

УДК 550.388.2

**М. В. ЛЯШЕНКО, И. Р. ШНИЦАР****ПРОСТРАНСТВЕННО-ВРЕМЕННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ИОНОСФЕРЕ В МИНИМУМЕ И МАКСИМУМЕ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Представлено результати експериментальних досліджень варіацій концентрації електронів в іоносфері за даними харківського радара некогерентного розсіяння, отриманих на фазах мінімуму (2006 – 2007 рр.) і максимуму (2012 – 2013 рр.) циклу сонячної активності. Виконано аналіз і фізична інтерпретація просторово-часових залежностей концентрації електронів. Представлено результати моделювання добових варіацій концентрації електронів в діапазоні висот 190 – 790 км в рамках розвитку регіональної моделі іоносфери CERIM ION.

**Ключові слова:** концентрація електронів, регіональна модель іоносфери, фази циклу сонячної активності

Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций концентрации электронов в ионосфере по данным харьковского радара некогерентного рассеяния, полученных на фазах минимума (2006 – 2007 гг.) и максимума (2012 – 2013 гг.) цикла солнечной активности. Выполнен анализ и физическая интерпретация пространственно-временных зависимостей концентрации электронов. Представлены результаты моделирования суточных вариаций концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM ION.

**Ключевые слова:** концентрация электронов, региональная модель ионосферы, фазы цикла солнечной активности

Results of experimental investigations of variation of electron concentration in ionosphere on Kharkiv incoherent scatter radar data obtained during the phases of the minimum (2006 – 2007) and the maximum (2012 – 2013) of the solar activity cycle are presented. Analysis and physical interpretation of spatial-temporal dependencies of the electron concentration variations were carried out. Modeling results of the diurnal variations of the electron concentration in the altitude range 190 – 790 km in the frame of CERIM ION regional model of ionosphere development are presented.

**Keywords:** electron concentration, regional model of ionosphere, phases of solar activity cycle

**Введение.** Исследование вариаций основных параметров околоземного космоса является одной из важных фундаментальных задач современной геофизики.

В настоящее время исследованиям, анализу и моделированию параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях посвящено довольно большое количество публикаций [см., например, 1 – 10, и ссылки в них]. Следует отметить, что особое внимание уделяется исследованию эффектов редких и уникальных событий в геокосмосе – сильнейших геокосмических бурь, затмений Солнца и др. [см., например, 11 – 14]. Однако изучение и физическая интерпретация поведения параметров геокосмической плазмы в магнитоспокойных условиях также не менее актуально, поскольку все возмущения разворачиваются на этом фоне. Полученные результаты также находят своё практическое применение, например, в развитии современных моделей ионосферы и построении новых эмпирических и полуэмпирических моделей геокосмоса.

**Целью работы** является анализ и физическая интерпретация пространственно-временных вариаций концентрации электронов в ионосфере на фазах минимума и максимума цикла солнечной активности в спокойных геомагнитных условиях, а также моделирование суточных вариаций концентрации электронов по данным харьковского радара некогерентного рассеяния (НР) в рамках развития региональной модели ионосферы CERIM ION.

**Средства и методы.** Радар некогерентного рассеяния. Радар НР Института ионосферы расположен вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.) и предназначен для исследования ионосферы в диапазоне высот 100 – 1500 км. Рабочая частота –

158 МГц. В качестве приемно-передающей антенны используется одна из наиболее крупных в мире двухзеркальная параболическая антенна зенитного излучения диаметром 100 м, выполненная по схеме Кассегрена. Эффективная площадь антенны – около 3700 м<sup>2</sup>. Поляризация излучаемого и принимаемого сигнала – круговая. Импульсная мощность передатчика до 3,6 МВт. Работа радара НР проводилась в режиме составного двухчастотного зондирующего сигнала с коротким (130 мкс) и длинным (около 660 мкс) радиоимпульсами, обеспечивающими высотное разрешение 20 и 100 км в диапазонах высот 100 – 550 км и 200 – 1000 км соответственно. Частота повторения 24,4 Гц. Параметры ионосферы определяются одновременно для ряда высот ионосферы по квадратурным составляющим комплексной корреляционной функции НР сигнала.

**Цифровой ионозонд.** Совместно с радаром НР использовался цифровой ионозонд, расположенный в Радиофизической обсерватории ХНУ имени В. Н. Каразина. Его основные параметры: диапазон частот 1 – 16 МГц, импульсная мощность до 1,5 кВт, длительность зондирующих радиоимпульсов 100 мкс, частота следования 125 Гц.

**Погрешности определения параметров ионосферы:** критической частоты  $f_oF2$  – 0,05 МГц, концентрации электронов  $N$  и температур ионов  $T_i$  и электронов  $T_e$  – 1 – 10 %, скорости движения плазмы  $V_z$  – 1 – 30 м/с в диапазоне высот 200 – 600 км в зависимости от высоты, времени суток и фазы цикла солнечной активности.

**Минимум солнечной активности.** На рис. 1. представлены суточные вариации концентрации электронов  $N$ , в периоды, близкие к весеннему

© М. В. Ляшенко, И. Р. Шницар, 2017

равноденствию в 2006 – 2007 гг.

Для весеннего равноденствия 2006 г. (см. рис. 1, *a*) концентрация электронов испытывала значительные суточные вариации. На высотах  $z \leq 240$  км в суточном ходе концентрации электронов наблюдалась протяженная область с наибольшими значениями  $N$  около 11 – 12 ЕЕТ. С увеличением высоты в суточном ходе  $N$  имела место тенденция к появлению вечернего максимума  $N$  около 20 – 21 ЕЕТ. Следует отметить, что на высотах  $z \geq 290$  км величина вечернего максимума сравнима с величиной дневного максимума.

Около полудня на высотах  $z = 210 - 240$  км абсолютные значения  $N = 0,5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . В ночные часы в этом диапазоне высот концентрация  $N$  принимала значение  $(0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . На высоте 490 км  $N = 0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  днем, в ночные часы  $N = 0,04 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 1, *б* представлены суточные вариации концентрации электронов в период весеннего равноденствия 2007 г. Как видно из рисунка, концентрация электронов испытывала значительные изменения в течение суток. На высотах 190 – 210 км в суточном ходе  $N$  имел место один хорошо выраженный максимум с максимальными значениями  $N$  близко полудня.

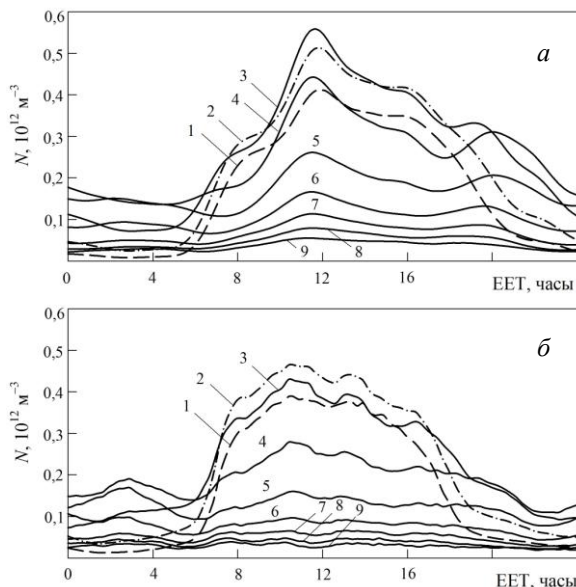


Рис. 1 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период весеннего равноденствия: *a* – 2006 г.; *б* – 2007 г. Здесь и далее на графиках цифрами обозначены высоты: 1 – 190 км; 2 – 210 км; 3 – 240 км; 4 – 290 км; 5 – 340 км; 6 – 410 км; 7 – 490 км; 8 – 580 км; 9 – 680 км

На больших высотах, где процессы переноса частиц и энергии преобладают над процессами фотохимии, в вариациях  $N$  имели место два максимума – околополуденный (11 – 12 ЕЕТ) и вечерний (19 – 20 ЕЕТ). Следует отметить, что на высотах  $z > 410$  км амплитуда этих максимумов становится примерно одинаковой.

На высотах 290, 340 и 490 км в дневное время концентрация электронов  $N = 3,1 \cdot 10^{11}$ ,  $1,8 \cdot 10^{11}$  и  $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  соответственно. В ночных условиях для  $z = 290$  км  $N = 1,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , для  $z = 340$  км –  $1,2 \cdot 10^{11}$  и  $0,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  на высоте 490 км.

На рис. 2 представлены высотно-суточные вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния в 2006 – 2007 гг.

На рис. 2, *a* представлены вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния 2006 г.

Хорошо известно, что поведение концентрации электронов на высотах ниже максимума области F2 ионосферы определяется, в основном, величиной зенитного угла Солнца. В этом случае в суточном ходе  $N$  наблюдается один хорошо выраженный максимум в околополуденные часы. На высотах вблизи максимума ионизации в дневное время величина  $N$  достигала значений  $0,6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в околополуночные часы  $N \approx (0,2 - 0,3) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Следует отметить, что суточных вариациях  $N$  на высотах  $z > 240$  км имели место два явно выраженных максимума в полуденные и вечерние (21 – 22 ЕЕСТ) часы. Также в суточных вариациях  $N$  наблюдалось локальное увеличение концентрации электронов в околополуночные и послеполуночные часы. Данный эффект, по-видимому, связан с поступлением плазмы из плазмосферы и действием нейтральных ветров в ночные часы [1, 3].

Суточные вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния 2007 г. имели достаточно сложный характер (см. рис. 2, *б*). На высотах  $z < 210$  км вариации  $N$  определялись, в основном, величиной зенитного угла Солнца. В этом случае, в суточном ходе  $N$  имел место максимум в околополуденные часы с дальнейшим уменьшением концентрации электронов в вечерние и ночные часы.

С ростом высоты в суточном ходе  $N$  имели место два максимума – в околополуденные часы и в вечернее время (около 22 ЕЕСТ). Следует отметить, что по амплитуде вечерний максимум превышает дневной.

В дневные часы на высотах  $z = 290, 340$  и 490 км концентрация  $N$  достигала величин  $2,3 \cdot 10^{11}$ ,  $1,7 \cdot 10^{11}$  и  $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  соответственно. Ночью на этих же высотах  $N \approx 2,4 \cdot 10^{11}$ ,  $1,7 \cdot 10^{11}$  и  $0,4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 3 представлены высотно-суточные вариации концентрации электронов в период осеннего равноденствия в 2006 – 2007 гг.

В период осеннего равноденствия 2006 г. концентрация электронов также испытывала значительные вариации в течение суток (рис. 3, *a*). Как и для весеннего равноденствия и летнего солнцестояния 2006 г. на высотах 210 – 240 км поведение  $N$  контролируется зенитным углом Солнца. Выше максимума ионизации основную роль в формировании области F ионосферы играют процессы переноса частиц и энергии.

На высотах максимума области F2 ионосферы в дневные часы  $N$  достигала значений  $(0,45 - 0,55) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , ночью (около 00 EEST)  $N = (0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 3, б приведены суточные вариации концентрации электронов в период осеннего равноденствия 2007 г. Данный период (24 – 27 сентября 2007 г.) характеризовался низкой солнечной и геомагнитной активностью. Индекс солнечной активности  $F_{10,7}$  не превышал 66 – 67 единиц. Индекс геомагнитной активности варьировался в диапазоне 3 – 15 единиц.

Суточные вариации концентрации электронов в рассматриваемый период имели достаточно сложный вид. Как и для других сезонов, на высотах ниже 210 км вариации  $N$  в рассматриваемый период определялись вариациями зенитного угла Солнца. Максимальные значения  $N$  приходились на 12 – 13 EEST. С ростом высоты в вариациях  $N$  наряду с околополуденным максимумом имеет место вечерний максимум (20 – 21 EEST). Также в ночное время наблюдалось локальное увеличение концентрации электронов, связанное с потоками плазмы с плазмосферы в ионосферу.

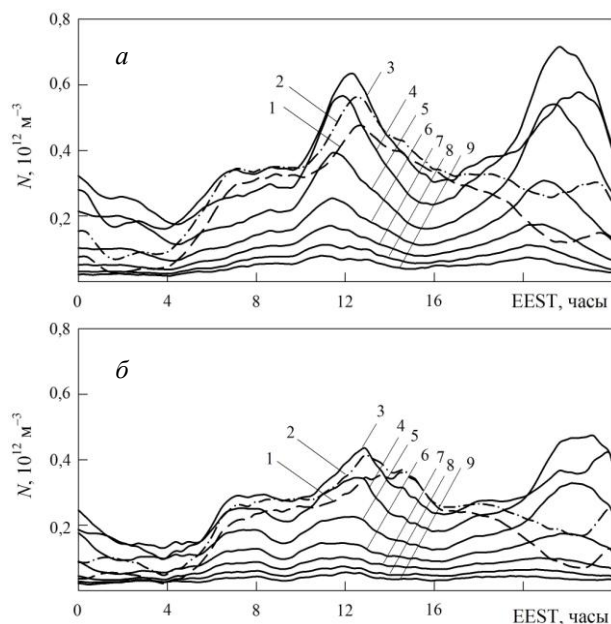


Рис. 2 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период летнего солнцестояния: а – 2006 г.; б – 2007 г.

Хорошо известным фактом в периоды равноденствия является переход от летнего типа суточных вариаций  $N$  к зимнему и наоборот. Как правило, такая перестройка продолжается около двух недель.

Как видно из рисунка, для осеннего равноденствия 2007 г., такой переход к зимнему типу суточных вариаций  $N$  еще не произошел. На этот факт указывает появление второго максимума в вечерние часы, что характерно для летних условий.

В околополуденные часы на высотах  $z = 290, 340$  и  $490$  км концентрация  $N = 3,4 \cdot 10^{11}, 2,1 \cdot 10^{11}$  и  $0,8 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  соответственно. В ночных условиях на рассматриваемых высотах  $N = 2,5 \cdot 10^{11}, 1,9 \cdot 10^{11}$  и  $0,6 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  соответственно.

На рис. 4, а представлены временные вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния 2006 г.

На высотах 210 и 240 км концентрация  $N$  в околополуденные часы достигала значений  $(0,5 - 0,6) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в ночное время  $N \approx (0,15 - 0,4) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . На высоте  $z = 490$  км  $N \approx 0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  вблизи полудня, ночью концентрация электронов уменьшалась до значений  $0,06 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

Днём на высотах 210 и 240 км концентрация электронов достигала значений примерно  $(0,4 - 0,45) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в околополуденные часы  $N \approx (0,05 - 0,1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  и  $(0,1 - 0,2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  для высот 210 и 240 км соответственно. На высоте  $z = 490$  км  $N$  не превышала значений  $0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  вблизи полудня и  $0,03 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  в ночное время.

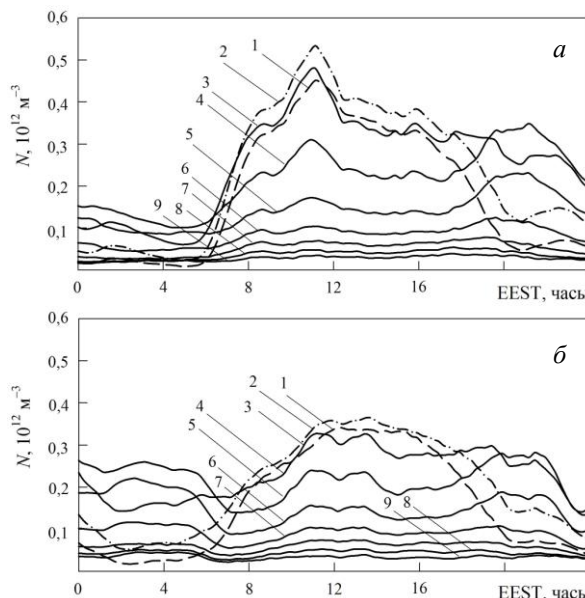


Рис. 3 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период осеннего равноденствия: а – 2006 г.; б – 2007 г.

Для 21 декабря 2006 г. на высотах 210 – 240 км в околополуденные часы  $N$  составляла примерно  $0,5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в ночные часы значения  $N$  на этих же высотах были на порядок меньше и не превышали  $0,05 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . На высоте 490 км  $N \approx 0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  в дневные часы, ночью  $N$  не превышала  $0,05 - 0,06 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Следует отметить, что для 20 декабря на высотах 210 – 240 км значения  $N$  были примерно на 15 – 20 % больше значений 21 декабря в околополуденные часы.

На рис. 4, б представлены суточные вариации концентрации электронов на фиксированных высотах в период, близкий к зимнему солнцестоянию 2007 г.

Поведение концентрации электронов в рассматриваемый период является типичным для зимнего сезона. Так, на всех высотах около полудня часа имел место один, хорошо выраженный максимум со значениями  $N = 4,5 \cdot 10^{11}$  и  $3,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$  на высотах 210 и 240 км соответственно, в ночные часы на этих же высотах  $N = 0,8 \cdot 10^{11}$  и  $1,3 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ . На высоте  $z = 490$  км днем  $N = 0,5 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ , ночью –  $0,4 \cdot 10^{11} \text{ м}^{-3}$ .

Следует также отметить появление локальных максимумов в суточных вариациях  $N$  после полуночи на высотах в области F2 ионосферы. Значение  $N$  в этих случаях могут превышать величину концентрации электронов в дневные часы.

**Максимум солнечной активности.** Рассмотрим высотно-суточные вариации концентрации электронов в ионосфере, которые наблюдались с помощью радара HP в Харькове в периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям в 2012 – 2013 гг. Рассматриваемый временной период соответствует фазе максимума 24-го цикла солнечной активности.

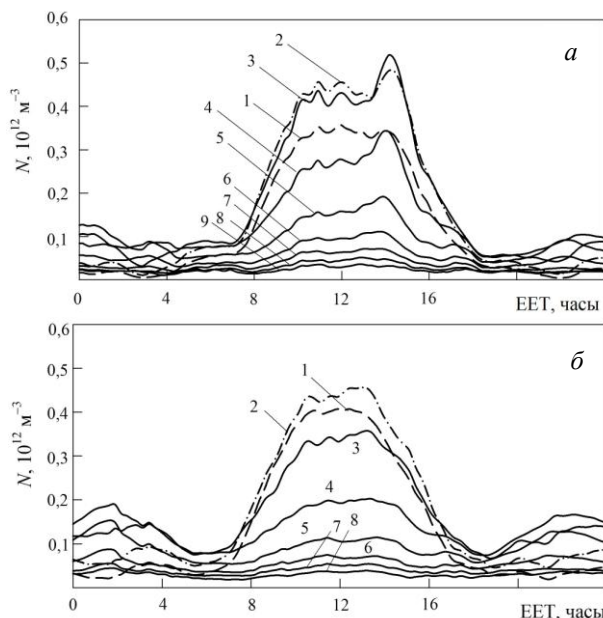


Рис. 4 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период зимнего солнцестояния: а – 2006 г.; б – 2007 г.

На рис. 5, а представлены суточные вариации концентрации электронов для 28 марта 2012 г. в диапазоне высот 190 – 680 км. Как видно из рисунка, в диапазоне высот 190 – 210 км в суточных зависимостях  $N$  имел место один максимум в 14 EET. С ростом высоты вариации  $N$  приобретали сложный характер. Так, в суточном ходе концентрации электронов появлялся второй максимум в окрестности 19 – 20 EET, а также имело место увеличение концентрации электронов после полуночи, связанное с потоками частиц, поступающих в ионосферу в месте наблюдения из магнитосопряженной области.

Около полудня на высотах 210 и 410 км

абсолютные значения концентрации электронов составляли  $0,46 \cdot 10^{12}$  и  $0,26 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  соответственно. В ночные часы на высоте  $z = 210$  км концентрация  $N$  принимала значения примерно  $0,096 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , а на высоте  $z = 410$  км  $N = 0,085 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 5, б приведены временные вариации  $N$  для 20 марта 2013 г. Форма суточных зависимостей  $N$  для данного периода подобная для весеннего равноденствия 2012 г. На высотах 190 и 210 км имел место довольно пологий максимум около полудня. Далее, с ростом высоты в суточных вариациях появлялись четко выраженные максимумы в вечерние часы (19 – 20 EET).

В околополуденные часы на высотах  $z = 210$  и 240 км концентрация  $N$  достигает значений  $0,63 \cdot 10^{12}$  и  $0,31 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  соответственно. В околополуночные часы  $N \approx 0,093 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  на высоте 210 км, а на  $z = 410$  км концентрация электронов  $N \approx 0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 6 представлены суточные вариации параметров ионосферы для периодов, близких к периоду летнего солнцестояния в 2012 – 2013 гг.

Для периода летнего солнцестояния 2012 г. (см. рис. 6, а) вариации концентрации электронов всем рассматриваемом высотном диапазоне имели довольно сложный характер. На высотах 190 – 210 км, в суточных вариациях  $N$  два хорошо выраженных максимума – утренний (08 EEST) и послеполуденный (15 – 16 EEST). С ростом высоты амплитуда данных максимумов увеличивается и в суточном ходе концентрации электронов появляется еще один максимум около 20 – 21 EEST. Причем следует отметить, что амплитуда этого максимума более амплитуды утреннего и вечернего максимумов.

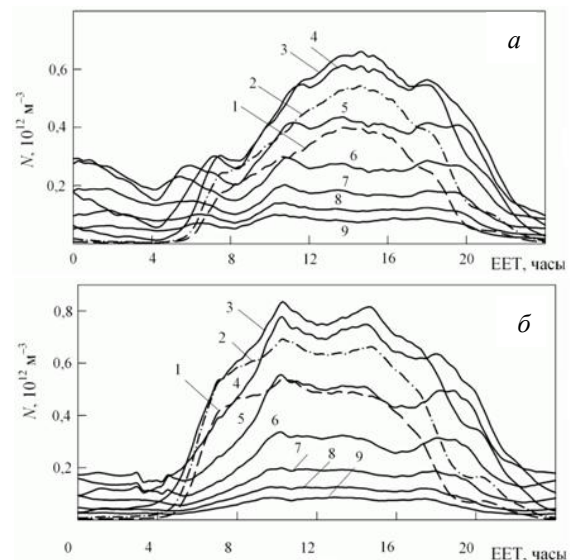


Рис. 5 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период весеннего равноденствия: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На высоте 210 км в околополуденные часы  $N = 0,38 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , ночью на рассматриваемой высоте  $N = 0,078 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . На высоте  $z = 410$  км  $N = 0,03 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  в 12 EEST, в ночных условиях значение концентрации



электронов на данной высоте не превышали  $0,31 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 6, б представлены суточные вариации концентрации электронов в период летнего солнцестояния в 2013 г.

Вариации  $N$  в период летнего солнцестояния 2013 г. подобные вариации концентрации электронов в 2012 г. Также, суточные зависимости  $N$  имели достаточно сложный характер. В диапазоне высот 190 – 210 км в суточном ходе концентрации электронов имели место утренний (08 – 09 EEST) и послеполуденный (15 – 16 EEST) максимумы. С ростом высоты форма суточных вариаций концентрации электронов усложнялась. Также как и для летнего периода 2012 г., наблюдался вечерний максимум примерно в 21 – 22 EEST.

В дневные часы на высотах  $z = 210$  и  $410$  км концентрация электронов достигала значений  $0,32 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Около полудня на  $z = 210$  км  $N = 0,05 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  и  $N = 0,38 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  на высоте  $410$  км.

На рис. 7 приведены суточные вариации параметров ионосферы периода, близкого к осеннему равноденствию в 2012 – 2013 гг.

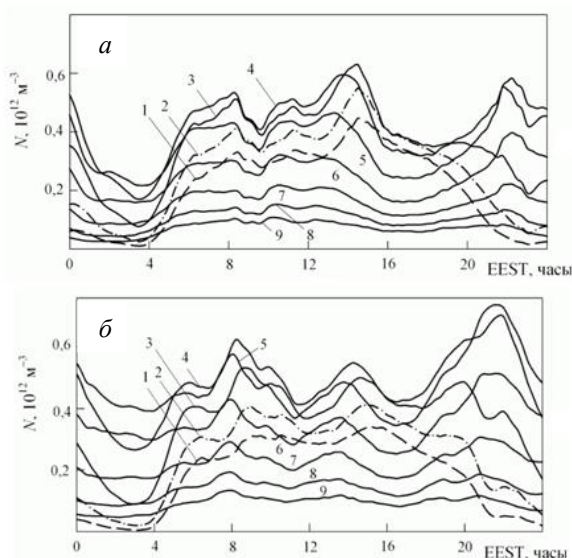


Рис. 6 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период летнего солнцестояния: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На рис. 7, а представлены суточные вариации концентрации электронов в период, близкий к осеннему равноденствию 2012 г. На высотах 190 – 210 км форма суточных вариаций  $N$  подобна. Как видно из рисунка, на указанных высотах в суточном ходе  $N$  имел место один максимум около полудня (11 – 12 EEST). С ростом высоты наблюдается искажение существующей формы суточного хода и небольшой рост концентрации электронов примерно в 17 – 16 EEST, а также появление вечернего максимума на больших высотах (около 20 – 21 EEST).

На высотах 240 и 410 км в дневные часы  $N = 0,93 \cdot 10^{12}$  и  $0,53 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  соответственно.

В околополуденные часы на рассматриваемых высотах концентрация электронов достигала значений  $0,013 \cdot 10^{12}$  и  $0,25 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

Вариации концентрации электронов в период осеннего равноденствия 2013 г. представлены на рис. 7, б.

Как видно из рисунка, в суточном ходе концентрации электронов имел место один максимум около полудня на высотах 190 и 210 км. На больших высотах наблюдалось смещение этого максимума на более поздние часы (15 – 16 EEST). Также следует отметить локальное увеличение концентрации электронов на высотах 240 – 340 км в ночные часы (около 02 EEST). По сравнению с 2012 г. концентрация электронов в 2013 г. уменьшилась, что связано с уменьшением интенсивности ионизирующего излучения Солнца и переходом в фазу спада солнечной активности. Так, на высоте 210 км в дневные часы  $N$  уменьшилась примерно на 30 и 47% на высоте 210 и 410 км соответственно по сравнению с периодом осеннего равноденствия в 2012 г.

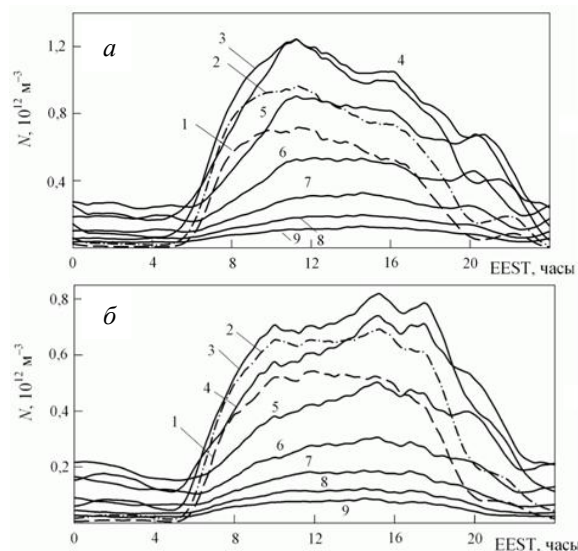


Рис. 7 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период осеннего равноденствия: а – 2012 г.; б – 2013 г.

На высотах  $z = 210$  и  $410$  км в околополуденные часы концентрация электронов в ионосфере достигала значений  $0,65 \cdot 10^{12}$  и  $0,28 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  соответственно. В полуденные часы  $N = 0,04 \cdot 10^{12}$  и  $0,13 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  соответственно на высоте 210 и 410 км.

На рис. 8 приведены временные вариации параметров ионосферы в период, близкий к зимнему солнцестоянию в 2012 – 2013 гг.

На рис. 8, а представлены высотно-суточные зависимости концентрации электронов для 19 декабря 2012 г. Как видно из рисунка, в суточном ходе  $N$  практически во всем рассматриваемом диапазоне высот наблюдался один максимум около полудня, с последующим уменьшением концентрации

электронов в вечерние часы и локальным увеличением  $N$  около 14 – 15 ЕЕТ.

Также в суточных зависимостях  $N$  после полночи имело место локальное повышение концентрации электронов, связанное с потоками частиц, поступающих из плазмосферы в ионосферу.

Днем на высоте  $z = 210$  км концентрация электронов не превышала значений  $0,61 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в ночные часы  $N = 0,036 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . Как видно из рис. 8, *a* в дневные часы на высоте  $z = 410$  км  $N = 0,13 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ . В ночное время концентрация электронов на данной высоте достигала значений примерно  $0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

На рис. 8, *б* представлены суточные вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния в 2013 г. Как и для периода зимнего солнцестояния 2012 г., в суточных вариациях  $N$  в декабре 2013 г. имел место один максимум примерно в 11 – 12 ЕЕТ. Далее концентрация электронов уменьшалась до фоновых ночных значений. Также как и в декабре 2012 г., после полуночи наблюдалось локальное увеличение  $N$ .

В дневные часы на высоте 210 км  $N = 0,91 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , в ночных условиях  $N$  не превышала значений  $0,02 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$  на рассматриваемой высоте. На высоте 410 км в дневные часы концентрация достигала значений  $N = 0,27 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ , после полуночи  $N = 0,07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ .

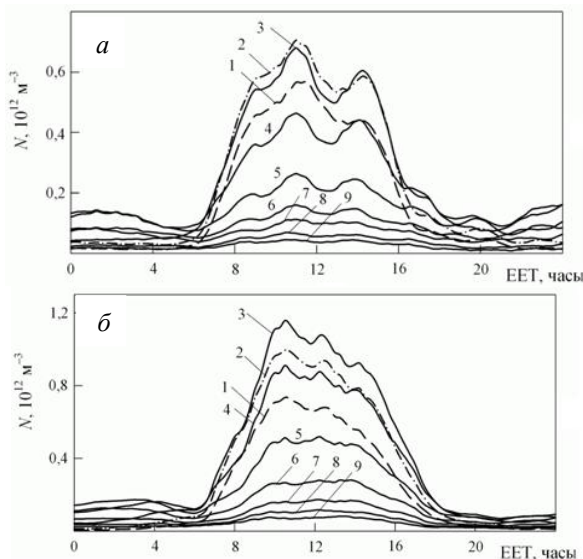


Рис. 8 – Временные вариации концентрации электронов в ионосфере в период зимнего солнцестояния: *a* – 2012 г.; *б* – 2013 г.

**Построение модельных высотно-суточных зависимостей концентрации электронов.** Для получения модельных зависимостей концентрации электронов использованы экспериментальные данные, полученные на радаре НР в Харькове в период с 2006 по 2013 гг. Суточные хода концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км группировались по сезонам и уровню солнечной активности и далее усреднялись. Усредненные суточные зависимости  $N$

на соответствующих высотах пересчитывались в отн. ед. с помощью следующего выражения:

$$K(t) = [N(t) - N(0)] / [N(12) - N(0)], \quad (1)$$

где  $K(t)$  – коэффициент пересчета;  $N(t)$  – концентрация электронов в конкретное время суток;  $N(0)$  – концентрация электронов в полночь;  $N(12)$  – концентрация электронов в полдень.

Из полученных высотно-суточных зависимостей  $K(t)$  получали модельные высотные профили концентрации электронов для 00 и 12 часов в отн. ед. На рис. 9 представлен пример высотных профилей  $N$  в полдень и полночь для весеннего равноденствия в максимуме СА.

В результате для расчета высотно-суточных зависимостей концентрации электронов формируются два входных массива: 1) высотные профили  $N$  в отн. ед. для 00 и 12 часов для максимума и минимума солнечной активности и характерных геофизических периодов (равноденствий и солнцестояний); 2) суточные хода  $N$  в отн. ед. в диапазоне высот 190 – 790 км.

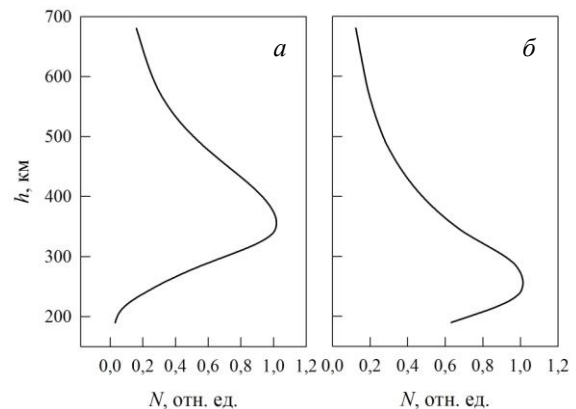


Рис. 9 – Высотные профили концентрации электронов в отн. ед. в период весеннего равноденствия в максимуме солнечной активности для: *a* – полуночи; *б* – полдня

**Результаты моделирования пространственно-временных вариаций концентрации электронов.** Региональная модель ионосферы CERIM ПОН позволяет рассчитывать значения концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы  $NmF2$  для разных сезонов и конкретного значения индекса солнечной активности  $F_{10,7}$  для 00 и 12 часов [15 – 17]. Для восстановления высотных профилей концентрации электронов, полученных выше, использовались значения  $NmF2$ , рассчитанные по модели CERIM ПОН. Для рассмотренных сезонов и фаз цикла солнечной активности получены соответствующие высотные зависимости  $N$  в абс. ед.

Далее, используя полученные высотные профили и массив модельных суточных зависимостей концентрации электронов в отн. ед., проводился пересчет уже суточных вариаций  $N$  в диапазоне высот 190 – 790 км в абс. ед. Пересчет концентрации из отн.

ед. в абс. ед. осуществлялся с использованием следующего выражения:

$$N(t) = N(0) + [N(12) - N(0)] \cdot K(t),$$

где  $N(0)$  и  $N(12)$  – концентрация электронов в 00 и 12 часов на соответствующей высоте, полученная из модельного высотного профиля  $N$ ;  $K(t)$  – коэффициент пересчета в отн. ед. из (1) на соответствующей высоте.

На рис. 10 приведен пример восстановленного высотного профиля концентрации электронов в абсолютных единицах в период, близкий к весеннему равноденствию в максимуме солнечной активности для 09 и 15 часов.

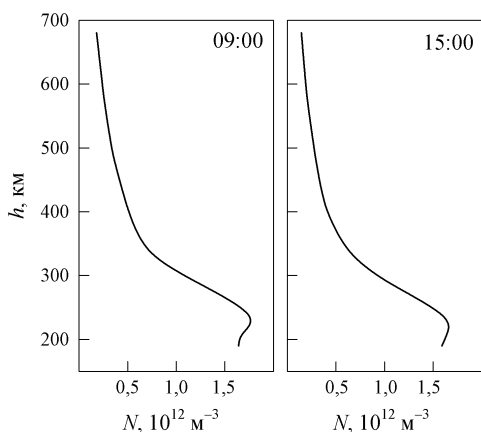


Рис. 10 – Высотные профили концентрации электронов в период весеннего равноденствия в максимуме солнечной активности, рассчитанные по модели CERIM ИОН

На рис. 11 приведен пример расчета суточного хода концентрации электронов на высотах 210 и 490 км для характерных геофизических периодов в максимуме и минимуме солнечной активности.

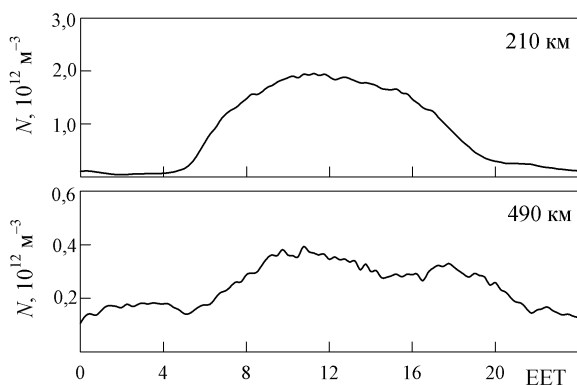


Рис. 11 – Модельные суточные зависимости концентрации электронов для периода весеннего равноденствия в максимуме CA, рассчитанные по модели CERIM ИОН

**Выводы.** В работе проанализированы вариации концентрации электронов в максимуме и минимуме

солнечной активности для характерных геофизических периодов. В ходе анализа выявлены основные закономерности в поведении концентрации заряженных частиц в области F2 ионосферы на экстремальных фазах цикла солнечной активности. Рассмотренные экспериментальные суточные зависимости концентрации электронов в диапазоне высот 190 – 790 км можно использовать для получения усредненных суточных ходов для дальнейшего развития региональной модели ионосферы CERIM ИОН. Подход, который применяется для моделирования суточных ходов концентрации электронов, себя полностью оправдывает и полученные результаты модельных расчетов свидетельствуют о том, что региональная модель ионосферы CERIM ИОН достаточно адекватно восстанавливает пространственно-временную структуру концентрации частиц в ионосфере в широком диапазоне высот. Модельные зависимости имеют типичные формы суточных вариаций концентрации электронов на соответствующих высотах. Модельные вариации концентрации частиц также отражают сезонные особенности и зависимость от уровня солнечной активности. Однако, несмотря на достаточно оптимистичные результаты, необходимо дальнейшее накопление экспериментального материала, который будет использован для развития и улучшения региональной модели ионосферы CERIM ИОН.

**Список литературы**

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.
2. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere / K. S. W. Champion // J. Atmos. Terr. Phys. – 1975. – vol. 37, no. 6/7. – P. 915–926.
3. Schunk R. W. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry / R. W. Schunk, A. F. Nagy.–Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
4. Chernogor L. F. Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 / L. F. Chernogor, I. F. Domin, L. Ya. Emelyanov, S. V. Katsko, D. V. Kotov, M. V. Lyashenko, S. V. Panasenko // Space research in Ukraine. 2012–2014 / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2014. – P. 20 – 27.
5. Chernogor L. Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 / L. Chernogor, I. Domin, L. Emelyanov, S. Katsko, D. Kotov, M. Lyashenko, S. Panasenko // Space research in Ukraine. 2014 – 2016 / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2016. – 136 p.
6. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth // J. Atmos. Solar-Terr. Phys. – 1998. – vol. 60. – P. 1385–1402.
7. Rishbeth H. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer / H. Rishbeth, I. C. F. Müller-Wodarg // Ann. Geophysicae. – 2006. – vol. 24. – P. 3293–3311.
8. Burmaka V. Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine / V. Burmaka, L. Chernogor, I. Domin, E. Grigorenko, M. Lyashenko // Space Research in Ukraine 2008 – 2010 / The Report to the COSPAR. Kyiv, 2011. – P. 22 – 30.
9. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 / D. Bilitza // Radio Science. – 2001. – vol. 36, no. 2. – P. 261–275.
10. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). International Reference Ionosphere – IRI-2012. Режим доступа: [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html). Дата обращения: 10.10.2017.

11. *Immel T. J.* The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results / *T. J. Immel, G. Liu, S. L. England, L. P. Goncharenko, P. J. Erickson, M. V. Lyashenko, M. Milla, J. Chau, H. U. Frey, S. B. Mende, Q. Zhou, A. Stromme* // *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* – 2015. – vol. 134. – P. 47–55. – doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
12. *Chernogor L. F.* Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv / *L. F. Chernogor, Ye. I. Grigorenko, M. V. Lyashenko* // *International Journal of Remote Sensing.* – 2011. – vol. 32, № 11. – P. 3219–3229.
13. *Domnin I. F.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations / *I. F. Domnin, L. Ya. Yemelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor* // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2013. – vol. 53, No. 1. – P. 113–123. – doi: 10.1134/S0016793213010076.
14. *Domnin I. F.* Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results / *I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor* // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2014. – vol. 54, № 5. – P. 583 – 592. – doi: 10.1134/S0016793214040112.
15. *Chernogor L. F.* Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) 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.
16. *Chernogor L.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) 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.
17. *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.
7. *Rishbeth H., Müller-Wodarg I. C. F.* Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer. *Ann. Geophysicae.* 2006, vol. 24, pp. 3293–3311.
8. *Burmaka V., Chernogor L., Domnin I., Grigorenko E., Lyashenko M.* Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine // *Space Research in Ukraine 2008 – 2010 / The Report to the COSPAR.* Kyiv, 2011, pp. 22 – 30.
9. *Bilitza D.* International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
10. *Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO).* International Reference Ionosphere – IRI-2012. Available at: [http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012\\_vitmo.html](http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html). (accessed 10.10.2017).
11. *Immel T. J., Liu G., England S. L., Goncharenko L. P., Erickson P. J., Lyashenko M. V., Milla M., Chau J., Frey H. U., Mende S. B., Zhou Q., Stromme A., Paxton L. J.* The August 2011 URSI World Day campaign: Initial results. *J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 134, pp. 47–55, doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
12. *Chernogor L. F., Grigorenko Ye. I., Lyashenko M. V.* Effects in the geospace during partial solar eclipses over Kharkiv. *International Journal of Remote Sensing.* 2011, vol. 32, no. 11, pp. 3219–3229.
13. *Domnin I. F., Yemelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F.* Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2013, vol. 53, no. 1, pp. 113–123, doi: 10.1134/S0016793213010076.
14. *Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Lyashenko M. V., Chernogor L. F.* Partial solar eclipse of January 4, 2011 above Kharkiv: observation and simulation results. *Geomagnetism and Aeronomy.* 2014, vol. 54, no. 5, pp. 583–592, doi: 10.1134/S0016793214040112.
15. *Chernogor L. F., Emel'yanov L. Ya., Lyashenko M. V.* Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) 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.
16. *Chernogor L., Domnin I., Lyashenko M.* Development of Central Europe Regional Ionospheric Model (CERIM ION) for Space Weather Forecasting // EGU General Assembly 2010 (Vienna, Austria, 02–07 May 2010). Geophysical Research Abstract.–Vol. 12, EGU2010-316-2, 2010.
17. *Dzjubanov D. A., Zaharov I. G., Lyashenko M. V.* Modelirovanie poludennyh znachenij jelektronnoj koncentracii v maksimume oblasti F2 ionosfery po dannym Har'kovskogo radara nekogerentnogo rassejaniya [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.

## References (transliterated)

1. *Brjunelli B. E., Namgaladze A. A.* *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
2. *Champion K. S. W.* Dynamics and structure of the quiet thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 1975. – vol. 37, No. 6/7. – P. 915–926.
3. *Schunk R. W., Nagy A. F.* *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry.* Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
4. *Chernogor L. F., Domnin I. F., Emelyanov L. Ya., Katsko S. V., Kotov D. V., Lyashenko M. V., Panasenko S. V.* Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 // *Space research in Ukraine. 2012–2014* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2014, pp. 20 – 27.
5. *Chernogor L., Domnin I., Emelyanov L., Katsko S., Kotov D., Lyashenko M., Panasenko S.* Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 // *Space research in Ukraine. 2014 – 2016* / Ed. O. Fedorov. K.: Akadempriodyka, 2016, 136 p.
6. *Rishbeth H.* How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / *H. Rishbeth.* *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, vol. 60, pp. 1385–1402.

## Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

**Просторово-часові варіації концентрації електронів в іоносфері в мінімумі та максимумі сонячної активності / М. В. Ляшенко, І. Р. Шніцар** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 24 – 32. – Бібліогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

**Пространственно-временные вариации концентрации электронов в ионосфере в минимуме и максимуме солнечной активности / М. В. Ляшенко, И. Р. Шницар** // Вестник НТУ «ХПИ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2017. – № 47 (1268). – С. 24 – 32. – Библиогр.: 17 назв. – ISSN 2078-9998.

**The spatial-temporal variations of the electron concentration in ionosphere in minimum and maximum of solar activity / M. V. Lyashenko, I. R. Shnitsar** // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2017. – No. 47 (1268). – P. 24 – 32. – Bibliogr.: 17. – ISSN 2078-9998.

Поступила (received) 15.09.2017



*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@ua.ru.

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

**Шницар Ігор Романович** – інженер-електронік 1 категорії Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.

**Шницар Игорь Романович** – инженер-электроник 1 категории Института ионосферы НАН и МОН Украины, г. Харьков; тел.: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.

**Shnitsar Igor Romanovych** – engineer-electronic of the 1<sup>st</sup> category of Institute of ionosphere of NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 706-22-87; e-mail: ishnicar1@gmail.com.