УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, А. В. СИДОРЕНКО

РЕГИОНАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ИОНОСФЕРЫ CERIM IION: РАСЧЁТ ВЫСОТЫ МАКСИМУМА СЛОЯ F2 ИОНОСФЕРЫ

Представлено результати моделювання висоти максимуму області F2 іоносфери у залежності від рівня сонячної активності. Побудовано регресійні залежності висоти шару F2 від індексу сонячної активності $F_{10,7}$. Виконано розрахунок сезонно-добових варіацій висоти максимуму області F2 іоносфери для фаз мінімуму та максимуму сонячної активності. Представлено результати порівняльного аналізу отриманих результатів з експериментальними даними та модельними розрахунками інших авторів.

Ключові слова: висота максимуму області F2 іоносфери, індекс сонячної активності, регресійні залежності, регіональна модель іоносфери

Представлены результаты моделирования высоты максимума области F2 ионосферы в зависимости от уровня солнечной активности. Построены регрессионные зависимости высоты слоя F2 от индекса солнечной активности $F_{10,7}$. Выполнен расчет сезонно-суточных вариаций высоты максимума области F2 ионосферы для фаз минимума и максимума солнечной активности. Представлены результаты сравнительного анализа полученных результатов с экспериментальными данными и модельными расчетами других авторов.

Ключевые слова: высота максимума области F2 ионосферы, индекс солнечной активности, регрессионные зависимости, региональная модель ионосферы

The results of the simulation of the height of the maximum of the ionosphere F2 region as a function of the level of solar activity are presented. The regression dependences of the height of the F2 layer on the solar activity index F10.7 are constructed. The calculation of season-diurnal variations in the height of the maximum of the ionospheric F2 region for the phases of the minimum and maximum of solar activity has been performed. The results of a comparative analysis of the obtained results with experimental data and model calculations of other authors are presented.

Keywords: height of the maximum of the ionospheric F2 region, solar activity index, regression, regional model of ionosphere

Введение. Моделирование параметров среднеширотной ионосферы является одной из важных задач исследования околоземного космического пространства и проявлений космической погоды.

Как показывает практика, глобальные модели ионосферы и термосферы, такие как IRI (International Reference Ionosphere) [1], MSIS (Mass-Spectrometer-Incoherent-Scatter) [2], не всегда корректно отображают пространственно-временные вариации основных ионосферных параметров (концентрации электронов, температуры электронов и ионов, скорости переноса плазмы, ионный состав и др.) в конкретных гелиогеофизических условиях и конкретном регионе. Отчасти это связано с тем, что средства наблюдения за поведением параметров ионизированной среды неравномерно распределены по долготным секторам западного и восточного полушарий. Современные эмпирические модели верхней атмосферы построены на основе экспериментальных данных, полученных большей частью в западном полушарии. Существенные расхождения в распределении основных параметров среднеширотной ионосферы над Европой и Америкой вызваны несимметричностью ионосферы вследствие несовпадения положений географического и геомагнитного полюсов [3 – 6].

Радар некогерентного рассеяния (НР) в Харькове является на данный момент единственным в средних широтах Европы эталонным комплексным средством для получения сведений о параметрах и процессах, протекающий в ионосфере.

С учетом того, что физические свойства ионосферных параметров мало отличаются на расстоянии близко 1000 км (за исключением высокоширотной ионосферы), данные радара НР могут быть использованы для создания региональной модели ионосферы. Данная модель будет справедлива в границах окружности с центром в Харькове и радиусом примерно 1000 км.

В настоящее время в Институте ионосферы НАН и МОН Украины создана региональная модель ионосферы CERIM IION по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученных за период более трех десятков лет [7 – 9].

По региональной модели ионосферы можно рассчитать концентрацию электронов, температуру электронов и ионов, скорость переноса плазмы в широком диапазоне высот (200 – 750 км) в спокойных геомагнитных условиях. Модель также позволяет вычислить значения плотностей полного потока плазмы и потока заряженных частиц за счет амбиполярной диффузии, скоростей нейтральных ветров в ионосфере, плотности потока тепла, переносимого электронами и величину энергии, подводимой к электронному газу. Также модель CERIM IION включает данные о величинах продольных составляющих тензоров амбиполярной диффузии и теплопроводности электронного газа, частот соударений заряженных и нейтральных частиц.

Целью данной работы является построение регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM IION.

Средства наблюдения и массив экспериментальных данных. Для построения регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы *hm*F2 от индекса солнечной активности $F_{10,7}$ использованы экспериментальные

© М. В. Ляшенко, А. В. Сидоренко, 2017

данные харьковского радара НР, полученные в период с 1980 по 2016 гг. в спокойных гелиогеофизических условиях. Указанный временной интервал охватывает более трех циклов солнечной активности.

Географические координаты радара: 49,6º с. ш., 36,3º в. д.; геомагнитные: Φ = 45,4º, Λ = 117,7º; наклонение геомагнитного поля 66º, параметр Мак-Илвейна $L \approx 1{,}9$. Радар имеет крупнейшую в мире зенитную двухзеркальную параболическую антенну диаметром 100 м и предназначен для исследования ионосферы в интервале высот 100 – 1500 км. Рабочая частота радара – 158 МГц. Импульсная мощность радиопередающего устройства составляет 2 – 4 МВт, средняя мощность – 100 кВт. Коэффициент усиления антенны 12700, эффективная площадь антенны ~ 3700 м^2, ширина луча диаграммы направленности ~ 1º. Длительность импульса может меняться в пределах примерно от 70 до 800 мкс. Частота повторения импульсов 24,4 Гц. Шумовая температура системы около 1300 – 1800 К, двухканального приемника – 240 К.

Построение регрессионных зависимостей высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности. Наблюдение, детальный анализ и физическая интерпретация экспериментальных вариаций основных параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях является необходимым для дальнейшего развития существующих ионосферных моделей. Использование большого объема экспериментального материала, полученного в предыдущие годы, и новых данных позволяют существенно уточнить существующие модельные пространственно-временные зависимости параметров ионосферы.

Для получения модельных эмпирических зависимостей высоты максимума слоя F2 ионосферы от индекса солнечной активности использованы данные, полученные на радаре некогерентного рассеяния в Харькове за период трех циклов солнечной активности. Возмущенные периоды (индекс $K_p \geq 4$) из рассмотрения исключались.

Для связи значений высоты *hm*F2 и индексов $F_{10,7}$ выбрана регрессия 1-го порядка. Такие зависимости имели следующий вид

$$hm\mathrm{F2} = a_0 + a_1 \cdot F_{10,7}.$$

Регрессионные зависимости *hm*F2 от индекса $F_{10,7}$ построены для каждого месяца года для 00 и 12 EE(S)T (см. рис. 1 – 8). Соответствующие коэффициенты регрессий a_0 и a_1 для каждого месяца представлены в табл. 1. Анализ полученных результатов показал, что самый низкий коэффициент корреляции получен для августа как для полдня, так и полуночи. Это связано с тем, что для августа имелось наименьшее количество экспериментальных данных в рассматриваемый период.

Полученные коэффициенты регрессии использовались в дальнейшем для обновления модельного блока региональной модели ионосферы CERIM IION, с помощь которого можно рассчитать значения высоты максимума области F2 ионосферы *hm*F2 для конкретного значения индекса солнечной активности $F_{10,7}$, сезона для 00 и 12 EE(S)T.

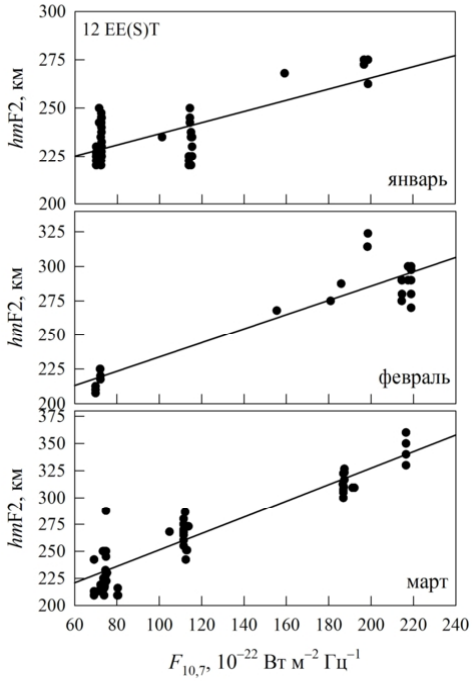

Рис. 1 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для января – марта для 12 EE(S)T

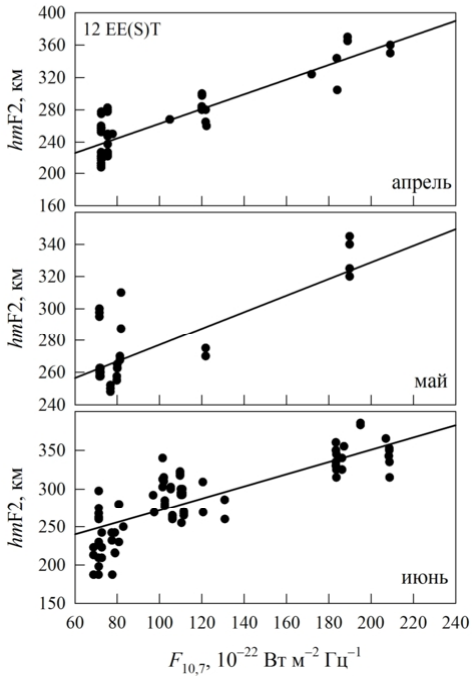

Рис. 2 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для апреля – июня для 12 EE(S)T

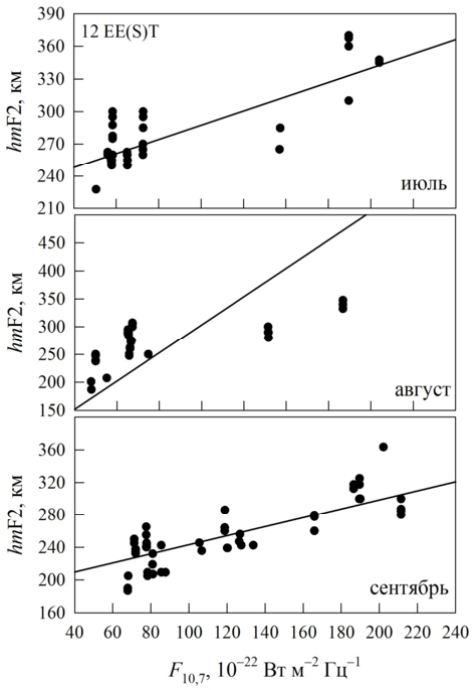

Рис. 3 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 12 EE(S)T

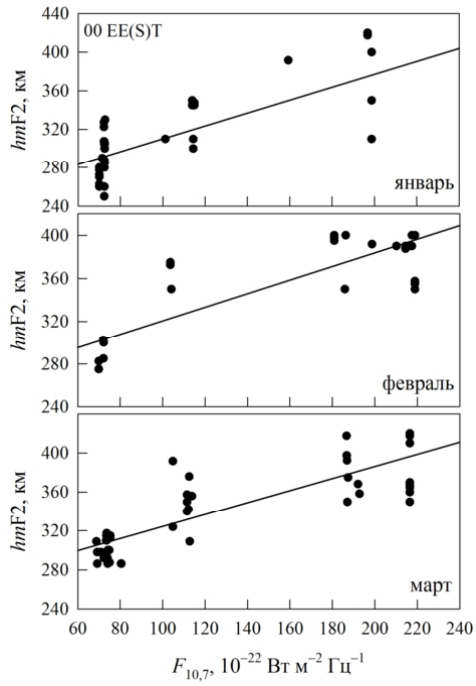

Рис. 5 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для января – марта для 00 EE(S)T

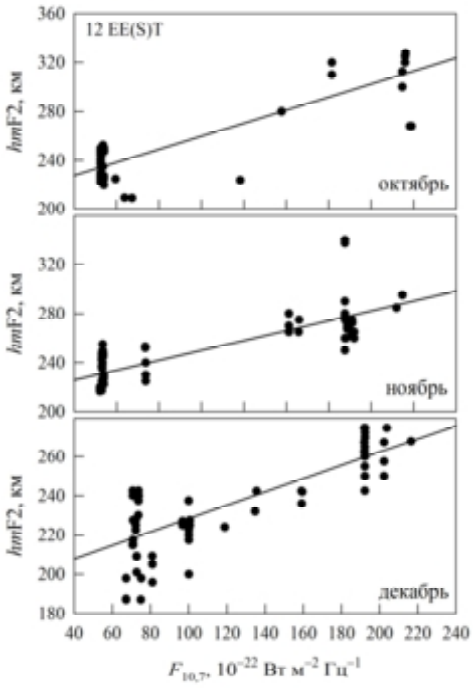

Рис. 4 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 12 EE(S)T

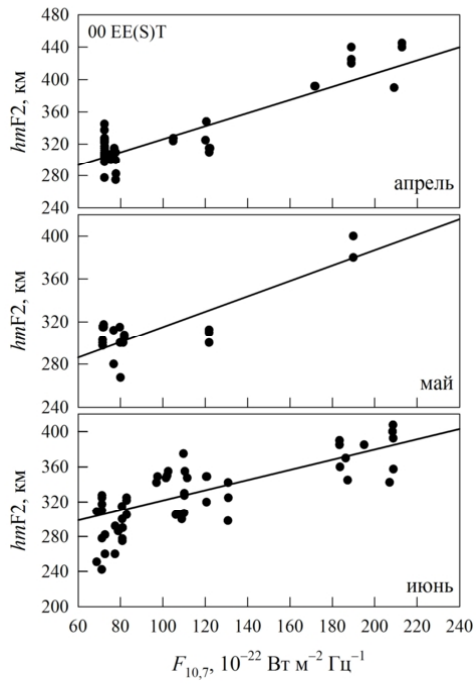

Рис. 6 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для апреля – июня для 00 EE(S)T

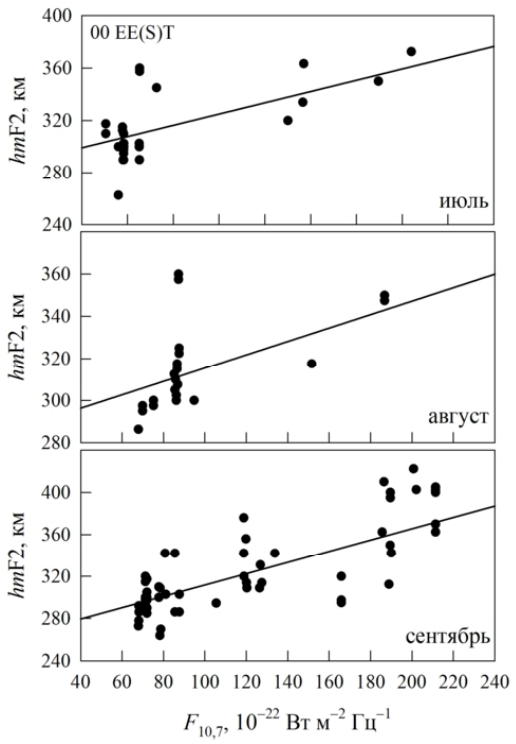

Рис. 7 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для июля – сентября для 00 EE(S)T

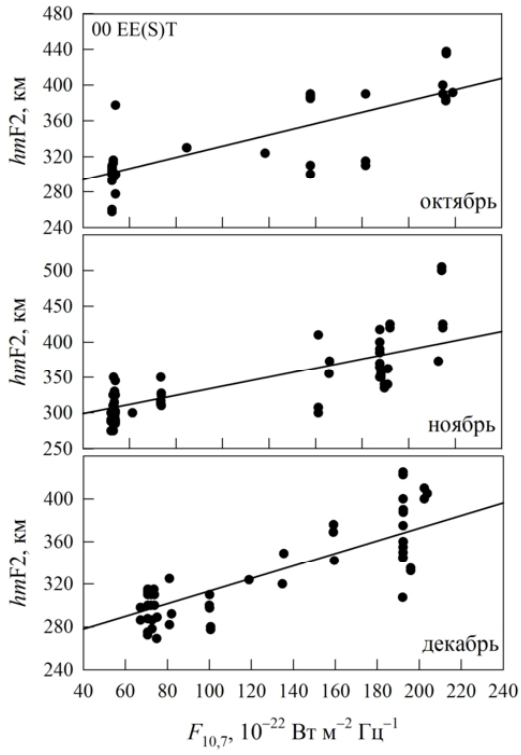

Рис. 8 – Регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности для октября – декабря для 00 EE(S)T

Таблица 1 – Коэффициенты регрессий и корреляции для соответствующих месяцев и 00 и 12 часов EE(S)T

	12 EE(S)T			00 EE(S)T		
месяц	a_0	a_1	r	a_0	a_1	r
январь	207,77	0,29	0,67	243,09	0,67	0,57
февраль	181,83	0,52	0,91	257,39	0,63	0,74
март	175,34	0,76	0,88	262,66	0,62	0,71
апрель	172,01	0,91	0,77	244,77	0,81	0,78
май	255,52	0,52	0,60	243,07	0,72	0,73
июнь	192,76	0,79	0,70	263,80	0,58	0,60
июль	208,68	0,66	0,71	273,30	0,43	0,54
август	196,57	0,73	0,49	283,56	0,32	0,29
сентябрь	187,51	0,56	0,69	258,02	0,54	0,55
октябрь	195,96	0,53	0,78	255,84	0,63	0,61
ноябрь	201,73	0,40	0,69	260,32	0,64	0,60
декабрь	194,40	0,34	0,66	254,22	0,59	0,66

Результаты сравнительного анализа. Ранее на основе измерений на радаре НР в Харькове были получены регрессионные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы от индекса солнечной активности [10]. В данном исследовании приведены регрессии для четырех сезонов – зима, лето, весеннее и осеннее равноденствия для полуденных и полуночных часов. Используя полученные ранее модельные зависимости [10] и результаты расчетов по модели CERIM IION (с учетом новых коэффициентов регрессий), выполнен сравнительный анализ модельных значений *hm*F2. Результаты модельных расчетов сравнивались с экспериментальными значениями высоты максимума области *hm*F2, полученными на радаре НР в Харькове в период минимума (2006 г.) и максимума (2012 г.) солнечной активности для характерных геофизических периодов – летнего и зимнего солнцестояний, осеннего и весеннего равноденствий. Для восстановления типичной формы суточных вариаций высоты максимума слоя F2 ионосферы использованы эмпирические зависимости, построенные на основе экспериментальных данных, полученных на сети среднеширотных станций ионосферного зондирования европейской части СССР [11].

На рис. 9 – 10 представлены модельные суточные зависимости высоты максимума области F2 ионосферы и экспериментальные результаты в период минимума и максимума солнечной активности.

Как показал сравнительный анализ, увеличение длины ряда экспериментальных данных (выбран временной период, охватывающий более трех циклов солнечной активности) привело к существенному уточнению расчетов высоты максимума области F2 ионосферы. Для некоторых месяцев года (например, для августа) как для полуденных, так и полуночных значений имеет место недостаток экспериментальных данных и, как следствие этого, получены малые значения коэффициента корреляции r (см. табл. 1).

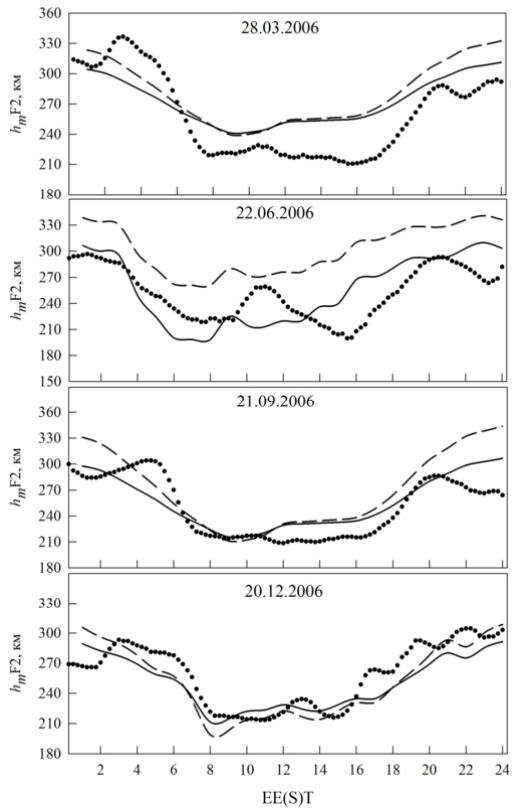

Рис. 9 – Сезонно-суточные вариации высоты минимума области F2 ионосферы в период минимума СА

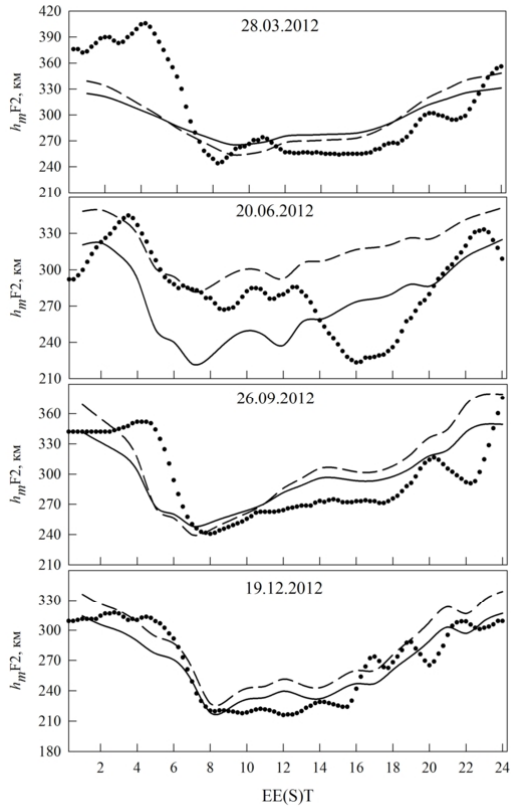

Рис. 10 – Сезонно-суточные вариации высоты максимума области F2 ионосферы в период максимума СА

Выводы. В результате проведенных исследований получены следующие результаты:

1. Выполнен статистический анализ экспериментальных данных высоты максимума области F2 ионосферы за период, охватывающий более трех циклов солнечной активности.

2. Построены регрессионные зависимости высоты слоя F2 *hm*F2 от индекса солнечной активности $F_{10,7}$ и получены соответствующие коэффициенты регрессий для каждого месяца года, 00 и 12 часов.

3. Полученные коэффициенты регрессий использованы для улучшения региональной модели ионосферы CERIM IION в рамках повышения точности расчета значений высоты слоя F2 в зависимости от уровня солнечной активности и сезона.

4. Выполнен сравнительный анализ полученных результатов моделирования с ранее полученными модельными расчетами и экспериментальными данными.

Список литературы

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci.– 2001.–Vol. 36, № 2.–P. 261–275.
2. *Picone J. M.* NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues / *J. M. Picone, Hedin A. E., D. P. Drob, A. C. Aikin* // J. Geophys. Res. – 2002. – Vol. 107, № A12. – P. 1 – 16.
3. *Брюнелли Б. Е.* Физика ионосферы / *Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе*. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
4. *Schunk R. W.* Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / *R. W. Schunk, A. F. Nagy*. – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
5. *Rishbeth H.* Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion / *H. Rishbeth, K. J. F. Sedgemore-Schulthess, T. Ulich* // Ann. Geophysicae. – 2000. – Vol. 18. – P. 945 – 956.
6. *Sethi N. K.* Diurnal and seasonal variations of h_mF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 / *N. K. Sethi, R. S. Dabas, V. K. Vohra* // Ann. Geophysicae. – 2004. – Vol. 22. – P. 453 – 458.
7. *Chernogor L. F.* Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database / *L. F. Chernogor, L. Ya. Emel'yanov, M. V. Lyashenko* // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
8. *Chernogor L.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) for Space Weather Forecasting / *L. Chernogor, I. Domnin, M. Lyashenko* // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
9. *Дзюбанов Д. А.* Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния / *Д. А. Дзюбанов, И. Г. Захаров, М. В. Ляшенко* // Космічна наука і технологія. – 2004. – Т. 10, № 2/3. – С. 28 – 35.
10. *Дзюбанов Д. А.* Анализ вариаций параметров F2-области в полуцикле солнечной активности / *Д. А. Дзюбанов, И. В. Соколова, А. Ф. Кононенко* // Вестник Харьковского политехнического института. Исследование ионосферы методом некогерентного рассеяния. – 1987. – Вып. 5, № 248. – С. 7 – 9.
11. *Фаткуллин М. Н.* Эмпирические модели среднеширотной ионосферы / *М. Н. Фаткуллин, Т. И. Зеленова, В. К. Козлов и др*. – М.: Наука, 1981. – 256 с.

References (transliterated)

1. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science*. 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
2. Picone J.M., Hedin A.E., Drob D.P., Aikin A.C. NRLMSISE-00 empirical model of the atmosphere: Statistical comparisons and scientific issues. *J. Geophys. Res*. 2002, vol. 107, no. A12. pp. 1 – 16.
3. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
4. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
5. Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K. J. F., Ulich T. Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion. *Ann. Geophysicae*. – 2000, vol. 18. pp. 945 – 956.
6. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of h_mF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001. *Ann. Geophysicae*. 2004, vol. 22. pp. 453 – 458.
7. Chernogor L. F., Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V. Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) Based On The Kharkov Incoherent Scatter Radar Database // 36th Annual European Meeting on Atmospheric Studies by Optical Methods.– Kyiv (17 – 22 August, 2009). – P. 38.
8. Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M. Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM IION) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
9. Dzjubanov D. A., Zaharov I. G., Ljashenko M. V. Modelirovanie poludennyh znachenij jelektronnoj koncentracii v maksimume oblasti F2 ionosfery po dannym Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejanija [Modeling midday values of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere according to the Kharkov incoherent scatter radar]. *Kosmichna nauka i tehnologija* [Space science and technology]. 2004, vol. 10, no. 2/3, pp. 28–35.
10. Dzjubanov D. A., Sokolova I. V., Kononenko A. F. Analiz variacij parametrov F2-oblasti v polucikle solnechnoj aktivnosti [Analysis of the variations in the parameters of the F2 region in the half-cycle of solar activity] // *Vestnik Har'kovskogo politehnicheskogo instituta. Issledovanie ionosfery metodom nekogerentnogo rassejanija* [Bulletin of the Kharkov Polytechnic Institute. Investigation of the ionosphere by the method of incoherent scattering]. 1987, issue 5, no. 248. pp. 7 – 9.
11. Fatkullin M. N., Zelenova T. I., Kozlov V. K. *Jempiricheskie modeli sredneshirotnoj ionosfery* [Empirical models of the mid-latitude ionosphere]. M.: Nauka, 1981, 256 p.

Поступила (received) 15.09.2017

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Регіональна модель іоносфери CERIM IION: розрахунок висоти максимуму шару F2 іоносфери / М. В. Ляшенко, О. В. Сидоренко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 51 – 56. – Бібліогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Региональная модель ионосферы CERIM IION: расчёт высоты максимума слоя F2 ионосферы / М. В. Ляшенко, А. В. Сидоренко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2017. – № 47 (1268). – С. 51 – 56. – Библиогр.: 11 назв. – ISSN 2078-9998.

Regional model of ionosphere CERIM IION: calculation of the maximum height of the ionospheric F2 layer / M. V. Lyashenko, A. V. Sydorenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 51 – 56. – Bibliogr.: 11. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ляшенко Михайло Володимирович – кандидат фізико-математичних наук, старший науковий співробітник, учений секретар Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Ляшенко Михаил Владимирович – кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник, ученый секретарь Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – Candidate of Physical and Mathematical Sciences, Senior Researcher, scientific secretary of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ya.ru.

Сидоренко Олександр Валентинович – інженер-електронік 1 категорії Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.

Сидоренко Александр Валентинович – инженер-электроник 1 категории Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.

Sydorenko Oleksandr Valentynovych – engineer-electronic of the 1st category of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: mr.sasha.s96@mail.ru.