

М.В. ЛЯШЕНКО, канд. физ.-мат. наук, учёный секретарь, Институт ионосферы НАН и МОН Украины

СЕЗОННЫЕ ВАРИАЦИИ КОНЦЕНТРАЦИИ ЭЛЕКТРОНОВ В ГЕОКОСМИЧЕСКОЙ ПЛАЗМЕ НА РАЗНЫХ ФАЗАХ 23-го ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

Представлено результати аналізу сезонних варіацій концентрації електронів у геокосмічній плазмі на різних фазах 23-го циклу сонячної активності. Підтверджено існування сезонної та піврічної аномалій в варіаціях концентрації електронів у спокійних геомагнітних умовах для різних рівнів сонячної активності. Приведено теоретичні розрахунки, які пояснюють появу сезонної та піврічної аномалій.

Analysis results of the electron density seasonal variations in geospace plasma for different phases of 23rd solar activity cycle are presented. Existence of seasonal and semi-annual anomalies in electron density variations in quiet geomagnetic conditions for different levels of solar activity is confirmed. The theoretical calculations explaining occurrence of seasonal and semi-annual anomalies are presented.

Введение. Физическое истолкование и моделирование процессов в ионосферной плазме в различных гелиогеофизических условиях является одной из актуальных задач исследования геокосмоса.

В настоящее время описанию поведения основных параметров ионосферы в разных гелиогеофизических условиях посвящено большое количество публикаций [см., например, 1 – 15 и ссылки в них]. Объем геофизической информации, накопленный в результате многолетних наблюдений, используется для построения моделей среды. Следует отметить, что в основе таких моделей большей частью использованы экспериментальные данные, полученные различными средствами, расположенными преимущественно в западном полушарии. По этой причине глобальные модели ионосферы зачастую не всегда корректно отражают пространственно-временное распределение основных параметров ионосферной плазмы в конкретном регионе восточного полушария. Такое несоответствие можно объяснить несимметричностью ионосферы Земли вследствие несовпадения географических и магнитных полюсов. Восполнить пробелы глобальных моделей могут региональные модели ионосферы, отражающие особенности поведения параметров ионосферной плазмы рассматриваемого региона [7, 10 – 15]. Безусловно, к таким особенностям можно отнести появление сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов [1, 3, 6, 9].

Целью работы является изложение результатов анализа сезонно-суточных вариаций концентрации электронов в геокосмической плазме на разных фазах 23-го цикла солнечной активности (СА) и характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, летнего и

зимнего солнцестояний по данным радара некогерентного рассеяния (НР) в Харькове.

Результаты экспериментальных исследований. Для анализа использованы данные, полученные на харьковском радаре НР в период с 1997 по 2007 гг. [12 – 15].

В табл. 1 приведены даты измерений на радаре НР для характерных фаз 23-го цикла СА.

Таблица 1

Даты измерений на харьковском радаре НР

Рост СА	Максимум СА	Спад СА	Минимум СА
24 – 26.03.1998 г.	12 – 14.03.2002 г.	29 – 31.03.2004 г.	01 – 03.03.2007 г.
24 – 25.06.1997 г.	09 – 11.06.2000 г.	15 – 17.06.2004 г.	19 – 21.06.2007 г.
22 – 23.09.1998 г.	11 – 12.09.2001 г.	13 – 16.09.2004 г.	20 – 22.09.2006 г.
02 – 04.12.1997 г.	12 – 13.12.2000 г.	16 – 18.12.2003 г.	19 – 21.12.2007 г.

Рост солнечной активности. Как известно, основные параметры геокосмической плазмы выявляют годовые и полугодовые вариации, вариации связанные с солнечной и геомагнитной активностями и др. [1, 3 – 9, 12 – 15]. Хорошо известным фактом является существование сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов на высотах, близких к высоте максимума области F2 ионосферы [8, 76, 80, 85, 86, 102].

Сезонное поведение концентрации электронов, заключающееся в превышении дневных зимних значений N над летними на высотах вблизи максимума области F2 ионосферы, получило название сезонной аномалии. Из анализа экспериментальных данных в период роста СА выявлены следующие сезонные особенности N . На высоте 250 км околополуденные зимние значения N превышали летние примерно в 3 раза, на высоте 310 км – в 2 раза, на высоте 360 км – в 1.5 раза. Для ночи сезонная аномалия не наблюдалась – в околополночные часы зимние значения N практически совпадали с летними. Следует отметить, что с увеличением высоты сезонная аномалия не проявлялась и на высотах $z \geq 410$ км летние дневные значения N превышали зимние.

Анализ сезонных вариаций концентрации электронов также выявил и подтвердил существование полугодовой аномалии, которая заключается в превышении дневных значений N над зимними и летними в периоды равноденствий на высотах в окрестности максимума области F2 ионосферы.

Получено, что концентрация электронов в максимуме области F2 в периоды равноденствий в околополуденные часы превышает величину N_m зимой примерно на 35 – 40 %, а летние значения N_m – на 70 %. Различие между дневными значениями N_m в марте и сентябре для рассматриваемых периодов не превышало 20 %. Следует отметить, что в ночное время эффект полугодовой аномалии не наблюдается [14].

Максимум солнечной активности. Дневные зимние значения концентрации электронов на высотах, близких к высоте максимума слоя F2, превышали летние в 2.5 – 3 раза (см. рис. 1). В ночные часы, напротив, имела место обратная ситуация – летом значения N на высотах, близких к максимуму ионизации, больше зимних. На высотах, больших высоты максимума F2-области ионосферы, дневные летние значения N сравнивались с зимними. С дальнейшим ростом высоты летние значения N становятся больше зимних.

Для периодов осеннего и весеннего равноденствий (см. рис. 1) видно, что значения N на фиксированных высотах отличались не более чем на 10 – 15 % как в дневные, так и в ночные часы.

Как и для периода роста СА в сезонных вариациях N имела место полугодовая аномалия. Дневные значения N_m в период весеннего равноденствия превышали зимние на 15 %, летние – на 78 %. В отличие от фазы роста СА, в ночные часы наблюдалось превышение равноденственных значений N_m над зимними примерно на 55 – 60 %. Для периода летнего солнцестояния имела место обратная ситуация – значения N_m в ночных условиях летом превышают значения N_m в равноденственные периоды [13].

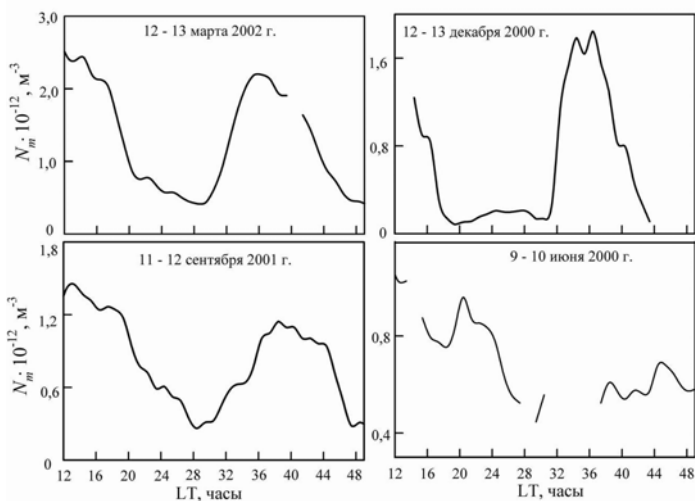


Рис. 1. Временные вариации N_m для дат, близких к весеннему и осеннему равноденствиям (слева), зимнему и летнему солнцестояниям (справа) в период максимума СА

Спад солнечной активности. Значения концентрации электронов летом ниже максимума области F2 ионосферы примерно в 2 раза меньше, чем в

зимний период (см. рис. 2). С увеличением высоты сезонная аномалия постепенно исчезает и летние значения N начинали превышать зимние.

В период спада СА также зафиксирована полугодовая аномалия. Околополуденные значения N_m в периоды равноденствия примерно на 10 % больше аналогичных в зимний период и на 30 % летом. Также наблюдалось превышение N_m весной и осенью зимних значений примерно на 35 – 40 % в ночные часы. Как и для периода максимума СА, летние значения N_m ночью больше значений в периоды весеннего и осеннего равноденствий и зимнего солнцестояния.

Для периодов весеннего и осеннего равноденствий различие в значениях концентрации электронов невелико и составляло примерно 15 – 20 % для рассматриваемого высотного диапазона [12].

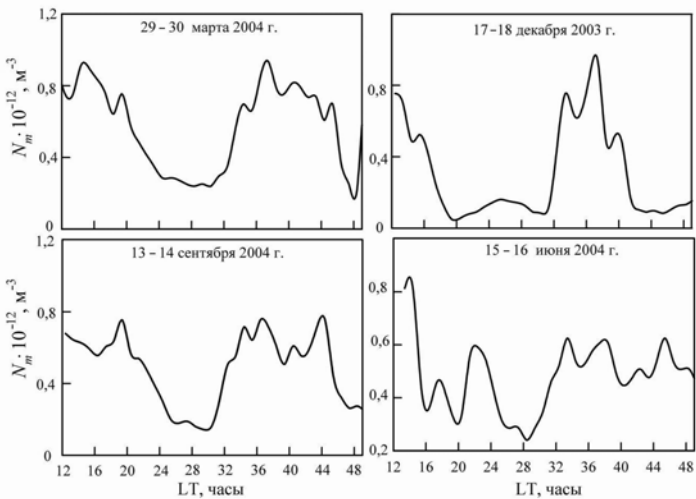


Рис. 2. Временные вариации N_m для дат, близких к весеннему и осеннему равноденствиям (слева), зимнему и летнему солнцестояниям (справа) в период спада СА

Минимум солнечной активности. Зимние полуденные значения N примерно на 10 – 15 % превышали летние на высотах, близких к высоте максимума слоя F2 (см. рис. 3). С увеличением высоты, а также в ночных условиях, сезонная аномалия не наблюдалась.

В минимуме СА выявлено, что весенние и осенние значения N превышали летние и зимние примерно на 6 %. Следует отметить, что погрешность определения N при сглаживании на интервале 75 мин и с шагом 15 мин составляет не более 3 %.

Весной и осенью значения N различались не более чем на 5 – 10 % в рассматриваемом диапазоне высот [15].

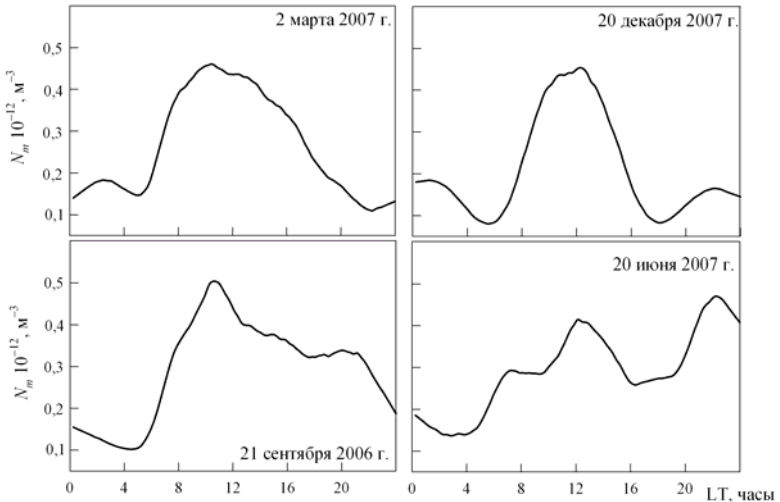


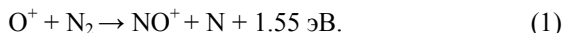
Рис. 3. Временные вариации N_m для дат, близких к весеннему и осеннему равноденствиям (слева), зимнему и летнему солнцестояниям (справа) в период минимума СА

Обсуждение полученных результатов. В настоящее время для объяснения появления сезонной аномалии предложен ряд механизмов [1, 3 – 6, 9]. Один из них состоит в том, что аномальное увеличение N зимой может быть вызвано потоками плазмы из магнитосопреженной ионосферы южного летнего полушария вдоль силовых линий геомагнитного поля. Однако численные расчеты и экспериментальные данные, полученные на радарх НР западного полушария, показывают, что количественно такие потоки плазмы не могут вызвать такое увеличение N зимой на высотах максимума области F2 и ниже. Результатом действия потока плазмы из плазмосферы совместно с термосферными ветрами может быть лишь локальное увеличение концентрации электронов в ночные часы. В дневное время зимой и летом поток направлен из F2-области ионосферы в плазмосферу, что не позволяет количественно объяснить явление сезонной аномалии [1, 4 – 6].

Другой механизм предполагает, что ионный состав верхней атмосферы подвержен сезонным вариациям, что приводит к изменениям в отношении атомных составляющих к молекулярным [1, 4 – 6].

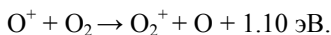
Такое поведение параметров нейтральной атмосферы можно объяснить сезонными вариациями параметров глобальной термосферной циркуляции. Увеличение концентрации N_2 на высотах максимума области F2 связано с

разогревом и расширением термосферы и, как следствие, подъемом всех составляющих нейтральной атмосферы на большие высоты. Летом в дневные часы уменьшение концентрации атомарного кислорода связано с истечением его в плазмосферу, вследствие разогрева и расширения термосферы, с переносом O^+ в более холодное южное полушарие нейтральными ветрами, а также увеличением концентрации N_2 и интенсивными потерями O^+ в ионно-молекулярной реакции [1, 3, 7]



Еще одним из возможных механизмов, действующим совместно с изменениями ионного состава, является сезонные вариации колебательной температуры молекул N_2 , от которой зависит константа скорости реакции (1), которая является главным механизмом потерь ионов O^+ в области F2 ионосферы. Однако, как показали количественные расчеты, вклад от сезонного изменения константы скорости реакции незначителен и не может существенно повлиять на изменение концентрации электронов [1, 4 – 6].

Известно, что в области максимума ионизации концентрация электронов пропорциональна концентрации атомарного кислорода: $N \propto N(O)$. Главными реакциями потерь ионов O^+ , доминирующих в области F2 ионосферы, являются реакции с молекулами N_2 (1) и O_2 [1, 3, 7]:



Таким образом, концентрация электронов N пропорциональна безразмерному параметру $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, где $N(N_2)$ и $N(O_2)$ – концентрация молекулярного азота и кислорода, соответственно.

В табл. 2 и 3 приведены результаты расчета параметра p , $N(O)$, $N(N_2)$ и $N(O_2)$ для 12 LT на высоте 300 км по модели NRLMSISE-00 [16] для максимума и минимума CA.

Как видно из табл. 2, для максимальной активности Солнца в зимний период параметр p в дневные часы примерно в 2.7 раза больше, чем летом. Концентрация атомарного кислорода в декабре и июне при этом отличается незначительно, а различия в сумме концентраций молекулярных компонент N_2 и O_2 составляет примерно 2.6 раза в околополуденные часы.

Из результатов наблюдений следует, что N в области максимума ионизации зимой в 2.5 – 3 раза больше, чем летом. Это объясняется сезонными изменениями параметра p , т. е. концентраций молекул $N(N_2)$ и $N(O_2)$.

В периоды равноденствий концентрация электронов примерно одинакова на всех высотах. Такое поведение обусловлено незначительными сезонными вариациями параметров нейтральной атмосферы – значение p отличается примерно на 10 – 30 %.

Для фазы минимума СА (см. табл. 3) получено, что зимой в полдень параметр p в 2.15 раза больше чем летом, а значения $N(O)$ зимой также превышают летние.

Таблица 2

Сезонные вариации параметров нейтральной атмосферы на высоте 300 км, рассчитанные по модели NRLMSISE-00 [16] в период максимума СА для 12 LT

	$N(O) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	$(N(O_2) + N(N_2)) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	p
март	11.7	2.86	4.09
сентябрь	13.0	4.18	3.11
июнь	9.49	3.91	2.43
декабрь	9.84	1.50	6.55

Появление полугодовой аномалии в сезонных вариациях N может быть связано с равноденственными максимумами 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 [4 – 6].

Из табл. 2 и 3 видно, что концентрация атомарного кислорода $N(O)$ в равноденственные периоды примерно в 1.3 – 1.5 раза больше, чем в периоды солнцестояний, как для фазы минимума, так и максимума СА.

Таблица 3

Сезонные вариации параметров нейтральной атмосферы на высоте 300 км, рассчитанные по модели NRLMSISE-00 [16] в период минимума СА для 12 LT

	$N(O) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	$(N(O_2) + N(N_2)) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	p
март	6.30	1.82	3.47
сентябрь	6.25	1.20	4.87
июнь	4.05	1.19	3.41
декабрь	5.80	0.79	7.33

Выводы. В ходе работы получены следующие результаты:

1. Получены количественные характеристики сезонно-суточных вариаций концентрации электронов в геокосмической плазмы в диапазоне высот 100 – 1000 км в течение 23-го цикла солнечной активности (1997 – 2007 гг.).

2. Выполнен детальный анализ сезонно-суточных вариаций концентрации электронов в ионосферной плазме для характерных геофизических периодов – весеннего и осеннего равноденствий, зимнего и летнего солнцестояний на разных фазах 23-го цикла солнечной активности.

3. Подтверждено существование сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов на высотах, близких высоте максимума области F2 ионосферы.

4. Рассмотрены механизмы, ответственные за появление сезонной и полугодовой аномалий. Как показали расчёты, основным механизмом, отвечающим за появление сезонной аномалии, являются сезонные вариации параметров глобальной термосферной циркуляции.

Список литературы: 1. *Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В.* Прогнозирование состояния ионосферы. – Л.: Гидрометеиздат, 1980. – 190 с. 2. *Ионосферно-магнитная служба. Современное состояние, задачи и перспективы / Под ред. О.И. Авдоюшина, А.Д. Данилова.* – Л.: Гидрометеиздат, 1987. – 243 с. 3. *Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А.* Физика ионосферы. – М.: Наука, 1988. – 528 с. 4. *Mikhailov A.V., Schlegel K.* Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere // *Annales Geophysicae.* – 2001. – 19. – P. 783 – 796. 5. *Richards P.G.* Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // *J. Geophys. Res.* – 2001. – 106, No. A7. – P. 12803 – 12819. 6. *Rishbeth H., Sedgemore-Schulthess K.J.F., Ulich T.* Annual and semiannual variations in the ionospheric F2-layer: II. Physical discussion // *Ann. Geophysicae.* – 2000. – 18. – P. 945 – 956. 7. *Schunk R.W., Nagy A.F.* Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. – Cambridge atmospheric and space science series, 2000. – 555 p. 8. *Liu L., Wan W., Yue X., Zhao B., Ning B., Zhang M.-L.* The dependence of plasma density in the topside ionosphere on the solar activity level // *Annales Geophysicae.* – 2007. – 25. – P. 1337 – 1343. 9. *Zhang S.-R., Holt J.M.* Ionospheric climatology and variability from long-term and multiple incoherent scatter radar observations: variability // *Annales Geophysicae.* – 2008. – 26. – P. 1525 – 1537. 10. *Дзюбанов Д.А., Захаров И.Г., Ляшенко М.В.* Моделирование полуденных значений электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным Харьковского радара некогерентного рассеяния // *Космічна наука і технологія.* – 2004. – 10, № 2/3. – С. 28 – 35. 11. *Ляшенко М.В.* Моделирование сезонных вариаций электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы для 00 и 12 часов местного времени // *Радиофизика и электроника.* – 2005. – 10, № 2. – С. 212 – 216. 12. *Ляшенко М.В., Склярів І.Б., Черногор Л.Ф., Черняк Ю.В.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период спада солнечной активности // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – 12, № 2/3. – С. 45 – 58. 13. *Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф., Черняк Ю.В.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период максимума солнечной активности // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – 12, № 4. – С. 56 – 70. 14. *Ляшенко М.В., Пуляев В.А., Черногор Л.Ф.* Суточные и сезонные вариации параметров ионосферной плазмы в период роста солнечной активности // *Космічна наука і технологія.* – 2006. – 12, № 5/6. – С. 58 – 68. 15. *Дзюбанов Д.А., Ляшенко М.В., Черногор Л.Ф.* Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности // *Космічна наука і технологія.* – 2008. – 14, № 1. – С. 44 – 56. 16. *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. – 107, No. A12. – P. SIA 15 1 – 16.

Поступила в редколлегию 31.05.2010