

УДК 550.388.2

М. В. ЛЯШЕНКО, Н. С. ЛЯШЕНКО**ЭФФЕКТЫ СЕЗОННОЙ И ПОЛУГОДОВОЙ АНОМАЛИЙ В ВАРИАЦИЯХ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В МАКСИМУМЕ ОБЛАСТИ F2 ИОНОСФЕРЫ НА РАЗНЫХ ФАЗАХ ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Представлено результати експериментальних досліджень варіацій концентрації електронів в максимумі області F2 іоносфери за даними іонозонда "Базис". Проведено аналіз і фізична інтерпретація ефектів сезонної та піврічної аномалій в варіаціях концентрації електронів N_m на різних фазах циклу сонячної активності. Приведено результати порівняльного аналізу розрахунків N_m за глобальною моделлю іоносфери IRI-2012, регіональною моделлю іоносфери CERIM ION та експериментальними даними іонозонда "Базис".

Ключові слова: концентрація електронів, сезонна аномалія, піврічна аномалія, модель іоносфери, фази циклу сонячної активності

Представлены результаты экспериментальных исследований вариаций концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы по данным ионозонда "Базис". Выполнен анализ и физическая интерпретация эффектов сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов N_m на разных фазах цикла солнечной активности. Приведены результаты сравнительного анализа расчетов N_m по глобальной модели ионосферы IRI-2012, региональной модели ионосферы CERIM ION и экспериментальными данными ионозонда "Базис".

Ключевые слова: концентрация электронов, сезонная аномалия, полугодовая аномалия, модель ионосферы, фазы цикла солнечной активности

Results of experimental investigations of variation of electron concentration in the maximum of F2 region of ionosphere on ionosonde "Basis" data are presented. Analysis and physical interpretation of seasonal and semi-annual anomaly effects in the N_m electron concentration variations on different phases of the solar activity cycle were carried out. Results of the comparative analysis of the N_m calculations from IRI-2012 global ionospheric model and CERIM ION regional model of ionosphere and the ionosonde "Basis" experimental data are presented.

Keywords: electron concentration, seasonal anomaly, semi-annual anomaly, 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 – 12 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, 13 – 18]. Однако изучение и физическая интерпретация поведения параметров геокосмической плазмы в магнитоспокойных условиях 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 полумпирических моделей геокосмоса.

Целью данной работы является наблюдение, анализ и физическая интерпретация эффектов сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах 23-го и 24-го циклов солнечной активности для характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

Средства и методы. В работе использованы экспериментальные данные о критической частоте слоя F2 ионосферы f_oF_2 , полученные с помощью ионозонда "Базис", расположенного в Ионосферной обсерватории Института ионосферы. Характеристики

ионозонда следующие: диапазон частот 1 – 40 МГц, эффективная мощность 1 – 10 кВт, длительность импульса 50 – 100 мкс, диапазон исследуемых высот 100 – 400 км. Погрешность получения f_oF_2 составляет 0.05 МГц (или 0.5 – 1 % для $f_oF_2 = 10 – 5$ МГц соответственно). Для расчёта значений концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы использовано следующее соотношение (f_oF_2 в МГц):

$$N_m = 1.24 \cdot 10^{10} \cdot (f_oF_2)^2.$$

Гелиогеофизическая обстановка. В табл. 1 приведены сведения о геомагнитной и солнечной активностях для рассматриваемых периодов. В таблице представлены значения индекса солнечной активности – потока декаметрового излучения Солнца на длине волны 10.7 см – $F_{10.7}$; индекса $\langle F_{10.7} \rangle$, усредненного за три оборота Солнца; индекса геомагнитной активности A_p . В целом, для рассмотренных периодов имела место спокойная гелиогеофизическая обстановка.

Результаты эксперимента. Фаза спада солнечной активности. На рис. 1 представлены суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе спада 23-го цикла солнечной активности в периоды весеннего и осеннего равноденствий, летнего и зимнего солнцестояний.

Как видно из рисунка, в суточных вариациях концентрации электронов в период, близкий к зимнему солнцестоянию, имеет место хорошо выраженный максимум в околополуденные часы со значениями $N_m \approx 0,77 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночных условиях концентрация электронов в максимуме слоя F2 ионосферы не превышает $0,14 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

© М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко, 2016

В период летнего солнцестояния суточные изменения N_m имели следующий вид. Рост концентрации электронов наблюдался примерно с 0400 EEST. Далее в интервале 0800 – 2400 EEST концентрация N_m достигала своих максимальных значений $(0,55 - 0,6) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, с последующим уменьшением до фоновых ночных значений $N_m \approx 0,24 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из рисунка, в сезонных вариациях концентрации электронов хорошо проявились эффекты сезонной аномалии. Так, в околополуденные часы зимой значения N_m превышали летние примерно в 1,4 раза.

Таблица 1 – Индексы геомагнитной и солнечной активностей для рассматриваемых периодов

Дата	$F_{10,7}$	$\langle F_{10,7} \rangle$	A_p
<i>Спад сонечної активності</i>			
30.03.2004 г.	126	104	14
16.06.2004 г.	115	110	7
14.09.2004 г.	116	106	32
17.12.2003 г.	113	119	7
<i>Мінімум сонечної активності</i>			
24.03.2010 г.	84	80	3
23.06.2010 г.	77	78	3
21.09.2010 г.	85	81	4
22.12.2010 г.	75	81	1
<i>Ріст сонечної активності</i>			
28.03.2012 г.	107	113	15
20.06.2012 г.	107	131	3
26.09.2012 г.	140	119	6
19.12.2012 г.	110	118	5
<i>Максимум сонечної активності</i>			
20.03.2013 г.	107	113	9
25.06.2014 г.	100	132	5
24.09.2014 г.	146	145	21
18.12.2014 г.	206	159	5

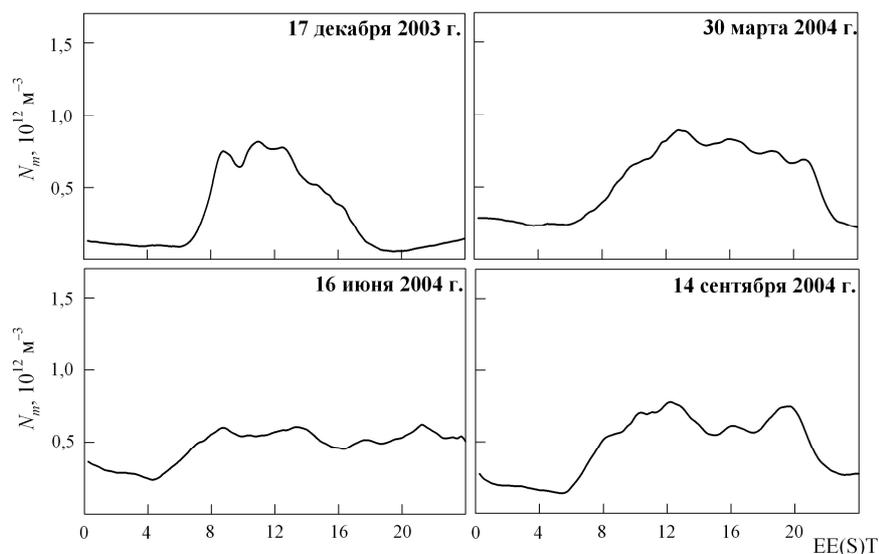


Рис. 1 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе спада солнечной активности

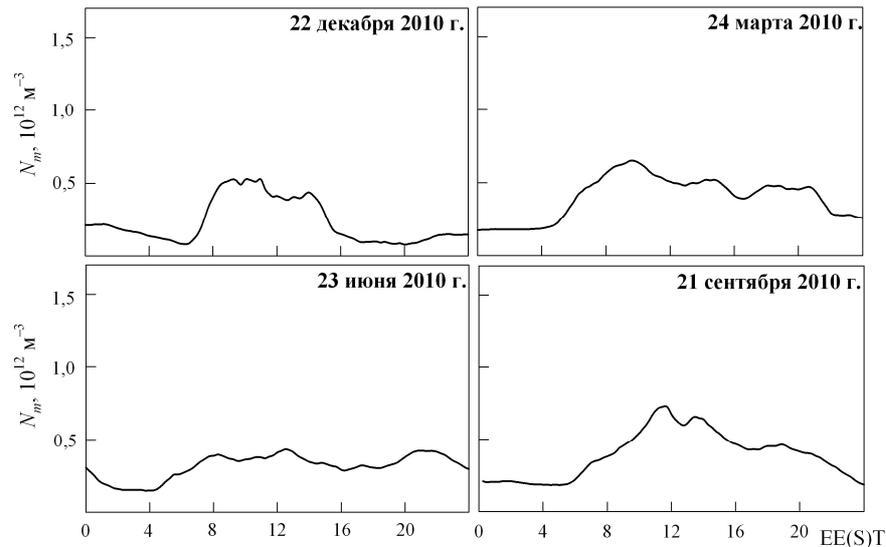


Рис. 2 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе минимума солнечной активности

Наряду с эффектами сезонной аномалии для периода спада солнечной активности наблюдались также эффекты и полугодовой аномалии. Так, околополуденные значения N_m в периоды равноденствий примерно в 1,1 – 1,4 раза больше значений концентрации электронов в периоды летнего и зимнего солнцестояний. Следует также отметить, что эффекты сезонной и полугодовой аномалий в ночных условиях не наблюдались.

Фаза минимума солнечной активности. На рис. 2 представлены временные вариации концентрации электронов N_m в период минимума солнечной активности для зимнего и летнего солнцестояний, весеннего и осеннего равноденствий.

Как видно из рисунка, в зимних условиях в суточных вариациях концентрации N_m наблюдался один максимум в околополуденные часы с максимальными значениями $N_m \approx 0,39 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы концентрация электронов не превышала $0,21 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует также отметить, что в околополуночные часы наблюдалось незначительное увеличение концентрации электронов, связанное с потоками частиц из плазмосферы.

В период летнего солнцестояния суточный ход N_m имел форму “плато” с максимальными значениями концентрации примерно в 1200 и 2100 EEST. В околополуденные часы $N_m \approx 0,43 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночных условиях концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы не превышала значений $0,34 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как показал анализ сезонных вариаций концентрации N_m в минимуме солнечной активности, эффект сезонной аномалии не наблюдался. Однако, эффекты полугодовой аномалии в вариациях концентрации электронов в максимуме слоя F2 ионосферы имели место. Так, концентрация частиц в период осеннего равноденствия в околополуденные

часы примерно в 1,6 – 1,8 раза больше значений N_m летом и зимой. Для периода весеннего равноденствия наблюдалось превышение околополуденных значений концентрации примерно в 1,3 раза над значениями N_m в летний и зимний сезоны.

Фаза роста солнечной активности. На рис. 3 приведены суточные и сезонные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе роста солнечной активности.

Вариации концентрации электронов в период зимнего солнцестояния на фазе роста солнечной активности подобны вариациям N_m на фазах спада и минимума солнечной активности. В суточном ходе N_m имеет место хорошо выраженный максимум в околополуденные часы. Максимальное значение концентрации электронов в дневные часы достигает $0,71 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы N_m не превышает $0,17 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Суточные вариации N_m в период летнего солнцестояния имеют довольно сложный характер. Следует также отметить, что форма суточной зависимости концентрации электронов, наблюдаемой в данном случае, является типичной для летнего сезона. В вариациях N_m имели место несколько максимумов, приходящихся на 0800, 1400 и 2200 EEST. Максимальные значения N_m в дневные часы не превышали $0,63 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что в ночных условиях регистрировались значения концентрации электронов сравнимые с дневными значениями N_m . Минимальные значения концентрации электронов имели место примерно в 0400 EEST и составляли $0,22 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Вариации N_m в период весеннего равноденствия на фазе роста солнечной активности качественно подобны вариациям концентрации электронов, наблюдаемых на фазах спада и минимума солнечной активности. В рассматриваемом случае, в суточном ходе N_m наблюдался один максимум примерно в

1500 EET. В дневные часы $N_m \approx 0,66 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы $N_m \approx 0,1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Форма суточных вариаций концентрации электронов N_m в период осеннего равноденствия качественно подобна форме суточных вариаций N_m на фазе максимума солнечной активности. Так, в суточном ходе концентрации электронов имеет место хорошо выраженный максимум примерно в 1100 – 1200 EEST. Максимальные значения N_m в дневные часы примерно $1,26 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночных условиях концентрация электронов уменьшалась до значений $0,27 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Сезонные вариации концентрации электронов на фазе роста солнечной активности заключались в следующем. Как видно из рисунка, в сезонных вариациях N_m имели место эффекты, как сезонной, так и полугодовой аномалий. Зарегистрировано превышение зимних дневных значений концентрации

электронов над дневными летними примерно в 1,3 раза. В ночных условиях, эффекты сезонной аномалии не зафиксированы. Эффекты полугодовой аномалии имели следующие особенности. Для периода осеннего равноденствия наблюдалось превышение дневных значений N_m значений концентрации электронов как для периода летнего, так и зимнего солнцестояния (примерно в 2,5 и 1,9 раза). Для периода весеннего равноденствия имела место следующая ситуация. Значения N_m весной примерно в 1,2 раза больше значений концентрации электронов летом. Однако для зимних и весенних условий значения N_m мало различимы (не более 8 %).

Фаза максимума солнечной активности. На рис. 4 представлены сезонно-суточные вариации концентрации электронов N_m в период максимума солнечной активности.

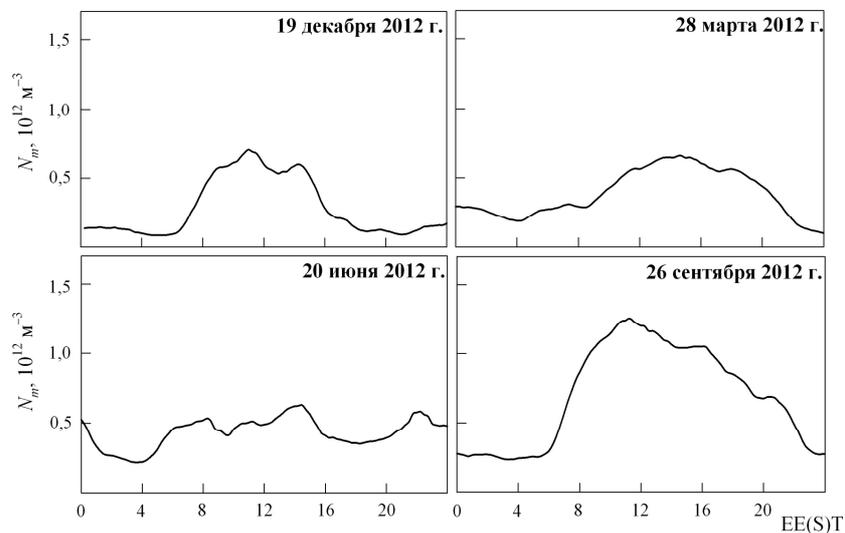


Рис. 3 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе роста солнечной активности

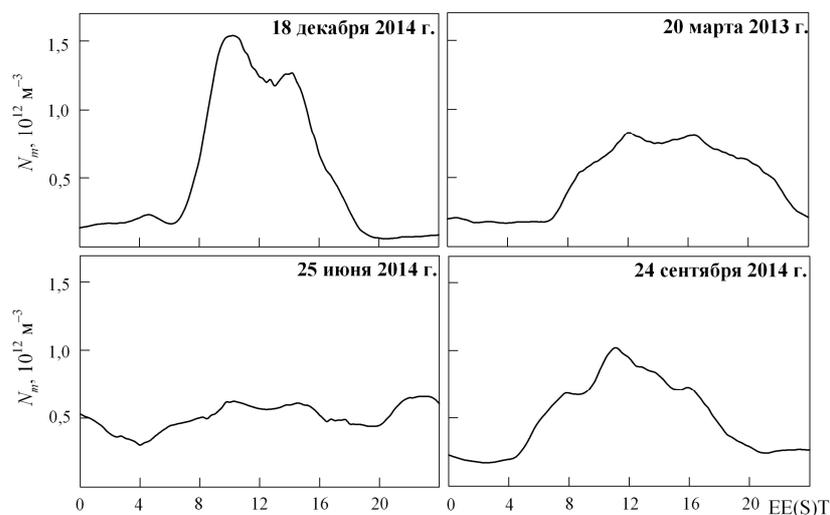


Рис. 4 – Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на фазе максимума солнечной активности

Сезонно-суточные вариации концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы в период максимума солнечной активности заключались в следующем. В период зимнего солнцестояния форма суточного хода концентрации электронов качественно подобна суточным зависимостям N_m в зимний период на фазах минимума, спада и роста солнечной активности. Так, в суточном ходе N_m имеет место хорошо выраженный максимум около 1000 ЕЕТ. Значения концентрации электронов достигали величины примерно $1,54 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Также в суточной зависимости концентрации электронов наблюдался локальный “всплеск”, приходящийся примерно на 1400 ЕЕТ. В ночные часы N_m уменьшалась примерно до значений $0,14 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Для периода летнего солнцестояния суточный ход N_m имеет форму “плато” в интервале времени с 1000 до 1400 ЕЕТ. В дневные часы $N_m \approx 0,57 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Также в суточных вариациях концентрации электронов имеет место хорошо выраженный максимум в 2200 ЕЕТ со значениями $N_m \approx 0,66 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Минимальное значение концентрация электронов принимала примерно в 0400 ЕЕТ. В данный момент времени концентрация N_m не превышала $0,3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

В период весеннего равноденствия в суточной зависимости концентрации электронов N_m наблюдался максимум в околополуденные часы. Причем концентрация частиц достигала величины $N_m \approx 0,76 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы N_m не превышала значений $0,15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Суточный ход N_m во время осеннего равноденствия качественно подобен суточной зависимости концентрации электронов в весенний период. Максимальные дневные значения $N_m \approx 1,02 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы $N_m \approx 0,32 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Как видно из рисунка, эффекты сезонной аномалии в максимуме солнечной активности хорошо заметны. Сравнительный анализ вариаций концентрации электронов в околополуденные часы в периоды зимнего и летнего солнцестояния показал следующее. Зимние дневные значения N_m превышают летние примерно в 2 раза. В ночные часы, как и для ранее рассмотренных фаз цикла солнечной активности, сезонная аномалия не проявляется.

Эффекты полугодовой аномалии в вариациях концентрации электронов N_m для периода максимума солнечной активности также экспериментально зарегистрированы. Однако, имели место некоторые особенности. Так, значения концентрации электронов в околополуденные часы в равноденственные периоды превышали значения N_m в период летнего солнцестояния примерно в 1,3 – 1,7 раза. Тогда, как для периода зимнего солнцестояния значения N_m примерно в 1,2 – 1,5 раза больше значений концентрации электронов в периоды равноденствий.

Результаты моделирования. Для рассмотренных характерных геофизических периодов и основных фаз цикла солнечной активности выполнен расчет концентрации электронов в

максимуме области F2 ионосферы в околополуденные и околополуденные часы, используя современные модели ионосферы – глобальную модель ионосферы IRI-2012 и региональную модель CERIM ION.

Международная справочная модель ионосферы (International Reference Ionosphere) – IRI-2012 [19, 20] построена на основе данных прямых наблюдений. Основными источниками экспериментальных данных, которые использовались для построения модели, служили данные мировой сети ионосферных станций (ионозондов); данные радаров некогерентного рассеяния в Хикамарке, Аресибо, Миллстоун Хилле, Малверне и Сент-Сантине, а также результаты измерений с помощью спутников и геофизических ракет.

По модели IRI можно рассчитать концентрацию электронов N , температуру электронов T_e и ионов T_i , относительный ионный состав (O^+ , H^+ , He^+ , O_2^+ , NO^+) в высотном диапазоне 50 – 2000 км, а также значения полного электронного содержания для заданного местоположения, времени и даты.

Региональная полуэмпирическая модель ионосферы CERIM ION построена на основе экспериментальных данных, полученных с помощью харьковского радара некогерентного рассеяния и ионозонда “Базис” в период с 1986 по 2013 гг. [21 – 23] Зависимость параметров ионосферы от солнечной активности определяется фазами цикла солнечной активности. К выходным параметрам региональной модели относятся: концентрация электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i , скорость переноса плазмы; частоты соударений заряженных и нейтральных частиц, продольные составляющие тензоров амбиполярной диффузии и теплопроводности, плазменная приведенная высота; скорость переноса частиц за счёт амбиполярной диффузии, плотность полного потока частиц, плотность потока за счёт амбиполярной диффузии, скорости нейтральных ветров, подвод энергии к электронам и плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу.

В таблицах 2 – 5 представлены результаты сравнительного анализа экспериментальных данных концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы с данными, рассчитанными с помощью ионосферных моделей IRI-2012 и CERIM ION.

Обсуждение полученных результатов. Анализ рассмотренных временных зависимостей концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы показал существование эффектов сезонной аномалии в вариациях N_m . Эффекты сезонной аномалии заключаются в превышении зимних околополуденных значений концентрации электронов над летними на высотах вблизи максимума области F2 ионосферы. Так, для периода максимума солнечной активности, получено, что зимние значения N_m превышали летние примерно в 2 раза. На фазах спада и роста солнечной активности зимние околополуденные значения N_m превышали летние

примерно в 1,3 – 1,4 раза. В минимуме солнечной активности в вариациях N_m эффекты сезонной аномалии не проявились.

В настоящее время предложен ряд механизмов, объясняющих явление сезонной аномалии. Доминирующую роль в появлении сезонной аномалии играют сезонные вариации нейтрального состава на высотах области F2 ионосферы [8 – 10].

Вариации нейтрального состава на высоте максимума области F2 ионосферы, в свою очередь, обусловлены сезонными вариациями параметров термосферной циркуляции между северным и южным полушариями. Как известно, газ из разогретой области перемещается вверх и в горизонтальных направлениях к более холодным областям. Под действием градиентов давления легкие компоненты нейтрального газа переносятся в более холодные области [1]. Основным результатом этого процесса является увеличение в более холодном зимнем полушарии относительного содержания легких компонент O и He, а летнее полушарие обогащается молекулярными компонентами N_2 и O_2 .

Хорошо известно, что в области максимума ионизации концентрация электронов пропорциональна концентрации атомарного кислорода: $N \sim N(O)$ [1]. В период летнего солнцестояния рост концентрации атомарного кислорода и, следовательно, концентрации электронов ограничивается появлением молекулярных компонент N_2 и O_2 и увеличением скорости потерь ионов O^+ при

взаимодействии с молекулярным азотом и кислородом [1].

Отсутствие эффектов сезонной аномалии в ночные часы обусловлено следующим. В период зимнего солнцестояния на высотах, близких высоте максимума области F2 ионосферы, рекомбинация плазмы после захода Солнца происходит при направленном к полюсу нейтральном ветре, увлекающего заряженные частицы вниз на значительно меньшие высоты, чем в летний период. В результате чего, вечерняя рекомбинация в максимуме области F2 идет быстрее зимой, чем летом [1].

Анализ полученных сезонно-суточных зависимостей концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы показал существование эффектов полугодовой аномалии в вариациях N_m . Так, было зафиксировано превышение дневных значений N_m в равноденственные периоды значений концентрации электронов в периоды зимнего и летнего солнцестояний примерно в 1,1 – 2,5 раза в зависимости от уровня солнечной активности.

Эффекты полугодовой аномалии в сезонных изменениях N_m могут быть обусловлены появлением равноденственных максимумов в вариациях концентраций частиц в нейтральной атмосфере, полугодовыми вариациями параметров геомагнитного поля, полугодовыми вариациями параметров волновых возмущений в нижней и средней атмосфере, полугодовыми вариациями высоты максимума области F2 [8, 10].

Таблица 2 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе спада цикла солнечной активности

Спад солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ION	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.	12 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	0,77	0,11	0,79	0,15	0,89
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,51	0,57	0,37	0,54	0,50	0,64
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,22	0,82	0,19	0,73	0,32	1,01
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,27	0,77	0,16	0,56	0,25	0,80

Таблица 3 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе минимума цикла солнечной активности

Минимум солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ION	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,21	0,39	0,10	0,51	0,13	0,38
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,34	0,43	0,27	0,40	0,30	0,36
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,17	0,51	0,10	0,41	0,17	0,47
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,21	0,70	0,13	0,45	0,19	0,54

Таблица 4 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе роста цикла солнечной активности

Рост солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ИОН	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	0,61	0,11	0,99	0,15	0,85
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,57	0,46	0,43	0,64	0,46	0,58
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,29	0,56	0,24	0,91	0,25	0,74
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,30	1,17	0,21	0,87	0,29	1,04

Таблица 5 – Концентрация электронов в максимуме области F2 ионосферы (N_m , 10^{12} м^{-3}) в 00 и 12 часов для характерных геофизических периодов на фазе максимума цикла солнечной активности

Максимум солнечной активности					
эксперимент		модель IRI-2012		модель CERIM ИОН	
00 ч.	12 ч.	00 ч.	00 ч.	12 ч.	00 ч.
<i>Зимнее солнцестояние</i>					
0,14	1,14	0,12	1,20	0,18	2,06
<i>Летнее солнцестояние</i>					
0,52	0,57	0,50	0,73	0,42	0,53
<i>Весеннее равноденствие</i>					
0,15	0,76	0,20	0,93	0,25	0,75
<i>Осеннее равноденствие</i>					
0,32	0,97	0,25	1,02	0,30	1,09

Сравнительный анализ экспериментальных данных и расчетов по глобальной (IRI-2012) и региональной (CERIM ИОН) моделям показал, что рассмотренные модели в большинстве случаев корректно рассчитывают околополуденные и околополуночные значения концентрации электронов в области F2 ионосферы. Существенные различия в значениях N_m для модели IRI-2012 и экспериментальными данными имели место в период роста (дневные условия, зимнее солнцестояние и весеннее равноденствие) и минимума (ночные условия, зимнее солнцестояние) солнечной активности. Для региональной модели ионосферы CERIM ИОН получено, что значительные различия между модельными данными и экспериментом наблюдались в максимуме солнечной активности (день, зимнее солнцестояние) и минимуме солнечной активности (ночь, весеннее равноденствие). В целом, рассматриваемые модели хорошо отслеживают сезонные вариации N_m . Эффекты сезонной аномалии воспроизводят обе модели. Тогда, как эффекты полугодовой аномалии модель CERIM ИОН отражает в большом числе случаев, по сравнению с моделью IRI-2012.

Выводы. В работе получены следующие результаты.

1. Выполнен анализ сезонно-суточных вариаций концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах цикла солнечной

активности в периоды равноденствий и солнцестояний.

2. Подтверждено существование сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы.

3. Получено, что в максимуме солнечной активности зимние значения N_m превышали летние примерно в 2 раза. На фазах спада и роста солнечной активности зимние околополуденные значения N_m превышали летние примерно в 1,3 – 1,4 раза. В минимуме солнечной активности в вариациях N_m эффекты сезонной аномалии не проявились.

4. Эффекты полугодовой аномалии заключались в превышении дневных значений N_m в равноденственные периоды значений концентрации электронов в периоды зимнего и летнего солнцестояний примерно в 1,1 – 2,5 раза в зависимости от уровня солнечной активности.

5. Выполнен сравнительный анализ расчетов по моделям IRI-2012 и CERIM ИОН с экспериментальными данными. Получено, что рассматриваемые модели в большинстве случаев корректно рассчитывают значения концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы и воспроизводят сезонные особенности в вариациях N_m на разных фазах цикла солнечной активности.

Список литературы

1. Брюнелли Б. Е. Физика ионосферы / Б. Е. Брюнелли, А. А. Намгаладзе. – М.: Наука, 1988. – 528 с.

2. Zang S. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987 / S. Zang, J. M. Holt, A. M. Zaluca // *J. Geophys. Res.* – 2004. – vol. 109, no. A11. – doi: 10.1029/2004JA010709
3. Bhuyan P. K. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of electron temperature measured by the SROSS C2 satellite at 500 km altitude and comparison with the IRI / P. K. Bhuyan, M. Chamua, P. Subrahmanyam, S. C. Garg // *Annales Geophysicae.* – 2002. – vol. 20. – P. 807–815.
4. 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.
5. Schunk R. W. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry* / R. W. Schunk, A. F. Nagy.–Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p.
6. Chernogor L. F. Observation results of the ionospheric processes over Ukraine in 2012–2014 / L. F. Chernogor, I. F. Domnin, 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.
7. Chernogor L. Results of observations of ionospheric processes over Ukraine in 2014 – 2016 / L. Chernogor, I. Domnin, L. Emelyanov, S. Katsko, D. Kotov, M. Lyashenko, S. Panasenko // *Space research in Ukraine. 2014 – 2016* / Ed. O. Fedorov. – K.: Akadempriodyka, 2016. – 136 p.
8. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth // *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* – 1998. – vol. 60. – P. 1385–1402.
9. 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.
10. 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.
11. Mikhailov A. V. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere / A. V. Mikhailov, K. Schlegel // *Annales Geophysicae.* – 2001. – vol. 19. – P. 783–796.
12. Farelo A. F. Global morphology of night-time N_mF_2 enhancements / A. F. Farelo, M. Herraiz, A. V. Mikhailov // *Annales Geophysicae.* – 2002. – vol. 20. – P. 1795–1806.
13. Burmaka V. Regular and irregular processes in the Ionosphere over Ukraine / V. Burmaka, L. Chernogor, I. Domnin, E. Grigorenko, M. Lyashenko // *Space Research in Ukraine 2008 – 2010* / The Report to the COSPAR. Kiyv, 2011. – P. 22 – 30.
14. Domnin I.F. Variations of the electric field zonal component, the vertical component of the plasma drift and neutral wind velocities in ionosphere over Kharkov (Ukraine) during August 5 – 6, 2011 and November 13 – 15, 2012 magnetic storms / I. F. Domnin, C. La Hoz, M. V. Lyashenko // *Вестник Национального технического университета “Харьковский политехнический институт”*. Серия: “Радиофизика и ионосфера”. – 2014. – № 47 (1089). – С. 15–21.
15. 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, L. J. Paxton // *J. Atm. Sol.-Terr. Phys.* – 2015. – vol. 134. – P. 47–55. – doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
16. 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.
17. Domnin I.F. Solar eclipse of August 1, 2008, above Kharkov: 1. Results of incoherent scatter observations / I. F. Domnin, L. Ya. Emelyanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor // *Geomagnetism and Aeronomy.* – 2013. – vol. 53, No. 1. – P. 113–123. – doi: 10.1134/S0016793213010076.
18. 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.
19. Bilitza D. *International Reference Ionosphere 2000* / D. Bilitza // *Radio Science.* – 2001. – vol. 36, no. 2. – P. 261–275.
20. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). *International Reference Ionosphere – IRI-2012*. Режим доступа: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. Дата обращения: 10.09.2016.
21. 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.
22. 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.
23. 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.

References (transliterated)

1. Brjunelli B. E., Namgaladze A. A. *Fizika ionosfery* [Physics of ionosphere]. M.: Nauka, 1988, 528 p.
2. Zang S., Holt J. M., Zaluca A. M. Midlatitude ionospheric plasma temperature climatology and empirical model based on Saint Santin incoherent scatter radar data from 1966 to 1987. *J. Geophys. Res.*– 2004, vol. 109, no. A11, doi: 10.1029/2004JA010709.
3. Bhuyan P. K., Chamua M., Subrahmanyam P., Garg S. C. Diurnal, seasonal and latitudinal variations of electron temperature measured by the SROSS C2 satellite at 500 km altitude and comparison with the IRI. *Annales Geophysicae.* 2002, vol. 20, pp. 807–815.
4. Champion K. S. W. Dynamics and structure of the quiet thermosphere // *J. Atmos. Terr. Phys.*–1975.– vol. 37, No. 6/7.–P. 915–926.
5. Schunk R. W., Nagy A. F. *Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry*. Cambridge atmospheric and space science series, 2000, 555 p.
6. 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.
7. 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.
8. Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer / H. Rishbeth. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.*, 1998, vol. 60, pp. 1385–1402.
9. 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.
10. 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.
11. Mikhailov A. V., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere. *Annales Geophysicae.* 2001, vol. 19, pp. 783–796.
12. Farelo A. F., Herraiz M., Mikhailov A. V. Global morphology of night-time N_mF_2 enhancements. *Annales Geophysicae.* 2002, vol. 20, pp. 1795–1806.
13. 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. Kiyv, 2011, pp. 22 – 30.
14. Domnin I. F., La Hoz C., Lyashenko M. V. Variations of the electric field zonal component, the vertical component of the plasma drift and neutral wind velocities in ionosphere over Kharkov (Ukraine) during August 5 – 6, 2011 and November 13 – 15, 2012 magnetic storms // *Vestnik Nacional'nogo tehničeskogo universiteta “Har'kovskij politehničeskij institut”*. Serija: “Radiofizika i ionosfera” [Bulletin of the National Technical University “Kharkiv

- Polytechnic Institute". Series: "Radio Physics and the ionosphere.]. 2014, no. 47 (1089), pp. 15–21.
15. 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. Atm. Sol.-Terr. Phys.* 2015, vol. 134, pp. 47–55, doi: 10.1016/j.jastp.2015.09.005.
 16. 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.
 17. 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/S00167932131010076.
 18. 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.
 19. Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000. *Radio Science.* 2001, vol. 36, no. 2, pp. 261–275.
 20. Virtual Ionosphere, Thermosphere, Mesosphere Observatory (VITMO). International Reference Ionosphere – IRI-2012. Available at: http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/iri2012_vitmo.html. (accessed 10.09.2016).
 21. 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.
 22. 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.
 23. Dzubanov D. A., Zaharov I. G., Lyashenko M. V. Modelirovanie poludennykh 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.

Поступила (received) 15.09.2016

Бібліографічні описи / Библиографические описания / Bibliographic descriptions

Ефекти сезонної та піврічної аномалій в варіаціях концентрації електронів в максимумі області F2 іоносфери на різних фазах циклу сонячної активності / М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Радіофізика та іоносфера. – Х.: НТУ «ХПІ», 2016. – № 34 (1206). – С. 49–57. – Бібліогр.: 23 назв. – ISSN 2078-9998.

Эффекты сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы на разных фазах цикла солнечной активности / М. В. Ляшенко, Н. С. Ляшенко // Вестник НТУ «ХПИ». Серия: Радиофизика и ионосфера. – Х.: НТУ «ХПИ», 2016. – № 34 (1206). – С. 49–57. – Библиогр.: 23 назв. – ISSN 2078-9998.

The effects of seasonal and semi-annual anomalies in the variation of the electron density at the maximum of the F2 region of the ionosphere at different phases of the solar activity cycle / M. V. Lyashenko, N. S. Lyashenko // Bulletin of NTU "KhPI". Series: Radiophysics and ionosphere. – Kharkov: NTU "KhPI", 2016. – No. 34 (1206). – P. 49–57. – Bibliogr.: 23. – ISSN 2078-9998.

Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

Ляшенко Михайло Володимирович – учений секретар Інституту іоносфери НАН та МОН України, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

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

Lyashenko Mykhaylo Volodymyrovych – scientific secretary of Institute of ionosphere, NAS and MES of Ukraine, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: mlyashenko@ua.ru.

Ляшенко Ніна Сергіївна – вчитель фізики ХЗОШ № 41, м. Харків; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.

Ляшенко Нина Сергеевна – учитель физики ХООШ № 41, г. Харьков; тел.: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.

Lyashenko Nina Sergiivna – teacher of Physics, Kharkov School № 41, Kharkiv; phone: (057) 707-65-27; e-mail: Nina86@i.ua.