

NEWS

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 HEIGHT OF THE MAXIMUM OF THE F REGION OF THE IONOSPHERE

Abstract. The diurnal distribution of hourly values of height of $F2$ layer maximum ($hmF2$) 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 $hmF2$ with ionogram parameters (critical frequencies $foF2$, 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 $hmF2$ with the effective altitude at the frequency $0.83foF2$ 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 $hmF2$ с параметрами ионограмм (критическими частотами $foF2$, 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 усложненностью ионограмм, обусловленным появлением спорадических слоёв. Показано, что эмпирическая формула, связывающая $hmF2$ с действующей высотой на частоте $0.83 foF2$, 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 ($foF2$), одним из основных параметров ионосферы является высота максимума электронной концентрации слоя $F2$ ($hmF2$). Важность этих параметров определяется их использованием в многочисленных приложениях. За счет отражения радиоволн от $F2$ -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/см³ 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 одностороннем распространении на трассе протяженностью 3000 км к критической частоте $F2$ -слоя ($M(3000)F2 = \text{МПЧ}(3000)/foF2$) [7, 8]. Высота рассчитывается по формуле

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

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 $0.83foF2$:

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

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

значений $hmF2$ для января, июля, марта и сентября месяцев 2008-2010 гг, представляющих соответственно зимний, летний и равноденственные сезоны для условий аномально низкого уровня солнечной активности. Поскольку считается, что точность расчета высот максимума слоя $F2$ максимальна, если они получены из $N(h)$ - профилей, то они служили в качестве реперных значений для оценки точности двух других методов расчета высот. Нами был проведен сравнительный анализ данных $hmF2$, полученных из $N(h)$ - профилей, с данными $hmF2_{(1)}$ и $hmF2_{(2)}$, рассчитанными по алгоритмам (1) и (2), и проведена оценка степени их соответствия.

Использование алгоритма (1). Примеры суточного распределения часовых значений высоты $hmF2$, рассчитанных методом Титериджа [6] и обозначенных на рисунках как $hmF2_{obs}$, их медианных значений $hmF2_{med}$ для рассматриваемых сезонов 2008-2010 гг. приведены на рис. 1-3. Поскольку алгоритм (1) выведен эмпирически и предполагает некоторое сглаживание результатов расчёта, то значения $hmF2_{(1)}$ в этом случае были рассчитаны с учётом медианных значений входящих в (1) параметров foE , $foF2$ и $M3000F2$.

Рисунки 1-3 демонстрируют, что рассчитанные по эмпирической зависимости (1) значения $hmF2$ отражают все морфологические особенности суточного хода максимума электронной концентрации в ионосфере для рассматриваемых условий, обнаруживая значительное расхождение с медианами в дневное время летнего сезона, когда наблюдается большой разброс значений $hmF2_{obs}$, обычно вследствие усложнённости ионограмм, вызванной наличием спорадических слоёв. Рисунок 4 представляет корреляционные зависимости $hmF2_{med}$ и $hmF2_{(1)}$, которые показывают, что за исключением летнего сезона их соответствие выполняется не менее чем в 90% случаев, что соответствует коэффициенту корреляции $r \approx 0.95$. Попытка использования медианных значений рассматриваемых параметров, рассчитанных для каждого сезона по всему массиву данных, за 2008-2010 гг., привела к незначительному улучшению результатов, $R^2 \approx 0.93$ ($r \approx 0.96$), рис. 5.

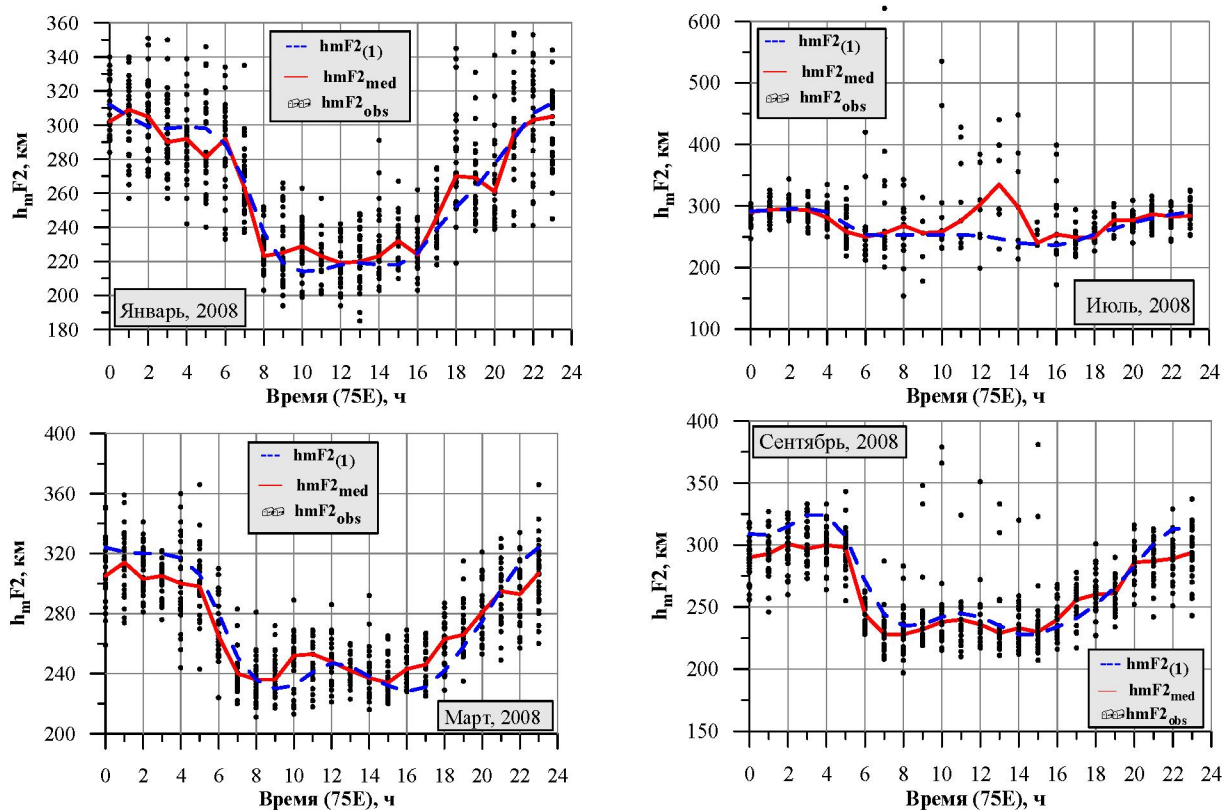


Рисунок 1 - Примеры суточного распределения часовых значений высоты $hmF2_{obs}$ (символ $\bullet$) для зимних, летних и равноденственных сезонов 2008 г.; $hmF2_{med}$ – медианные значения $hmF2_{obs}$; $hmF2_{(1)}$ – значения $hmF2$, рассчитанные по алгоритму (1)

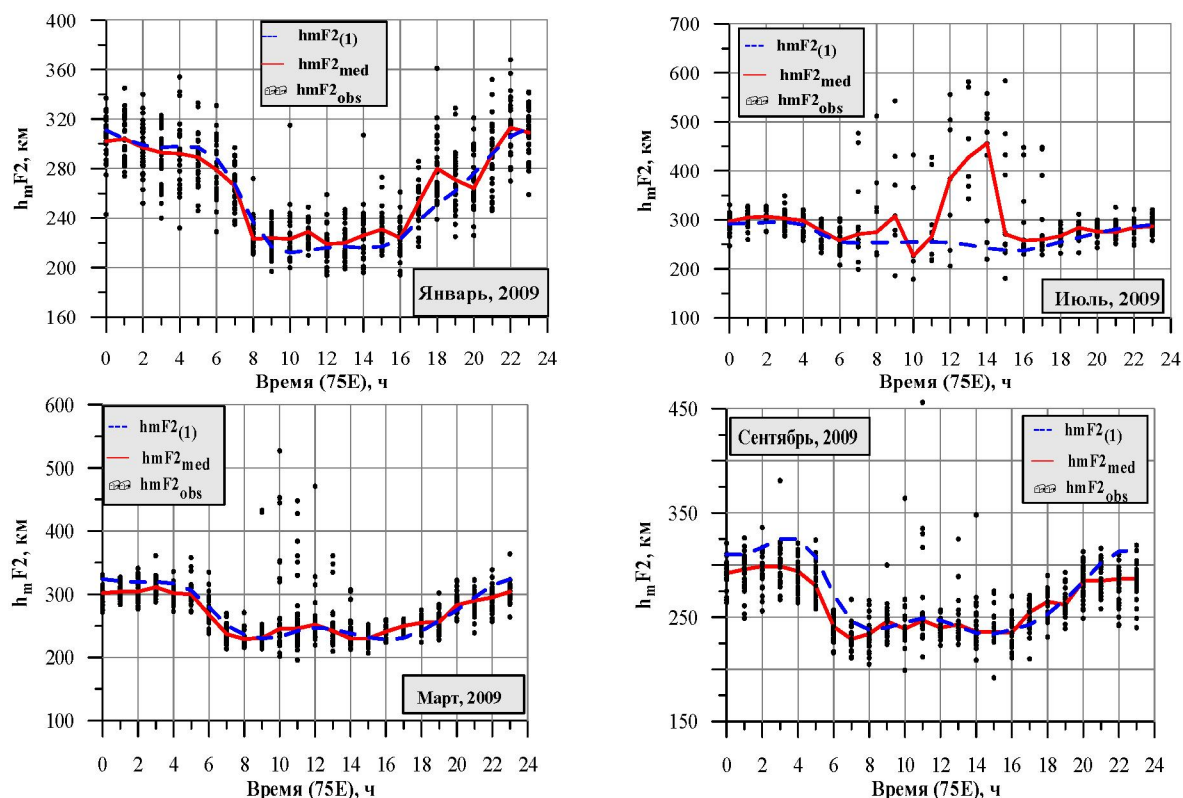


Рисунок 2 - Примеры суточного распределения часовых значений высоты $hmF2_{obs}$ (символ $\bullet$) для зимних, летних и равноденственных сезонов 2009 г.; $hmF2_{med}$ – медианные значения $hmF2_{obs}$; $hmF2_{(1)}$ – значения $hmF2$, рассчитанные по алгоритму (1)

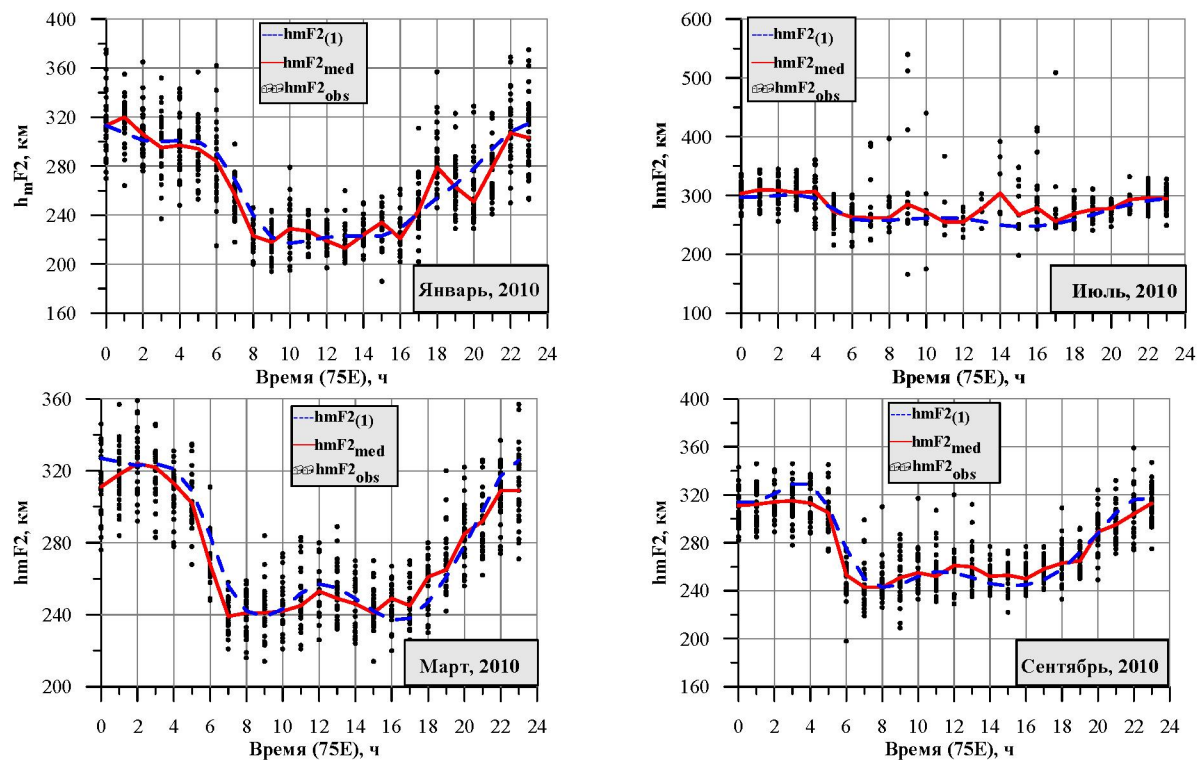


Рисунок 3 - Примеры суточного распределения часовых значений высоты $hmF2_{obs}$ для зимних, летних и равноденственных сезонов 2010 г.; $hmF2_{med}$ – медианные значения $hmF2_{obs}$; $hmF2_{(1)}$ – значения $hmF2$, рассчитанные по алгоритму (1).

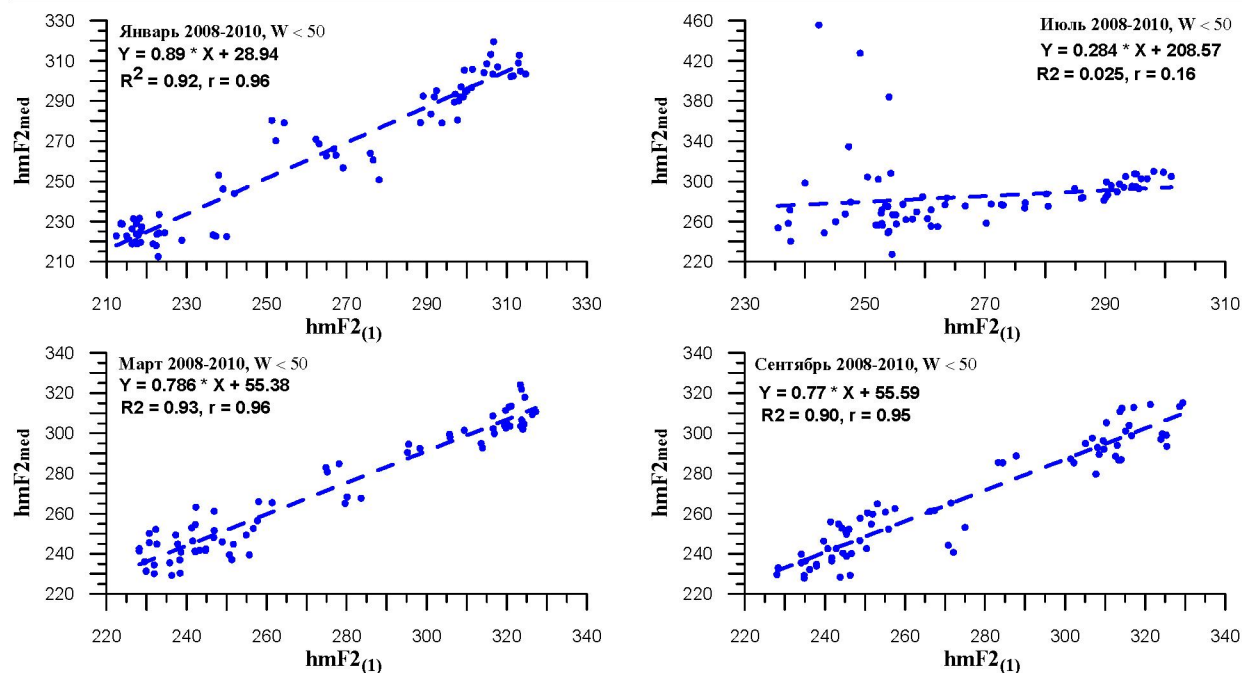


Рисунок 4 - Корреляционные зависимости медианных значений $hmF2_{med}$, $hmF2_{(1)}$ рассчитанных по всему массиву данных для зимних, летних и равноденственных условий

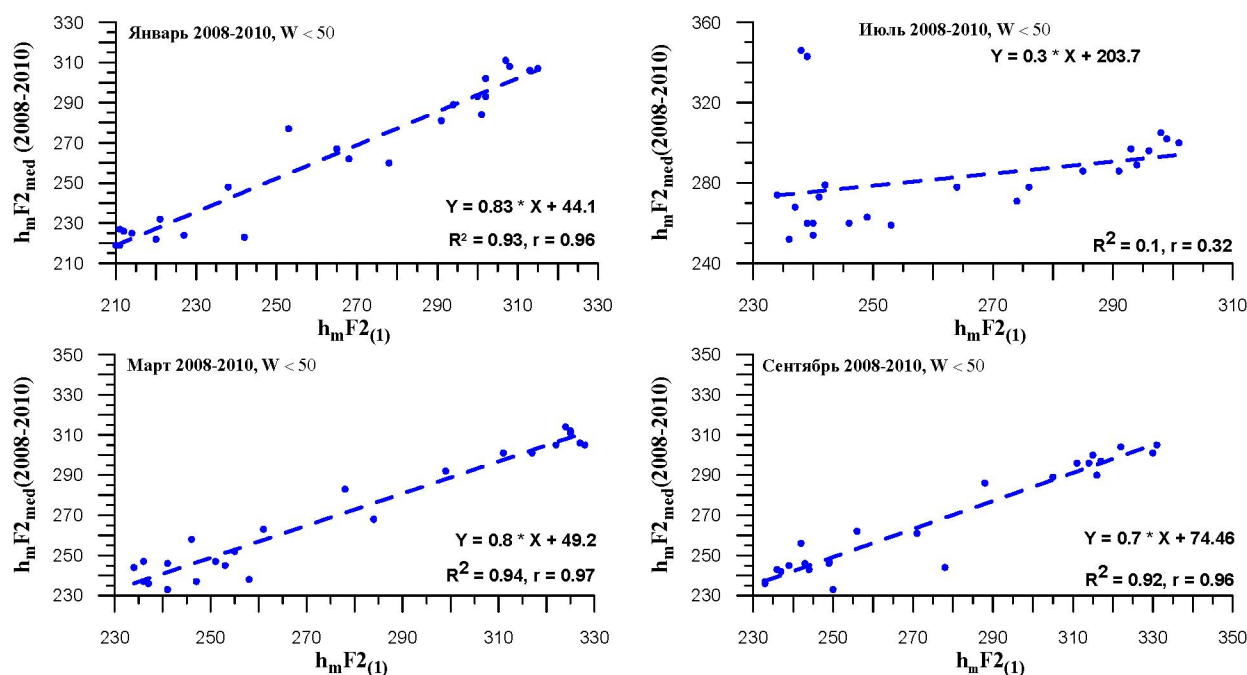


Рисунок 5 - Корреляционные зависимости медианных значений $hmF2_{med}$ и рассчитанных $hmF2_{(1)}$ по алгоритму (1) для зимних, летних и равноденственных условий 2008-2010 гг.

Статистика ошибок расчёта $hmF2_{(1)}$ относительно $hmF2_{med}$ приведена на рис. 6, где видно, что в большинстве случаев ошибки распределены в пределах ± 20 км.

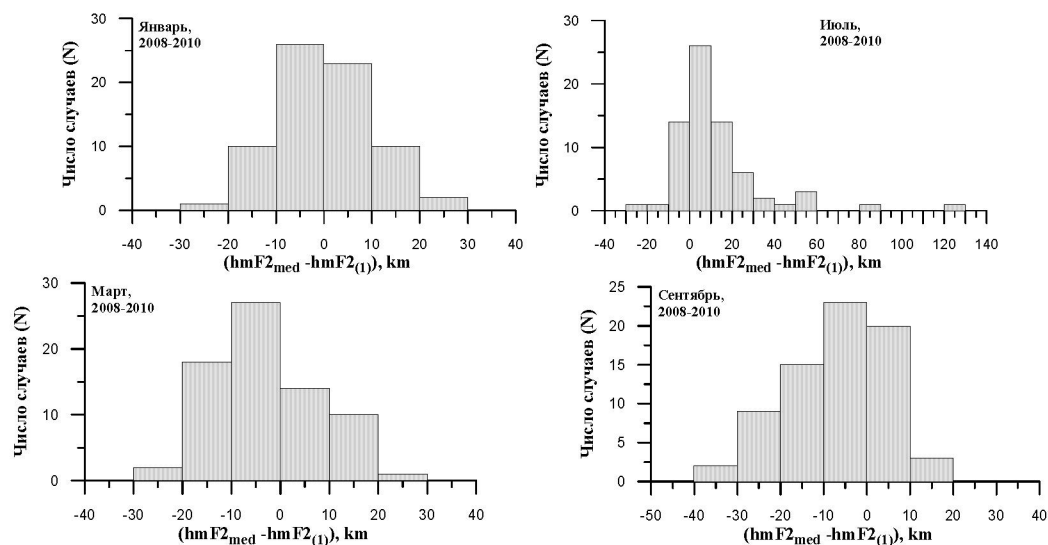


Рисунок 6 - Статистика ошибок определения значений $hmF2(1)$, относительно $hmF2_{med}$, рассчитанных методом Титериджа [6]

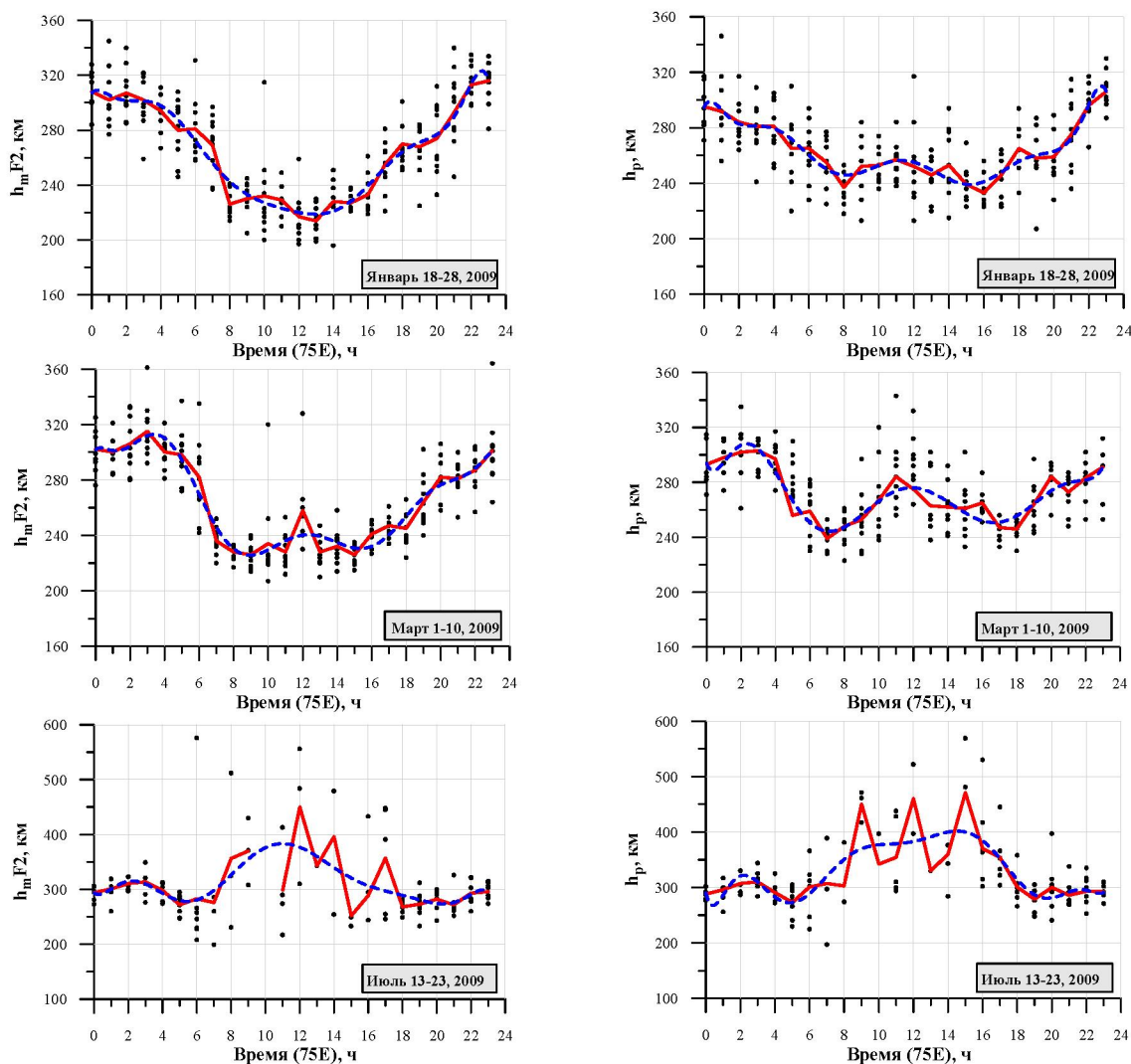


Рисунок 7а - Примеры суточного распределения полученных значений $hmF2$ и h_p для различных сезонов.

Символ • соответствует часовым значениям, сплошная линия — средним значениям, штриховая линия - представление полиномом 10-й степени.

Таким образом, получено, что алгоритм (1) определения положения максимума электронной концентрации в ионосфере позволяет с коэффициентом корреляции, равным порядка 0.96, отображать все морфологические особенности фонового суточного хода для зимних и равноденственных условий. Исключение составляет летний сезон, когда наблюдается большой разброс значений $hmF2_{obs}$, обычно по причине усложнённости ионограмм из-за наличия спорадических слоёв.

Использование алгоритма (2). Степень применимости алгоритма (2) для оценки положения максимума электронной концентрации в ионосфере была исследована также на примерах зимнего, летнего и равноденственного сезонов при условии низкой солнечной активности. Были выполнены расчёты часовых значений h_p для января, марта и июля месяцев 2009 г. за десять дней каждого месяца при условии отсутствия возмущающих факторов, влияющих на качество ионограмм. Результаты сопоставления суточного распределения полученных значений $hmF2$ и $hmF2_{(2)}$ (на рисунках $hmF2_{(2)}$ обозначены символом h_p) приведены на рис. 7 и 8. Рисунок 7а представляет примеры по всем рассматриваемым массивам данных, 7б – их корреляционную связь, рис. 8 – примеры сопоставления для конкретных дней зимнего сезона.

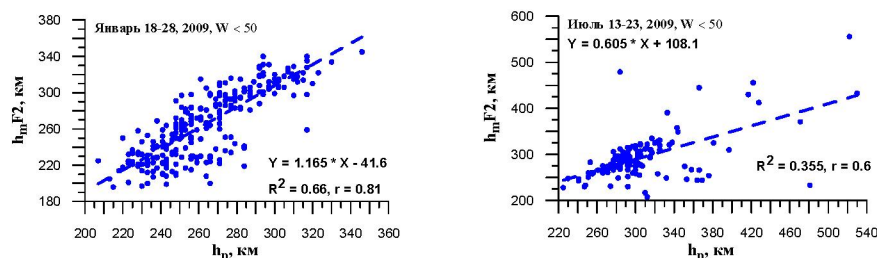


Рисунок 7б - Примеры корреляционной связи между $hmF2$ и h_p , рассчитанных для конкретных условий (18-28 января 2009 г.) зимнего сезона низкой солнечной активности.

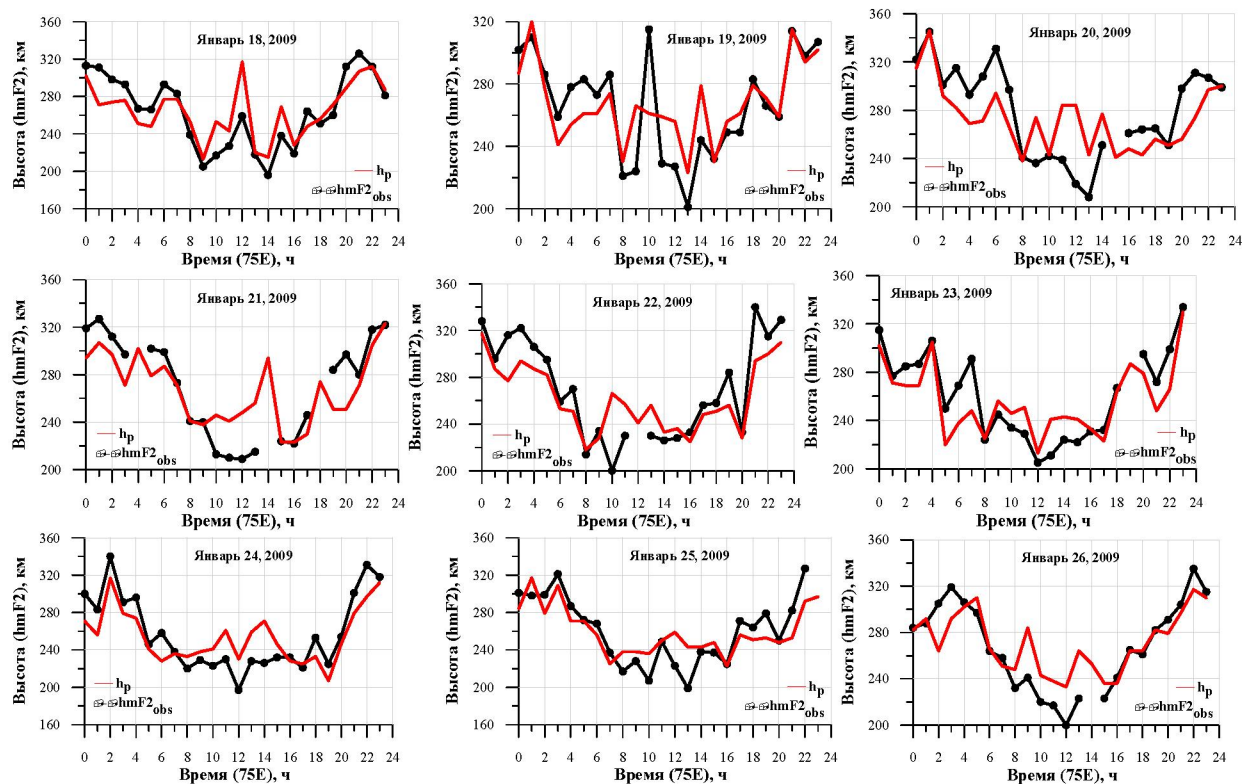


Рисунок 8 - Примеры сопоставления суточных распределений $hmF2$ и h_p для конкретных дней зимнего сезона

В результате можно сделать выводы, что алгоритм (2) позволяет отображать все морфологические особенности суточного хода высоты максимума электронной концентрации в ионосфере для всех сезонов, при этом коэффициент корреляции значений $hmF2$ и h_p в зависимости от сезона составляет порядка $r = 0.6 \div 0.8$.

Выводы.

Проведен анализ суточного распределения часовых значений высоты $hmF2$, рассчитанных тремя разными методами: методом Титериджа, дающим наиболее точные значения высот, и двумя другими методами, использующими эмпирически подобранные выражения, связывающие $hmF2$ с параметрами ионограмм (критическими частотами $foF2$, foE и действующими высотами $h'(f)$). Показано, что формула (1) определения высоты максимума электронной концентрации в ионосфере позволяет с коэффициентом корреляции, равным порядка 0.96, отображать все морфологические особенности фонового суточного хода для зимних и равноденственных условий. Исключение составляет летний сезон, когда наблюдается большой разброс значений $hmF2_{obs}$, вызванном усложненностью ионограмм, обусловленным появлением спорадических слоёв. Показано, что формула (2) позволяет отображать все морфологические особенности суточного хода высоты максимума электронной концентрации в ионосфере для всех сезонов, при этом коэффициент корреляции значений $hmF2$ и h_p в зависимости от сезона составляет порядка $r = 0.6 \div 0.8$.

Работа выполнена по РБП-076 “Развитие методов мониторинга и исследований космического пространства на базе современных информационных технологий” в рамках темы “Изучить структуру и динамику потока космических лучей, геомагнитного поля, ионосферы и атмосферы с целью диагностики и прогноза состояния ближнего космоса”, Регистрационный номер (РН) 0115РК01275.

ЛИТЕРАТУРА

- [1] Hoque, M. M. and Jakowski, N.: Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning, Radio Sci., 43, RS5008, doi:10.1029/2007RS003817, 2008.
- [2] Hoque, M. M. and Jakowski, N.: Ionospheric bending correction for GNSS radio occultation signals, Radio Sci., 46, RS0D06, doi:10.1029/2010RS004583, 2011a.
- [3] Zhang, S.-R., Oliver, W. L., Holt, J. M., and Fukao, S.: Ionospheric data assimilation: comparison of extracted parameters using full density profiles and key parameters, J. Geophys. Res., 108, 1131, doi:10.1029/2002JA009521, 2003.
- [4] Яковец А.Ф., Водяников В. В., Гордиенко Г.И., Литвинов Ю. Г. Осцилляции термосферного ветра при прохождении крупномасштабных перемещающихся ионосферных возмущений// Геомагнетизм и аэрономия. Т. 54. № 4. С. 520-527. 2014.
- [5] Stankov S.M., Jodogne J.(C., Kutiev I., Stegen K., Warnant R. Evaluation of automatic ionogram scaling for use in real time ionospheric density profile specification: Dourbes DGS256/ARTIST-4 performance // Ann. Geophys. V. 55. № 2. P. 283–291. doi:10.4401/ag4976. 2012.
- [6] Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalized program Polan // National Geophys. Data Center. –Boulder. CO USA, 1985. – 189 p.
- [7] Bilitza, D., Sheikh, N.M., and Eyfrig, R., A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map, Telecommun. J., 1979, vol. 46, no. 9, pp. 549–553.
- [8] Dudeney, J.R., The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-layer from scaled ionospheric characteristics, J. Atmos. Terr. Phys., 1983, vol. 45, nos. 8–9, pp. 629–640.
- [9] Piggott, W. R. and Rawer, K.: U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction, second ed., World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-23A, 1978.
- [10] Wright, J. W., Knecht R. W., and Davies K. Manual on Ionospheric Vertical Soundings for the International Geophysical Year (in Russian), edited by N. V. Mednikova and B. S. Shapiro. – Moscow: Nauka, 1957. – P.224.

REFERENCES

- [1] Hoque, M. M. and Jakowski, N.: Estimate of higher order ionospheric errors in GNSS positioning, Radio Sci., 43, RS5008, doi:10.1029/2007RS003817, 2008.
- [2] Hoque, M. M. and Jakowski, N.: Ionospheric bending correction for GNSS radio occultation signals, Radio Sci., 46, RS0D06, doi:10.1029/2010RS004583, 2011a.
- [3] Zhang, S.-R., Oliver, W. L., Holt, J. M., and Fukao, S.: Ionospheric data assimilation: comparison of extracted parameters using full density profiles and key parameters, J. Geophys. Res., 108, 1131, doi:10.1029/2002JA009521, 2003.

- [4] Yakovets A. F., Vodyannikov V. V., Gordienko G. I., and Litvinov Yu. G.. Thermospheric Wind Oscillations during the Propagation of Large-Scale Traveling Ionospheric Disturbances. *Geomagnetism and Aeronomy*, 2014, Vol. 54, No. 4, pp. 480–487.
- [5] Stankov S.M., Jodogne J.(C., Kutiev I., Stegen K., Warnant R. Evaluation of automatic ionogram scaling for use in real time ionospheric density profile specification: Dourbes DGS256/ARTIST-4 performance // *Ann. Geophys.* V. 55. № 2. P. 283–291. doi:10.4401/ag4976. 2012.
- [6] Titheridge J.E. Ionogram analysis with the generalized program Polan // *National Geophys. Data Center.* –Boulder. CO USA, 1985. – 189 p.
- [7] Bilitza, D., Sheikh, N.M., and Eyfrig, R., A global model for the height of the F2-peak using M3000 values from the CCIR numerical map, *Telecommun. J.*, 1979, vol. 46, no. 9, pp. 549–553.
- [8] Dudeney, J.R., The accuracy of simple methods for determining the height of the maximum electron concentration of the F2-layer from scaled ionospheric characteristics, *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1983, vol. 45, nos. 8–9, pp. 629–640.
- [9] Piggott, W. R. and Rawer, K.: U.R.S.I. Handbook of Ionogram Interpretation and Reduction, second ed., World Data Center A for Solar-Terrestrial Physics, Report UAG-23A, 1978.
- [10] Wright, J. W., Knecht R. W., and Davies K. Manual on Ionospheric Vertical Soundings for the International Geophysical Year (in Russian), edited by N. V. Mednikova and B. S. Shapiro. – Moscow: Nauka, 1957. – P.224.

Сведения об авторах:

Гордиенко Галина Ивановна, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, ggordienko@mail.ru;

Яковец Артур Федорович, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, artyak40@mail.ru;

Литвинов Юрий Георгиевич, канд. ф.-мат. наук, СНС, Каменское плато, Институт ионосферы, ДТОО «Институт ионосферы» АО «НЦКИТ», Алматы, yurii-litvinov@mail.ru.