N E W S
OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES OF THE REPUBLIC OF KAZAKHSTAN
PHYSICO-MATHEMATICAL SERIES
ISSN 1991-346X
Volume 5, Number 315 (2017), 35 – 43

G.I. Gordienko, A.F. Yakovets, Yu.G. Litvinov

«Institute of Ionosphere» JSC «National Center of Space Research and Technology»
ggordiyenko@mail.ru

COMPARISON OF THE METHODS FOR ESTIMATING THE HIGHT OF THE MAXIMUM OF TH *F* REGION OF THE IONOSPHERE

Abstract. The diurnal distribution of hourly values of height of *F*2 layer maximum (*hmF*2) calculated by three different methods was analyzed: the Titherage's method, giving the most accurate altitude values, and two other methods using empirically selected expressions connecting *hmF*2 with ionogram parameters (critical frequencies *foF*2, *foE* and virtual altitudes

h'(*f*)). It is shown that an approximate method for determining the height of the electron concentration maximum in the ionosphere, based on the calculation of the maximum usable frequency, makes it possible to display all the morphological features of the diurnal variation for winter and equinoctial conditions. In the summer season, there is a wide variation in the heights of the maximum of the layer, caused by the complexity of the ionograms caused by the appearance of sporadic layers. It is shown that the empirical formula connecting *hmF*2 with the effective altitude at the frequency 0.83*foF*2 allows displaying all morphological features of the diurnal variation in the height of the electron concentration maximum in the ionosphere for all seasons.

Key words: ionosphere, vertical sounding, altitudes of the *F* region maximum.

УДК 550.383

Г.И. Гордиенко, А.Ф. Яковец, Ю.Г. Литвинов

ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы

Сравнение методов оценки высоты максимума *F*-области ионосферы

Аннотация. Проведен анализ суточного распределения часовых значений высоты h_mF2, рассчитанных тремя разными методами: методом Титериджа, дающим наиболее точные значения высот, и двумя другими методами, использующими эмпирически подобранные выражения, связывающие *hmF*2 с параметрами ионограмм (критическими частотами *foF*2, *foE* и действующими высотами *h*'(*f*)). Показано, что приближенный метод определения высоты максимума электронной концентрации в ионосфере, основанный на расчете максимально применимой частоты, позволяет отображать все морфологические особенности суточного хода для зимних и равноденственных условий. В летний сезон наблюдается большой разброс значений высот максимума слоя, вызванный усложнённостью ионограмм, обусловленным появлением спорадических слоёв. Показано, что эмпирическая формула, связывающая *hmF*2 с действующей высотой на частоте 0.83 *foF*2, позволяет отображать все морфологические особенности суточного хода высоты максимума электронной концентрации в ионосфере для всех сезонов.

Ключевые слова: ионосфера, вертикальное зондирование, высота максимума F-области.

Введение. Наряду с критической частотой (*foF*2), одним из основных параметров ионосферы является высота максимума электронной концентрации слоя *F*2 (*hmF*2). Важность этих параметров определяется их использованием в многочисленных приложениях. За счет отражения радиоволн от *F*2-слоя в первую очередь осуществляется коротковолновая радиосвязь на больших расстояниях.

При этом высота максимума электронной концентрации слоя $F2$ является одним из наиболее важных параметров, необходимых для выбора радиочастот связи. Регулярное изменение солнечной радиации с солнечным зенитным углом вызывает временные и пространственные изменения $hmF2$. В зависимости от солнечной активности, времени суток и сезона $hmF2$ может изменяться от 250 до 450 км на средних широтах. Кроме того, существует сильная зависимость $hmF2$ от динамических сил, таких как электрические поля и термосферные ветры, вызывающих вертикальный дрейф ионосферной плазмы. Из-за регулярных и нерегулярных вариаций плотности нижней части плазмы, тесно связанных с изменениями $foF2$ и $hmF2$, передача наземного сигнала может быть прервана или даже потеряна. Кроме того, данные о величинах $hmF2$ и $foF2$ важны при осуществлении трансионосферной связи Земля-Космос. Например, точность позиционирования с помощью GNSS (глобальной навигационной спутниковой системы) может быть улучшено путем учета таких эффектов распространения сигналов через ионосферу, как ошибки, вызванные изгибом траектории луча, на основе использования данных о значениях $foF2$ и $hmF2$ [1, 2]. Кроме того, поскольку пик $F2$-слоя является ключевой точкой привязки для построения профилей электронной концентрации, электронная концентрация в максимуме слоя ($NmF2$), связанная с критической частотой согласно формуле $NmF2 = 1.24 \cdot 10^4 \cdot foF2^2$, эл/см^3 и соответствующая $hmF2$ являются наиболее важными параметрами в эмпирическом ионосферном моделировании. Точность высоты пика имеет решающее значение и в некоторых других приложениях, таких как определения скорости [3] и амплитуды осцилляций термосферного ветра [4]. Существуют три метода расчета $hmF2$ из ионограмм вертикального зондирования. Сравнению точности этих методов и посвящена данная работа.

Описание методов расчета hmF2 и анализ результатов наблюдений. Наблюдения ионосферы проводятся в Институте ионосферы (Алматы, 76°55′ E, 43°15′ N) на цифровом ионозонде “ПАРУС”, сопряженном с компьютером, предназначенным для сбора, хранения и обработки ионограмм в цифровом виде. Информация, необходимая для расчетов разнообразных параметров ионосферы, считывается с ионограмм полуавтоматическим методом с участием опытного оператора. В работе [5] показано, что подобный метод обладает большей, по сравнению с автоматическим методом, точностью считывания ионосферных параметров с ионограмм и большим статистическим выходом ионограмм, пригодных к обработке. С ионограмм считываются значения действующих высот отражения $h'(f)$ радиосигнала на ряде фиксированных рабочих частот зондирования и значение критической частоты $foF2$, представляющих основу для получения высотных распределений электронной концентрации ($N(h)$-профилей) методом POLAN [6]. Считается, что $N(h)$-профили дают наиболее точные значения $hmF2$.

При расчете $hmF2$ вторым методом используется параметр M(3000)$F2$, представляющий отношение максимально применимой радиочастоты (МПЧ(3000)) при односкачковом распространении на трассе протяженностью 3000 км к критической частоте $F2$-слоя (M(3000)$F2$ = МПЧ(3000)/$foF2$) [7, 8]. Высота рассчитывается по формуле

$$h_mF2 = 1490/[\mathrm{M}(3000)F2 + c_1(foF2/foE - c_2) + c_3] - 176 \qquad (1)$$

где foE – критическая частота E-слоя, а c_1, c_2 и c_3 представляют коэффициенты, зависящие от широты местоположения ионозонда и уровня солнечной активности. Способ расчета параметра M(3000)$F2$ из ионограмм был предложен в работе [9].

При расчете $hmF2$ третьим методом [10] используется кажущаяся высота $h'(f)$ отражения сигнала на частоте равной $0.83foF2$:

$$hmF2 = h'(0.83foF2) \qquad (2)$$

Заметим, что $h'(0.83foF2)$ непосредственно считывается с ионограмм, поэтому это самый простой метод, не требующий довольно сложного программного обеспечения для инверсии ионограмм в высотный профиль электронной концентрации в первом методе или расчета M(3000)$F2$, c_1, c_2 и c_3 во втором методе.

Для выполнения данного исследования, используя данные ВЗ ионозонда Института ионосферы в качестве базовых данных, методом Титериджа [6] были получены массивы часовых