $-1/s$ есть угловой коэффициент касательной прямой, проведенной к кривой профиля $\lg n_e(h)$ в точке (1000 км; g)).

Величина s — это по существу «десятичная» шкала высот H_{10} , которая характеризует функцию $n_e = n_{e0} \cdot 10^{-h/H_{10}}$ (более привычная «натуральная» шкала высот H характеризует зависимость $n_e = n_{e0} \cdot e^{-h/H}$).

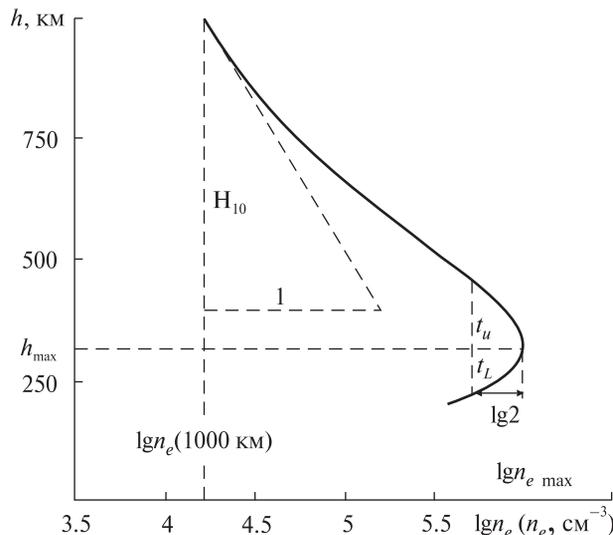


Рис. 2. Геометрические параметры профиля электронной концентрации

Таким образом, для описания профиля электронной концентрации будем использовать шесть параметров: $q = \lg n_{e\max}$, $p = h_{\max}$, t_u , t_l , $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$ и H_{10} . Рис. 2 иллюстрирует перечисленные параметры.

Построение профиля электронной концентрации по его геометрическим параметрам. Для построения профиля электронной концентрации при $h \geq h_{\max}$ используем формулу вида $\lg n_e(h) = (Ah + B)e^{-Dh} - Ch + E$, где A, B, C, D, E — некоторые коэффициенты. Для вычисления перечисленных коэффициентов требуется решить систему уравнений

$$\begin{cases} \lg n_e(p) = q, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=p} = 0, \\ \lg n_e(p + t_u) = q - \lg 2, \\ \lg n_e(h_1) = g, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=h_1} = -\frac{1}{s}, \end{cases}$$

где $h_1 = 1000 \text{ км}$.

Учитывая, что $\frac{d}{dh} \lg n_e(h) = (A - DAh - DB) \times e^{-Dh} - C$, приведем систему к виду

$$\begin{cases} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E = q, \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C = 0, \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E = q - \lg 2, \\ (Ah_1 + B)e^{-Dh_1} - Ch_1 + E = g, \\ (A - DAh_1 - DB)e^{-Dh_1} - C = -\frac{1}{s}, \end{cases}$$

где $r = p + t_u$.

Полученную систему пяти уравнений с пятью неизвестными можно решить методом Ньютона для векторных уравнений $\mathbf{F}(\mathbf{x}) = 0$, в котором последовательные приближения решения находятся из уравнения

$$\frac{d\mathbf{F}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} \Big|_{\mathbf{x}=\mathbf{x}_k} \cdot (\mathbf{x}_{k+1} - \mathbf{x}_k) = -\mathbf{F}(\mathbf{x}_k).$$

Здесь $\mathbf{x} = (A, B, D, C, E)^T$,

$$\mathbf{F}(\mathbf{x}) = \begin{pmatrix} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E - q \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E - q + \lg 2 \\ (Ah_1 + B)e^{-Dh_1} - Ch_1 + E - g \\ (A - DAh_1 - DB)e^{-Dh_1} - C + \frac{1}{s} \end{pmatrix},$$

$$\frac{d\mathbf{F}(\mathbf{x})}{d\mathbf{x}} = \begin{pmatrix} pe^{-Dp} & e^{-Dp} & -p(Ap + B)e^{-Dp} & -p & 1 \\ (1 - Dp)e^{Dp} & -De^{-Dp} & (-2Ap - B + DAp^2 + DBp)e^{-Dp} & -1 & 0 \\ re^{-Dr} & e^{-Dr} & -r(Ar + B)e^{-Dr} & -r & 1 \\ h_1e^{-Dh_1} & e^{-Dh_1} & -h_1(Ah_1 + B)e^{-Dh_1} & -h_1 & 1 \\ (1 - Dh_1)e^{Dh_1} & -De^{-Dh_1} & (-2Ah_1 - B + DAh_1^2 + DBh_1)e^{-Dh_1} & -1 & 0 \end{pmatrix}.$$

Нулевое приближение можно найти из «упрощённой» системы уравнений

$$\begin{cases} (Ap + B)e^{-Dp} - Cp + E = q, \\ (A - DAp - DB)e^{-Dp} - C = 0, \\ (Ar + B)e^{-Dr} - Cr + E = q - \lg 2, \\ -Ch_1 + E = g, \\ -C = -\frac{1}{s}. \end{cases}$$

Геометрический смысл упрощения уравнений для нахождения нулевого приближения решения

исходной системы уравнений состоит в том, что на высоте $h_1 = 1000$ км $\lg n_e(h) \approx -Ch_1 + E$. Последнюю систему уравнений можно свести к одному уравнению с одним неизвестным.

Профиль электронной концентрации при $h \leq h_{\max}$ зададим с помощью параболы $\lg n_e(h) = -Ah \times (h - 2B) + C$. Коэффициенты A, B, C находятся из системы уравнений

$$\begin{cases} \lg n_e(p) = q, \\ \frac{d}{dh} \lg n_e(h) \Big|_{h=p} = 0, \\ \lg n_e(r) = q - \lg 2, \end{cases}$$

где $r = p - t_r$.

Рис. 3, 4 иллюстрируют построение профиля электронной концентрации.

На рис. 3, а приведены профили $n_e(h)$ при вариации параметра $q = \lg n_{e_{\max}}$: $q = 5.75, 6.0, 6.25$ для фиксированных значений $p = h_{\max} = 320$ км, $t_u = 140$ км, $t_l = 100$ км, $g = \lg n_e(1000 \text{ км}) = 4.2$ и $H_{10} = 600$ км.

На рис. 3, б приведены профили $n_e(h)$ при изменении параметра $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$: $g = 4.0, 4.2, 4.4$ для постоянных $q = 6.0, p = 320$ км, $t_u = 140$ км, $t_l = 100$ км, $H_{10} = 600$ км.

На рис. 4, а представлена серия профилей электронной концентрации при изменении верхней полутолщины: $t_u = 120, 140, 160$ км. Профили $n_e(h)$, изображённые на рис. 4, б, соответствующие значениям $H_{10} = 400, 600, 900$ км.

Использование сглаженных экспериментальных профилей электронной концентрации для теоретического расчёта скорости движения плазмы.

Приведенный алгоритм построения высотного профиля электронной концентрации удобно использовать для сглаживания экспериментальных профилей $n_e(h)$ при проведении расчётов, когда электронная концентрация используется в качестве входных данных. Для теоретического расчёта необходим гладкий профиль $n_e(h)$ с непрерывными производными по высоте и имеющий заданные параметры слоя F2 ($\lg n_{e_{\max}}, h_{\max}$ и др.). Высотный профиль $n_e(h)$, построенный рассмотренным способом, удовлетворяет этим требованиям.

Актуальной задачей является теоретический расчёт скорости переноса плазмы по данным

измерений методом некогерентного рассеяния электронной концентрации [3]. Сравнение теоретического профиля вертикальной составляющей скорости движения плазмы $v_z(h)$ и непосредственно измеренного методом некогерентного рассеяния позволило бы сделать вывод о согласованности измеряемых параметров ($n_e(h)$ и $v_z(h)$) в рамках аэрономической теории области F2. Это подтверждало бы правильность измерения указанных ионосферных параметров методом некогерентного рассеяния.

Анализ уравнения непрерывности $\frac{\partial n_i}{\partial t} = q - L - \frac{\partial(n_i v_z)}{\partial h}$ пространственно-временного распределения ионов O^+ позволяет по известным температурам ионов T_i и электронов T_e и электронной концентрации $n_e(h)$ вычислять скорость движения плазмы $v_z(h)$. Концентрация n_i ионов O^+ вычисляется из электронной концентрации n_e , исходя из баланса ионно-молекулярных реакций области F2 [9]. Скорость ионизации q и рекомбинации L определяются из соответствующих модельных представлений химических реакций, спектра солнечного ультрафиолета, параметров нейтральной атмосферы. В околорезонансное время, когда $\frac{\partial n_i}{\partial t} = 0$, решение уравнения

непрерывности $q - L - \frac{d(n_i v_z)}{dh} = 0$ задаётся формулой

$$v_z(h) = \frac{1}{n_i(h)} \left(\Phi_a - \int_h^h (q - L) dh \right), \text{ где } \Phi_a =$$

$= 10^8 \text{ см}^{-2}\text{с}^{-1}$ — поток ионов O^+ на верхней границе ($h_a = 600 \text{ км}$) рассматриваемого интервала высот.

Для вычисления высотного профиля скорости движения плазмы воспользуемся экспериментальными данными $T_i(h)$, $T_e(h)$, $n_e(h)$ для местного времени LT = 12 ч 21 сентября 2006 г. [6]. На рис. 5 представлен сглаженный профиль электронной концентрации (рис. 5, а), характеризующийся следующими значениями геометрических параметров: $q = \lg n_{e\text{max}} = 5.72$ ($n_e, \text{см}^{-3}$), $p = h_{\text{max}} = 220 \text{ км}$, $t_u = 83 \text{ км}$, $t_l = 47 \text{ км}$, $g = \lg n_e(600 \text{ км}) = 4.6$ и $H_{10}(600 \text{ км}) = 530 \text{ км}$ и теоретически вычисленный по указанным эксперимен-

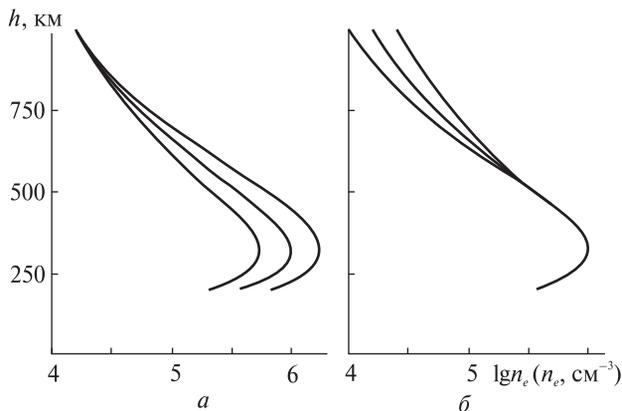


Рис. 3. Построение профилей электронной концентрации при вариации параметров $q = \lg n_{e\text{max}}$ и $g = \lg n_e(1000 \text{ км})$

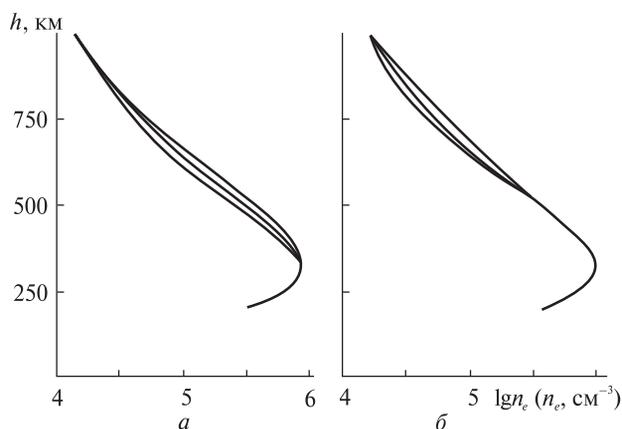


Рис. 4. Построение профилей электронной концентрации при вариации параметров t_u и H_{10}

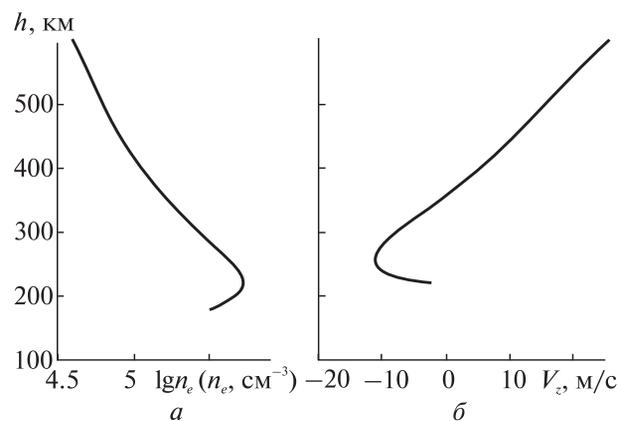


Рис. 5. Экспериментальный профиль электронной концентрации и соответствующий ему теоретически вычисленный профиль скорости движения плазмы

тальным данным высотный профиль вертикальной составляющей скорости движения плазмы (рис. 5, б).

ОБСУЖДЕНИЕ ПОЛУЧЕННЫХ РЕЗУЛЬТАТОВ

Приведенный алгоритм построения высотного профиля электронной концентрации удобно использовать при создании компьютерной версии региональной модели по экспериментальным данным радара некогерентного рассеяния. Представляется возможным предварительно произвести моделирование геометрических параметров профиля, и уже по смоделированным параметрам восстановить профиль концентрации.

Все упомянутые геометрические параметры профиля имеют физический смысл, в отличие от числовых коэффициентов, входящих в математические выражения для $n_e(h)$ в других исследованиях.

Даже отдельные подпрограммы моделирования электронной концентрации максимума слоя F2, высоты максимума, полутолщин, значения электронной концентрации на высоте 1000 км, шкалы высот электронной концентрации представляли бы теоретический и практический интерес. Кстати, привязка к высоте 1000 км при построении профиля электронной концентрации вовсе необязательна.

При таком подходе к построению модельного профиля электронной концентрации возможна корректировка модели в сторону изменения того или иного геометрического параметра профиля.

Описанный алгоритм построения профиля электронной концентрации можно использовать для сглаживания экспериментального профиля $n_e(h)$ при теоретических расчётах ионосферных процессов, при теоретическом моделировании различных радиофизических процессов (например, при расчёте влияния изменения формы профиля $n_e(h)$ на вид ионограмм вертикального зондирования).

Планируется создание алгоритма построения профиля электронной концентрации по геометрическим параметрам и для высот областей E и F1.

1. Григоренко Е. И. Об уточнении эмпирической модели среднеширотной ионосферы, полученной в Харьковском политехническом институте // *Ионосфера*. — 1991. — Вып. 1. — С. 16—24.
2. Григоренко Е. И., Боговский В. К., Пуляев В. А. и др. Вариации параметров ионосферы в периоды высокой и низкой солнечной активности // *Геомагнетизм и аэронавигация*. — 2001. — **41**, № 2. — С. 199—203.
3. Гринченко С. В. Связь скорости переноса плазмы и электронной концентрации области F2 околорассеянной ионосферы // *Геомагнетизм и аэронавигация*. — 1992. — **32**, № 4. — С. 136—138.
4. Гринченко С. В., Емельянов Л. Я., Лысенко В. Н. Сезонные вариации скорости переноса плазмы околорассеянной ионосферы по данным некогерентного рассеяния // *Информационные технологии: наука, техника, технология, образование, здоровье: Сб. науч. тр. ХГПУ. Харьк. гос. политехн. ун-т*. — 1999. — Вып. 7, ч. 3. — С. 337—339.
5. Дзюбанов Д. А. Вариации параметров F-области ионосферы средних широт по результатам измерения методом некогерентного рассеяния: Автореф. дис. ... канд. физ.-мат. наук / АН СССР. Сиб. отделение. Сиб. ин-т земного магнетизма и распространения радиоволн. — Харьков, 1987. — 18 с.
6. Дзюбанов Д. А., Ляшенко М. В., Черногор Л. Ф. Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // *Космічна наука і технологія*. — 2008. — **14**, № 1. — С. 44—56.
7. Дэвис К. Радиоволны в ионосфере: Пер. с англ. — М.: Мир, 1973. — 504 с.
8. Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на Харьковском радаре некогерентного рассеяния // *Радиотехника*. — 2004. — Вып. 136. — С. 102—108.
9. Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1980. — 190 с.
10. Ляшенко М. В. Регіональна модель іоносфери за даними Харківського радара некогерентного розсіяння: Автореф. дис. ... канд. фіз.-мат. наук / НАН України. Інститут радіофізики та електроніки ім. О. Я. Усикова. — Харків: Стиль-издат, 2008. — 20 с.
11. Таран В. И. Наблюдения ионосферы с помощью метода некогерентного рассеяния. Сообщение 1. Основные предпосылки и экспериментальные результаты // *Вест. Харьков. политехн. ин-та: Исследования*

- ние ионосферы методом некогерентного рассеяния. — 1979. — № 155, вып. 1. — С. 3—11.
12. *Эванс. Дж.* Теоретические и практические вопросы исследования ионосферы методом некогерентного рассеяния радиоволн // Тр. ин-та инженеров электротехники и радиоэлектроники. — 1969. — 57, № 4. — С. 139—175.
 13. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci. — 2001. — 36, N 9. — P. 261—275.
 14. *Depuev V. H., Pulinets S. A.* A global empirical model of the ionospheric topside electron density // Adv. Space Res. — 2004. — 34, N 9. — P. 2016—2020.
 15. *Serafimov K.B.* Methods for determining a standard ionospheric topside profile by single measurements // Докл. Болгарской акад. наук. — 1976. — 29, № 29. — С. 1613—1615.

Надійшла до редакції 17.05.10

S. V. Grinchenko

CONSTRUCTION OF ELECTRON DENSITY PROFILE FROM ITS GEOMETRICAL PARAMETERS IN SIMULATING THE F2-REGION AND OUTER IONOSPHERE

We propose an algorithm for the construction of electron density profile with the use of its characteristics, namely, the main maximum height, the value of electron density in the layer F2 maximum, upper and lower semi-thickness, the value of electron density and scale of heights at 1000 km. The existing expressions for the description of altitudinal electron density profile are reviewed. Some advantages of our algorithm for the construction of electron density profile are shown. Our results of profile numerical calculations for some variations of profile characteristics are given. Our algorithm is used to solve the concrete problem of theoretical simulation of the ionosphere F2-region.