

УДК 550.388.2

Д. А. Дзюбанов¹, М. В. Ляшенко¹, Л. Ф. Черногор²

¹Інститут іоносфери Національної академії наук та Міністерства освіти і науки України, Харків

²Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна

Исследование и моделирование вариаций параметров ионосферной плазмы в период минимума 23-го цикла солнечной активности

Надійшла до редакції 15.06.07

Представлено результати аналізу добових і сезонних варіацій параметрів геокоsmічної плазми (концентрації електронів N , температури електронів T_e та іонів T_i) у період мінімуму 23-го циклу сонячної активності. Підтверджено існування сезонної та піврічної аномалій у варіаціях N у максимумі області F2 іоносфери. Проведено напівемпіричне моделювання параметрів динамічних процесів у геокоsmосі. Виявлено особливості просторово-часового розподілу параметрів іоносфери над центрально-європейським регіоном у мінімумі сонячної активності.

ВВЕДЕНИЕ

Наблюдение, интерпретация и моделирование поведения основных параметров геокоsmической плазмы в настоящее время являются одной из важных фундаментальных и прикладных задач исследования околоземного коsmического пространства.

Исследованию вариаций параметров ионосферной плазмы в различных гелиогеофизических условиях посвящено большое количество работ [4—6, 13, 19—21, 23—27]. Особое внимание уделяется исследованию эффектов редких и уникальных событий в геокоsmосе — сильнейших геокоsmических бурь, затмений Солнца и др. [1, 3]. Однако изучение и анализ поведения ионосферной плазмы в спокойных условиях не менее актуально, поскольку все возмущения разворачиваются на этом фоне.

В настоящее время на практике используются несколько глобальных моделей ионосферы, описывающих поведение основных параметров геокоsmоса в различных условиях [18, 22]. Боль-

шинство современных моделей построены на массивах экспериментальных данных, полученных на глобальной сети ионосферных станций и сети радаров некогерентного рассеяния (НР) североамериканского региона. При сравнении с экспериментальными данными, полученными в восточном полушарии, наблюдаются существенные различия распределений основных параметров ионосферы [4]. Поэтому создание и дальнейшее развитие региональных моделей ионосферы является перспективным направлением в геофизике.

Радар НР в г. Харькове является единственным и наиболее информативным источником сведений о состоянии геокоsmоса над центрально-европейским регионом. Как указывалось ранее [4], данные НР могут быть использованы для построения региональной модели ионосферы.

В работах [8—10] проведены исследования количественных характеристик суточных и сезонных вариаций параметров ионосферной плазмы в периоды роста, максимума и спада солнеч-

ной активности. Для рассмотренных периодов выполнено полуэмпирическое моделирование параметров среды, непосредственно не измеряемых на радаре НР. Методы исследования и анализа экспериментальных данных в этих работах аналогичны.

Целью настоящей работы является исследование количественных характеристик основных параметров геокосмической среды в период минимума солнечной активности, а также моделирование вариаций параметров динамических процессов в ионосферной плазме.

МЕТОДЫ И ИНСТРУМЕНТЫ

Для геофизического анализа и моделирования вариаций параметров плазмы и динамических процессов в ионосфере использованы данные харьковского радара НР Института ионосферы НАН и МОН Украины [13]. Измерения на радаре НР проведены для четырех периодов: 29—31 марта, 21—23 июня, 20—22 сентября и 19—22 декабря 2006 г.

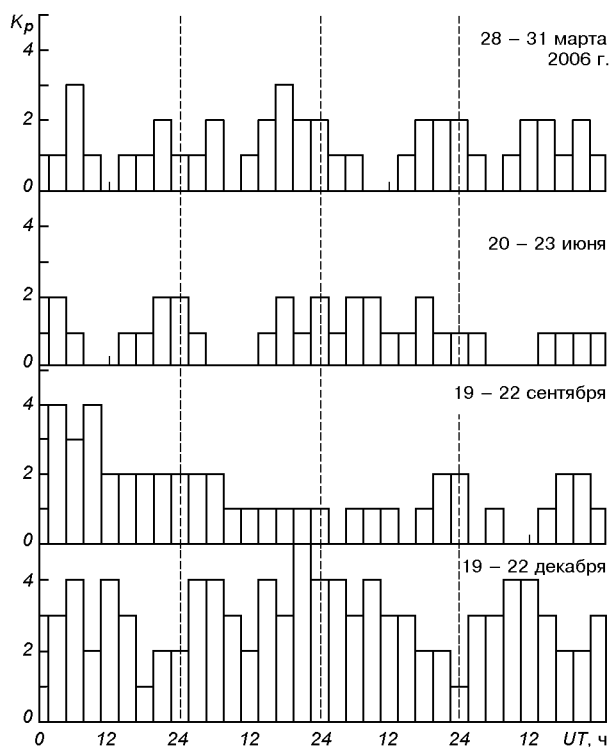


Рис. 1. Значение параметра K_p для выбранных периодов

Значения параметров геомагнитной и солнечной активности для рассмотренных периодов представлены на рис. 1 и в табл. 1.

Из рис. 1 видно, что периоды, близкие к весеннему и осеннему равноденствиям, а также летнему солнцестоянию, характеризовались спокойной геомагнитной обстановкой. Индексы геомагнитной активности K_p в эти периоды не превышали 3—4 единиц. В период зимнего солнцестояния имела место умеренная магнитная буря (индексы $K_p = 4—5$).

Из табл. 1 видно, что все рассматриваемые периоды характеризовались спокойной солнечной активностью. Значения потока солнечного радиоизлучения на длине волны 10.7 см не превышали 78 единиц.

Географические координаты радара: 49.6° с. ш., 36.3° в. д.; геомагнитные: $\Phi = 45.4^\circ$, $\Lambda = 117.7^\circ$; наклонение геомагнитного поля 66°, параметр Мак-Илвейна $L \approx 1.9$. Радар имеет крупнейшую в мире зенитную двухзеркальную параболическую антенну диаметром 100 м и предназначен для исследования ионосферы в интервале высот 100—1500 км. Рабочая частота радара — 158 МГц. Импульсная мощность радиопередающего устройства составляет 2—4 МВт. Более подробно технические характеристики радара НР описаны в [7, 13].

Основное влияние на точность измерения параметров ионосферы оказывает статистическая погрешность, которая зависит от отношения сиг-

Таблица 1. Индексы солнечной и геомагнитной активностей для выбранных четырех периодов

Дата, 2006 г.	$F_{10.7}$	W	A_p
29 марта	78	31	6
30 марта	78	35	4
31 марта	78	39	4
21 июня	76	19	4
22 июня	75	0	6
23 июня	75	0	2
20 сентября	77	11	5
21 сентября	77	11	4
22 сентября	77	17	3
19 декабря	73	0	8
20 декабря	72	0	14
21 декабря	72	0	24
22 декабря	73	0	14

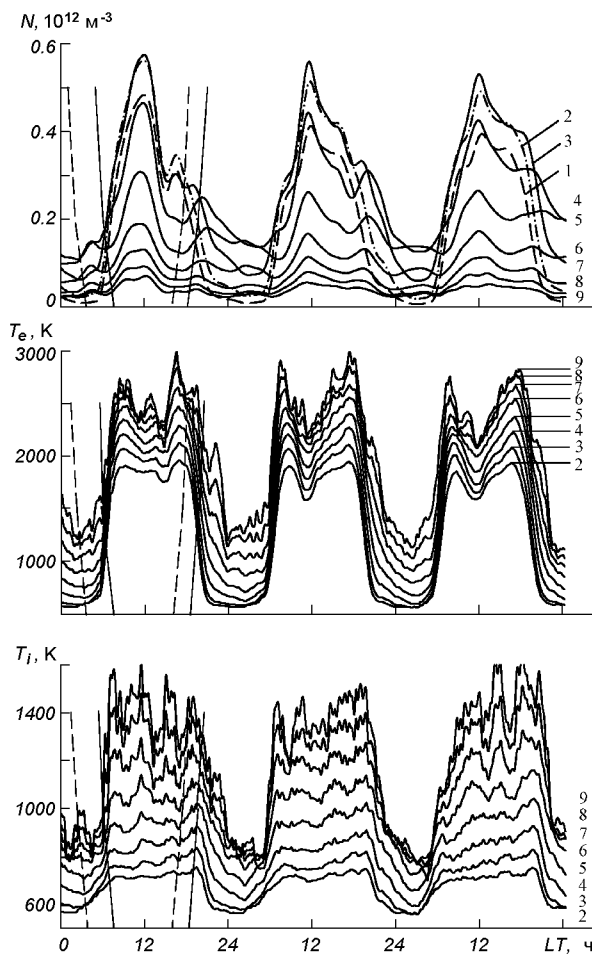


Рис. 2. Суточные вариации концентрации электронов, температуры ионов и электронов в период, близкий к весеннему равноденствию 29—31 марта 2006 г. Здесь и далее цифрами на графиках обозначены высоты: 1 — 190 км, 2 — 210 км, 3 — 240 км, 4 — 290 км, 5 — 340 км, 6 — 410 км, 7 — 490 км, 8 — 580 км, 9 — 680 км; сплошные и штриховые наклонные линии показывают восход и заход в Харькове и магнитосопряженной точке на разных высотах

нал/шум и частоты повторения зондирующих радиоимпульсов. При частоте повторения 24 Гц и времени накопления 15 мин средняя относительная погрешность определения температуры электронов и ионов составляет 3—5 %, электронной концентрации 5—7 %, скорости переноса плазмы 10—15 м/с (на высотах, близких к высоте максимума области F2 ионосферы в дневное время) [7].

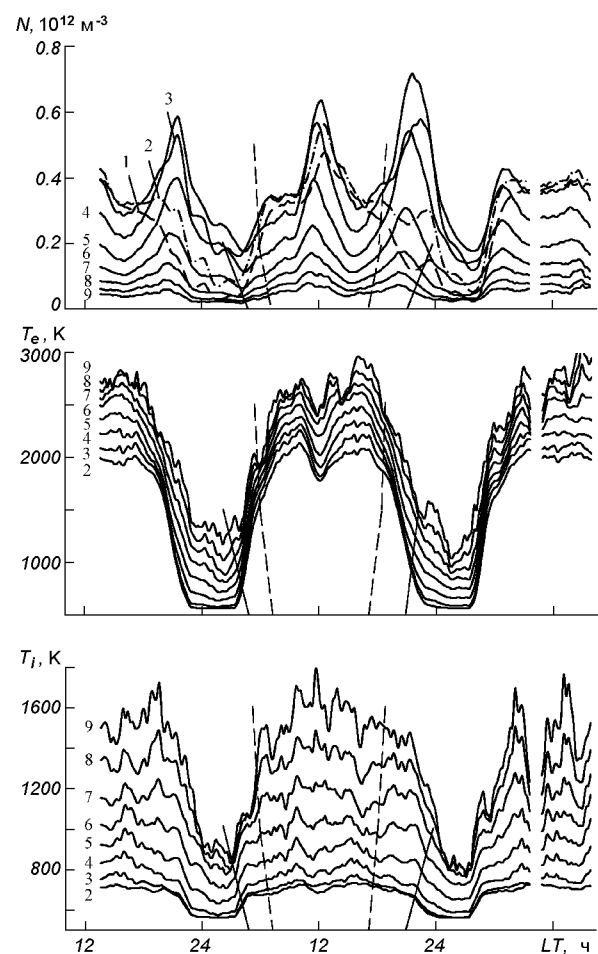


Рис. 3. То же для периода, близкого к летнему солнцестоянию 21—23 июня 2006 г.

Радар НР в зависимости от режимов работы позволяет получать с высокой точностью и заданным разрешением по высоте (10—100 км) следующие параметры ионосферы: концентрацию электронов N , температуры ионов T_i и электронов T_e , вертикальную составляющую скорости переноса плазмы V_z и относительного содержания ионов [13].

РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТОВ

На рис. 2—5 представлены суточные вариации концентрации электронов, температуры электронов и ионов для периодов, близких к весенне-

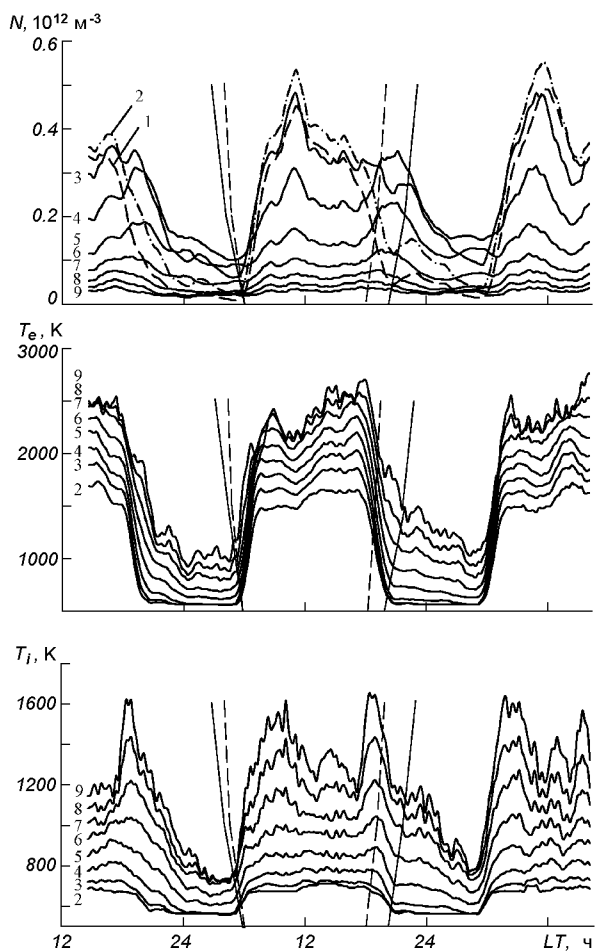


Рис. 4. То же для периода, близкого к осеннему равноденствию 20—22 сентября 2006 г.

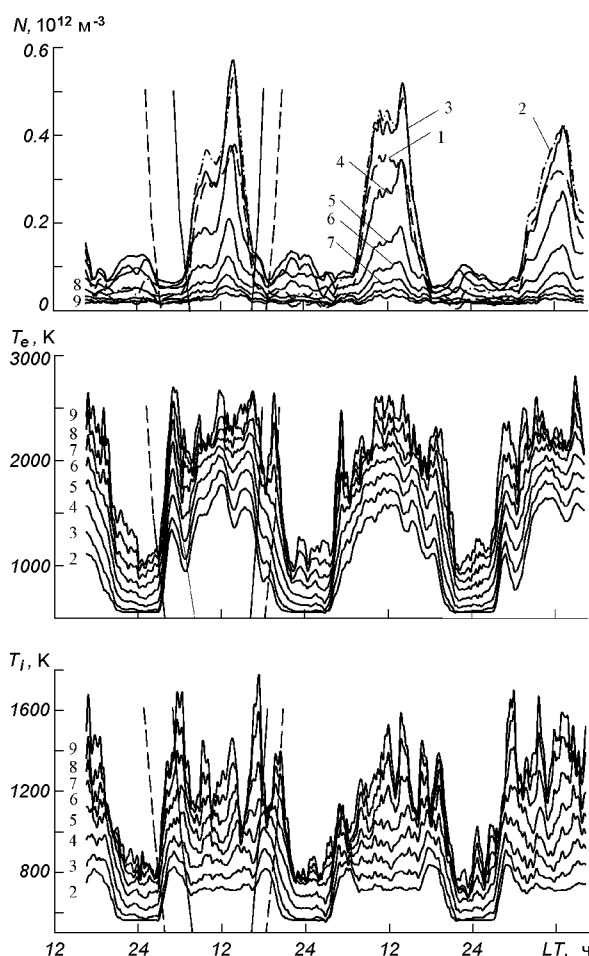


Рис. 5. То же для периода, близкого к зимнему солнцестоянию 20—22 декабря 2006 г.

му и осеннему равноденствиям, летнему и зимнему солнцестояниям. Рассмотрим более подробно количественные характеристики основных параметров геокосмической плазмы.

Суточные вариации концентрации электронов. В период весеннего равноденствия (рис. 2) концентрация электронов N испытывала значительные вариации в течение суток. На высотах $h \leq 240$ км в суточном ходе наблюдалась протяженная область с наибольшими значениями N около 11—12 LT. С увеличением высоты в суточном ходе N имела место тенденция к появлению вечернего максимума N около 20—21 LT. Следует отметить, что на высотах

$h \geq 290$ км величина вечернего максимума сопоставима с величиной дневного максимума.

В околополуденные часы на высотах $h = 210—240$ км абсолютные значения $N \approx 0.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В ночные часы в этом диапазоне высот концентрация N принимает значения $(0.05—0.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте 490 км днем $N \approx 0.1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночные часы $N \approx 0.04 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

Поведение концентрации N в период, близкий к осеннему равноденствию (рис. 4), подобно вариациям N в весенний период. Как и весной, на высотах $h \leq 240$ км в суточных вариациях N имел место максимум примерно в 11 LT. Для высот $h \geq 290$ км в суточном ходе появился

вечерний максимум (около 20 LT). Интересно, что значение вечернего максимума могло превосходить значение дневного максимума на высотах $h = 290\text{--}410$ км.

Днем на высотах 210 и 240 км концентрация электронов достигала значений $N \approx (0.4\text{--}0.45) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в околополуденные часы $(0.05\text{--}0.1) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ и $(0.1\text{--}0.2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ для высот 210 и 240 км соответственно. На высоте $h = 490$ 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.

Вариации концентрации электронов для летнего солнцестояния представлены на рис. 3. На высоте $h = 190$ км в суточных вариациях N имел место один максимум в полдень. С увеличением высоты проявлялась тенденция к появлению вечернего максимума. На высотах $h \geq 240$ км наблюдался вечерний максимум (около 22—24 LT), значение которого больше значения дневного максимума.

На высотах 210 и 240 км концентрация N около полудня достигала $(0.5\text{--}0.6) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, в ночное время — $(0.15\text{--}0.4) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высоте $h = 490$ км $N \approx 0.15 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ вблизи полудня, а ночью концентрация электронов уменьшалась до значений $0.06 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$.

На рис. 5 представлены временные вариации концентрации электронов в период, близкий к зимнему солнцестоянию. 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 в дневные часы $N \approx 0.07 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью — не более $(0.05\text{--}0.06) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Следует отметить, что для 20 декабря на высотах 210—240 км значения N были примерно на 15—20 % больше значений для 21 декабря в околополуденные часы.

Суточные вариации температуры электронов и ионов. Вариации температуры электронов и ионов для рассмотренных четырех периодов имеют подобный ход. Для температуры электронов в суточном ходе имели место два максимума — утром и в вечернее время. Достаточно хорошо выражен локальный минимум в суточных вариациях T_e около полудня.

В суточных вариациях температуры ионов явно выраженные максимумы не обнаруживаются. Температура ионов T_i увеличивалась с вос-

ходом Солнца в месте наблюдения, достигала максимальных значений в дневные часы и уменьшалась после захода Солнца.

Для периодов весеннего и осеннего равноденствий (рис. 2 и 4) вариации T_e подобны. Максимумы в суточном ходе T_e имеют место в 8—9 и 17—18 LT. Локальный минимум наблюдался в полдень. Для марта и сентября на высотах 240 и 490 км в дневные часы T_e достигала значений примерно 1700 и 2100 К, в околополуденные часы $T_e \approx 580$ и 1000 К соответственно.

Температура ионов в периоды равноденствий мало различалась. Так, на высоте 240 км днем $T_i \approx 740\text{--}750$ К, в ночных условиях $T_i \leq 560\text{--}580$ К. На высоте 490 км в период весеннего равноденствия $T_i \approx 1170$ К вблизи полудня, ночью — $T_i \approx 900\text{--}1000$ К. Осенью на этой высоте днем $T_i \approx 1060$ К, вблизи полуночи $T_i \approx 790\text{--}800$ К.

Для периода летнего солнцестояния особенности суточных вариаций T_e наиболее ярко выражены. Утренний и вечерний максимумы в суточном ходе имели место в 10 и 16 LT. Локальный минимум, как и для периодов равноденствий, наблюдался в околополуденные часы. Днем на высотах 240 и 490 км значения T_e составляли соответственно 1800 и 2400 К, ночью — 600 и 1150 К.

Температура ионов в период летнего солнцестояния на высотах 240 и 490 км днем достигала соответственно 700 и 1200 К, в ночных условиях — 600 и 900 К.

Вариации температуры электронов в период зимнего солнцестояния имели ряд особенностей. Так, для 20 декабря 2006 г. в суточных вариациях T_e явно выражен эффект влияния магнитосопряженной точки (МСТ). С восходом Солнца в МСТ наблюдалось увеличение T_e в месте измерения, за которым следовало уменьшение температуры электронов, затем T_e увеличивалась после местного восхода Солнца.

В околополуденные часы на высотах 210—240 км T_e составляла 1550—1750 К соответственно. Ночью на этих высотах T_e не превышала 550—600 К. На высоте 490 км днем $T_e \approx 2250$ К, в ночные часы $T_e \approx 900$ К. Различие вариаций T_e 20 и 21 декабря 2006 г. было небольшим и составляло примерно 10 %.

Температура ионов в период зимнего солнцестояния выявляла значительные суточные вариации. Подобно T_e , температура ионов начинала увеличиваться в момент восхода Солнца в МСТ, далее следовал малоинерционный спад и последующее незначительное увеличение T_i после восхода Солнца в Харькове. В околополуденные часы на высотах 210 и 240 км она составляла 720 и 760 К соответственно, ночью — около 560 К. На высоте 490 км днем значения $T_i \approx 1160$ К, в ночные часы T_i не превышала 800 К.

Сезонные вариации параметров геокосмической плазмы. Для рассматриваемых периодов летнего и зимнего солнцестояний наблюдалась сезонная аномалия. Зимние полуденные значения N примерно на 10—15 % превышали летние на высотах, близких высоте максимума слоя $F2$. С увеличением высоты, а также в ночных условиях, сезонная аномалия не наблюдалась.

Следует также отметить полугодовую аномалию, которая заключается в превышении полуденных значений N в периоды равноденствий над значениями N в периоды солнцестояний на высотах, близких высоте максимума области $F2$ ионосферы. В нашем случае весенние и осенние значения N больше летних и зимних примерно на 6 %.

Весной и осенью значения N различались менее чем на 5—10 % в рассматриваемом диапазоне высот.

Для всех сезонов суточные вариации температур электронов и ионов имели подобный характер. Для периодов весеннего и осеннего равноденствий различие T_e и T_i не более 10—15 % как в дневных, так и в ночных условиях. В то же время в период летнего солнцестояния дневные значения T_e превышали зимние примерно на 50 и 350 К на высотах 240 и 490 км соответственно. В ночных условиях летние значения T_e на высоте 240 км больше зимних примерно на 50 К, на высоте 490 км — на 250 К.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ВАРИАЦИЙ ПАРАМЕТРОВ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Одной из задач теоретического моделирования является расчет вторичных параметров процессов по измеренным первичным параметрам. Как

известно, на высотах области $F2$ ионосферы и выше процессы переноса плазмы и энергии становятся более существенными, чем фотохимические процессы образования и исчезновения заряженных частиц. Поэтому динамические процессы играют важную роль в формировании высотного профиля концентрации электронов в целом и области $F2$ ионосферы в частности.

В настоящей работе проведено полуэмпирическое моделирование вариаций параметров геокосмической плазмы с использованием известных теоретических соотношений и основных параметров ионосферы, полученных на радаре НР. Для расчетов параметров нейтральной атмосферы привлекалась модель NRLMSISE-00 [22]. Ее использование оправдано тем, что в спокойных гелиогеофизических условиях параметры нейтральной атмосферы не должны существенно различаться в западном и восточном полушариях. Параметры ионосферы в этих полушариях могут существенно различаться.

Исходные теоретические соотношения, используемые здесь, такие же, как и в работах [8—10]. На рис. 6—10 представлены результаты полуэмпирического моделирования вариаций параметров динамических процессов в геокосмической плазме.

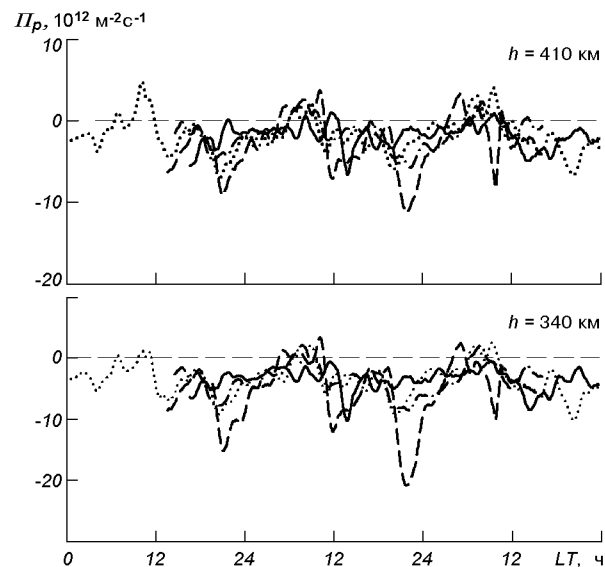


Рис. 6. Суточные вариации плотности полного потока плазмы P_p на фиксированных высотах. Здесь и далее на графиках обозначены кривые: точки — 29—31 марта 2006 г., тире — 21—23 июня 2006 г., штриховая — 20—22 сентября 2006 г., сплошная — 20—22 декабря 2006 г.

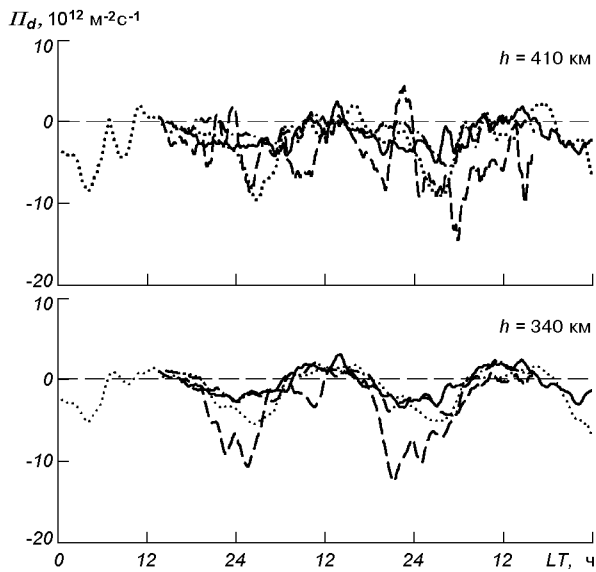


Рис. 7. Суточные вариации плотности потока плазмы за счет амбиполярной диффузии Π_d на фиксированных высотах

Потоки заряженных частиц в ионосфере. Суточные вариации плотности полного потока частиц Π_p представлены на рис. 6. Для всех сезонов формы суточных вариаций Π_p подобны. Максимальный по величине нисходящий поток имел место в ночные часы (около 22 LT). В периоды равноденствий в околополуденные часы на высоте 340 км $\Pi_p \approx -4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, на высоте 410 км $\Pi_p \approx -2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Летом в дневное время $\Pi_p \approx -(15 \dots 20) \cdot 10^{12}$ и $-(8 \dots 10) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на высотах 340 и 410 км соответственно. Для периода зимнего солнцестояния в околополуденные часы значения плотности полного потока частиц достигали величин $-2 \cdot 10^{12}$ и $3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на высотах 340 и 410 км. В ночных условиях на высоте 340 км $\Pi_p \approx -3.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, на высоте 410 км $\Pi_p \approx -2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

На рис. 7 представлены суточные зависимости плотности потока Π_d частиц за счет амбиполярной диффузии. В период весеннего и осеннего равноденствий в околополуденные часы поток Π_d достигал значений $(1-2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на высоте 340 км. Формы суточных вариаций для данных сезонов также подобны. В ночные часы (около 02 LT) на высоте 340 км имел место

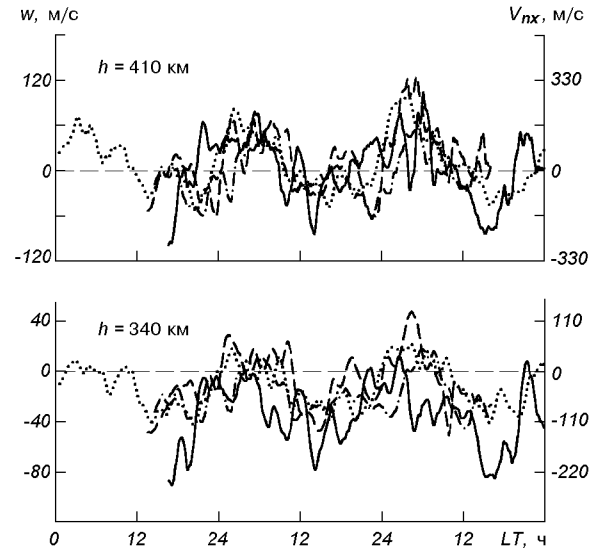


Рис. 8. Суточные вариации эквивалентного нейтрального ветра w и меридиональной составляющей скорости V_{nx} нейтрального ветра на фиксированных высотах

нисходящий поток заряженных частиц со значениями $\Pi_d \approx -2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Летом на высоте 340 км в 12 LT наблюдался незначительный по величине восходящий поток плазмы. В ночных условиях на данной высоте $\Pi_d \approx -9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Зимой в околополуденные часы на высоте 340 км наблюдался восходящий диффузионный поток $\Pi_d \approx 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, на высоте 410 км имел место нисходящий поток заряженных частиц, плотность которого $\Pi_d \approx -10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. В ночные часы на этих же высотах наблюдался нисходящий поток плазмы за счет амбиполярной диффузии со значениями $\Pi_d \approx -2.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Термосферные ветры в ионосфере. На рис. 8 приведены значения скорости w эквивалентного нейтрального ветра и величины меридиональной составляющей скорости нейтрального ветра V_{nx} . Для рассматриваемых сезонов суточные вариации w и V_{nx} имели сложный характер. На высотах 340 и 410 км в первую половину суток имел место термосферный ветер, направленный от полюса к экватору. В околополуденные часы происходила смена знака, и направление w и V_{nx} изменялось на противоположное.

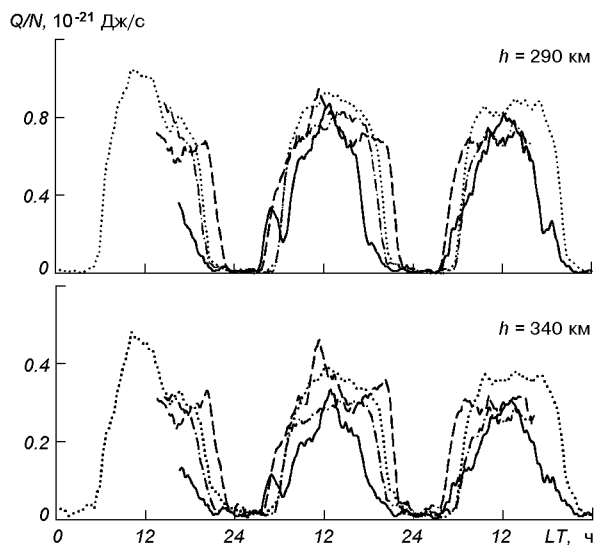


Рис. 9. Суточные вариации значения энергии Q/N , подводимой к электрону в единицу времени

Величина энергии, подводимой к электронному газу. На рис. 9 приведены значения энергии Q/N , подводимой к электронному газу, для весеннего и осеннего равноденствий, а также летнего и зимнего солнцестояний. Величина Q/N в околополуденные часы для всех рассмотренных сезонов примерно равна $8 \cdot 10^{-22}$ Дж/с на высоте 290 км. На высоте 340 км $Q/N \approx 3 \cdot 10^{-22}$ Дж/с для осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния; для лета и весны значение Q/N составляло $4 \cdot 10^{-22}$ Дж/с. В ночные часы на рассмотренных высотах для всех сезонов величина Q/N близка к нулю.

Поток тепла из плазмосферы в ионосферу. В суточных вариациях плотности потока тепла Π_T имели место два явно выраженных минимума — утренний (около 07—08 LT) и вечерний (около 16—17 LT) (рис. 10). Следует отметить, что амплитуда вечернего минимума больше утреннего. В околополуденные часы для всех сезонов на высоте 340 км Π_T достигала значений $-(2-3)$ мкВт/м². На высоте 410 км в околополуденные часы $\Pi_T \approx -(3-4)$ мкВт/м², для зимнего солнцестояния $\Pi_T \approx -2.4$ мкВт/м². В ночные часы в периоды равноденствий и солнцестояний поток тепла из плазмосферы в ионосферу был незначительным.

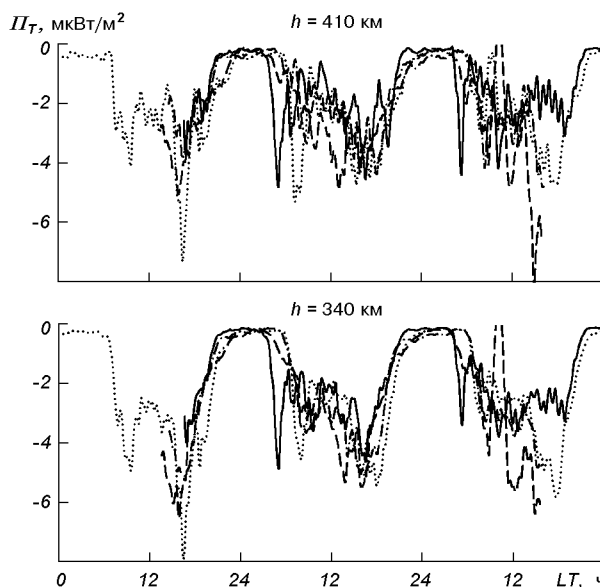


Рис. 10. Суточные вариации плотности потока тепла Π_T , переносимого электронами из плазмосферы в ионосферу

ОБСУЖДЕНИЕ

Ионосфера Земли представляет собой сложную открытую для внешних воздействий динамическую нелинейную систему [14—17]. Поэтому процессы в ней отличаются большим разнообразием, что существенно затрудняет прогнозирование и моделирование состояния ионосферы.

Суточные вариации концентрации электронов. Для рассматриваемых сезонов в суточных вариациях N на высотах 190—240 км имеет место один максимум в околополуденные часы. Такое поведение концентрации электронов контролируется в основном вариациями зенитного угла Солнца. На больших высотах на формирование высотного профиля N существенно влияет перенос частиц и энергии.

Типичной особенностью суточных вариаций N является увеличение значений N в околополуденные часы на высотах, близких к высоте максимума области $F2$ ионосферы. В нашей работе такая особенность поведения N наблюдается в период зимнего солнцестояния [11, 20].

В работе [20] проведен детальный анализ появления такого увеличения N в разных гелиофизических условиях по данным мировой сети ионозондов. Выявлены два локальных максимума в ночных условиях — предполуночный (око-

ло 22—23 LT) и послеполуночный (около 04 LT) в средних широтах Евразийского региона. В нашей работе для периода зимнего солнцестояния получено локальное увеличение N в предполуночные часы (около 23—24 LT) на высоте максимума области $F2$. Второй максимум в послеполуночные часы зимой не наблюдался. Летом также имел место один локальный максимум концентрации электронов примерно в 22—23 LT. Поведение N в течение суток в равноденственные периоды рассмотрим ниже. Относительная амплитуда летнего максимума больше зимнего, что согласуется с результатами [20] для минимума солнечной активности.

Наиболее вероятными причинами локального увеличения N ночью являются потоки частиц из плазмосферы в ионосферу и поднятие за счет электрических полей и термосферных ветров слоя $F2$ на большие высоты, где коэффициент рекомбинации мал [2, 11, 20]. Также не исключается поступление плазмы из магнитосопряженной ионосферы летнего южного полушария, однако вклад данного процесса в увеличение N мало существен [20, 24].

Наши модельные расчеты показали, что максимальный нисходящий поток плазмы имел место примерно в 22 LT. На высоте 340 км величины потоков заряженных частиц составляли примерно $-10 \cdot 10^{12}$ летом и $-3.5 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ зимой. Такие потоки совместно с термосферными ветрами могут привести к наблюдаемому увеличению концентрации электронов в ночные часы.

Рассмотрим поведение N в периоды равноденствий. Как известно, в эти периоды происходит переход от зимнего типа суточных вариаций концентрации электронов на высотах, близких к высоте максимума области $F2$, к летнему (и наоборот). Данный процесс происходит сравнительно быстро, примерно в течение двух недель [6, 21]. Для определения типа суточных зависимостей N_m воспользуемся классификацией, предложенной в работе [21]. Отметим, что суточные вариации концентрации электронов в периоды весеннего и осеннего равноденствий подобны. Согласно классификации [21] суточные зависимости N_m для 29—31 марта и 20—22 сентября 2006 г. можно отнести к SW-типу. Суточным вариациям SW-типа, как и WS-типа, присущи особенности как летних, так и зимних

форм суточных вариаций. В нашем же случае вариации N_m более похожи на вариации концентрации в летний период. На это указывает достаточно продолжительное уменьшение концентрации электронов после полудня с тенденцией к появлению вечернего максимума примерно в 21—22 LT. К зимним особенностям можно отнести достаточно резкое увеличение N_m в утренние часы и последующее увеличение до максимальных значений в околополуденные часы.

Суточные вариации температуры электронов и ионов. Как известно, на высотах нижней ионосферы ($h < 160$ км) сохраняется тепловое равновесие между электронным, ионным и нейтральным газами ($T_e \approx T_i \approx T_n$). Такое соотношение температур заряженных и нейтральных частиц можно объяснить интенсивным охлаждением электронов и ионов за счет соударений с частицами нейтрального газа. Начиная с высот $h \approx 160$ км за счет уменьшения частоты электрон-нейтральных соударений температура электронов превышает температуру ионного и нейтрального газов, причем температура ионов остается близкой к температуре нейтральных частиц до высот $h \approx 350$ —400 км. На высотах $h > 350$ —400 км справедливо соотношение $T_e > T_i \geq T_n$ [2].

Для всех рассмотренных сезонов в суточных вариациях T_e наблюдались два максимума — утренний (около 9—10 LT) и вечерний (около 16—18 LT). Появление этих максимумов в суточных зависимостях T_e можно объяснить увеличением величины плотности потока тепла из плазмосферы в ионосферу на высотах $h > 350$ км (рис. 10) и подводом энергии к электронам на высотах 290—340 км (рис. 9).

Локальное уменьшение T_e в околополуденные часы объясняется тем, что охлаждение электронов происходит на фоне увеличения их концентрации и скорости передачи тепла от электронов к ионам в процессе электрон-ионных соударений. В этом случае $T_e \propto N^{-1}$ [19, 28].

Суточные вариации параметров динамических процессов в ионосфере. Вариации полного потока частиц и потока частиц за счет амбиполярной диффузии в течение суток для всех рассмотренных сезонов подобны (рис. 6, 7). Наибольшая плотность нисходящего потока за-

ряженных частиц имела место около 22—24 LT.

Суточные вариации скоростей термосферного ветра (рис. 8) также подобны в периоды равноденствий и солнцестояний и имели сложный характер. В первую половину суток наблюдается термосферный ветер, направленный от полюса к экватору. В околополуденные часы происходила смена знака и направление w и V_{lx} изменялось на противоположное. Такое поведение термосферного ветра согласуется с ранее полученными результатами для разных уровней солнечной активности [8—10].

Вариации величины энергии, подводимой к электронам, в течение суток заключаются в следующем. Наибольшие значения Q/N достигаются в околополуденные часы на высоте $h = 290$ км. Форма суточных зависимостей Q/N для разных сезонов подобна (рис. 9). В ночные часы величина Q/N незначительна.

Временные зависимости плотности потока тепла для всех сезонов выявляют два всплеска в утренние и вечерние часы (рис. 10). В ночные часы плотность потока тепла, переносимого электронами из плазмосферы, была незначительной.

Сезонные вариации параметров ионосферной плазмы. Как известно, основные параметры геокосмической плазмы подвержены годовым и полугодовым вариациям, вариациям, связанным с солнечной и геомагнитной активностями, и др. [2, 12, 23—27]. Хорошо известным фактом является сезонная и полугодовая аномалия в изменениях концентрации электронов на высотах, близких к высоте максимума области F2 ионосферы [2, 6, 24—27].

Сезонная аномалия заключается в превышении зимних полуденных значений N над летними на высотах, близких к высоте максимума области F2 ионосферы. Более явно сезонная аномалия выражена при высокой солнечной активности. В нашем случае зимние полуденные значения N примерно на 10—15 % больше летних. С увеличением высоты и ночью эффекты сезонной аномалии не проявляются.

Полугодовая аномалия заключается в том, что значения концентрации электронов в периоды равноденствий больше, чем в периоды солнцестояний как в дневных, так и ночных условиях. В настоящей работе выявлено, что весенние и осенние значения N превышали летние и зим-

ние примерно на 6 %. Заметим, что погрешность определения N при сглаживании на интервале 75 мин и сдвигом 15 мин составляет не более 3 %. Следует также отметить, что эффекты полугодовой аномалии проявлялись в периоды спада, роста и максимума солнечной активности [8—10].

Для объяснения сезонной и полугодовой аномалий предложен ряд механизмов [6, 25, 27]. Основную роль в появлении сезонной аномалии играют сезонные вариации нейтрального состава на высотах максимума ионизации, которые, в свою очередь, обусловлены сезонными изменениями параметров термосферной циркуляции. Под действием градиентов давления легкие составляющие нейтральной атмосферы переносятся из более разогретых областей в холодные, в результате чего происходит увеличение в холодном зимнем полушарии концентрации O и He, а летнее полушарие насыщается более тяжелыми молекулами — N_2 и O_2 [2, 6, 24]. Концентрация электронов на высотах, близких к высоте максимума области F2, пропорциональна безразмерному параметру $p = N(O)/(N(N_2) + N(O_2))$, где $N(O)$ — концентрация атомарного кислорода, $N(N_2)$ и $N(O_2)$ — концентрации молекул азота и кислорода соответственно.

В табл. 2 представлены значения концентраций $N(O)$, $N(N_2) + N(O_2)$ и параметра p на высоте 280 км для 00 и 12 LT, рассчитанные по модели NRLMSISE [20]. Видно, что зимой в полдень значения p в 2.15 раза больше, чем летом, значения $N(O)$ зимой также превышали летние.

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 [24, 26]. Из табл. 2 видно, что концентрация атомарного кислорода в равноденственные периоды в 1.1—1.5 раза больше, чем в периоды солнцестояний.

Сезонные вариации температуры электронов T_e заключались в следующем. В период летнего солнцестояния дневные значения T_e превышали зимние на 50 K и 350 K на высотах 240 и 490 км

Таблица 2. Сезонные вариации параметров нейтральной атмосферы на высоте 280 км, рассчитанные по модели NRLMSISE [20]

Месяц	00 LT			12 LT		
	$N(O) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	$(N(O_2) + N_2) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	ρ	$N(O) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	$(N(O_2) + N_2) \cdot 10^{-14}, \text{ м}^{-3}$	ρ
март	4.20	1.14	3.75	6.30	1.82	3.47
сентябрь	4.15	0.99	4.48	6.25	1.20	4.87
июнь	2.40	0.56	4.27	4.05	1.19	3.41
декабрь	4.50	0.61	7.58	5.80	0.79	7.33

соответственно. В ночных условиях летние значения T_e на высоте 240 км превышали зимние примерно на 50 К, на высоте 490 км — 250 К. В периоды равноденствий T_e как днем, так и ночью больше, чем T_e в зимний период, но меньше летних значений.

ВЫВОДЫ

Представлен анализ суточных и сезонных вариаций параметров геокосмической плазмы (концентрации электронов N , температуры электронов T_e и ионов T_i) в период минимума 23-го цикла солнечной активности. В ходе компьютерного моделирования получены значения плотностей потоков заряженных частиц, тепла, величины энергии, подводимой к электронам, скоростей нейтральных (термосферных) ветров.

1. Подтверждено, что в минимуме солнечной активности основные параметры геокосмической плазмы испытывали значительные суточные и сезонные вариации.

2. На высотах ниже максимума области F2 ионосферы концентрация электронов контролируется в основном величиной зенитного угла Солнца. На высотах максимума области F2 и выше основную роль в формировании высотного профиля N играют процессы переноса частиц и энергии.

3. Подтверждено наличие сезонной и полугодовой аномалий в вариациях концентрации электронов на высотах, близких к высоте максимума области F2. Зимние полуденные значения N превышали летние примерно на 10—15 %. Концентрация электронов в период равноденствий примерно на 6 % больше, чем в периоды солнцестояний.

4. В суточных вариациях T_e имели место два максимума в утренние (около 9—10 LT) и вечерние (около 16—18 LT) часы. В периоды равноденствий T_e и T_i различались не более чем на 10—15 % как в дневные, так и ночные часы. В период летнего солнцестояния дневные значения T_e превышали зимние на 50 и 350 К на высотах 240 и 490 км соответственно. В ночных условиях летние значения T_e на высоте 240 км больше зимних примерно на 50 К, на высоте 490 км — 250 К.

5. Расчеты показали, что максимальная плотность нисходящего полного потока заряженных частиц Π_p имела место около 22 LT. Весной и осенью в околополуденные часы на высотах 340 и 410 км Π_p составляла $-4 \cdot 10^{12}$ и $-2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ соответственно. Летом в дневное время значения Π_p достигали $-20 \cdot 10^{12}$ и $-10 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на этих же высотах. Для периода зимнего солнцестояния в 12 LT значения Π_p не превышали $-2 \cdot 10^{12}$ и $3 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$ на высотах 340 и 410 км соответственно. В ночные часы на этих же высотах Π_p равнялась $-3.5 \cdot 10^{12}$ и $-2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

6. В ходе компьютерного моделирования получено, что в периоды равноденствий в околополуденные часы на высоте 340 км плотность потока за счет амбиполярной диффузии $\Pi_d \approx (1-2) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$, в ночных условиях $\Pi_d \approx -2 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Летом на высоте 340 км в 12 LT наблюдался незначительный по величине восходящий поток плазмы. В ночных условиях на данной высоте $\Pi_d \approx -9 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-2} \text{ с}^{-1}$. Получено, что форма суточных вариаций для данных сезонов также подобна.

7. Рассчитанная величина Q/N в околополуденные часы для всех рассмотренных сезонов примерно равна $8 \cdot 10^{22}$ Дж/с на высоте 290 км.

На высоте 340 км $Q/N \approx 3 \cdot 10^{-22}$ Дж/с для осеннего равноденствия и зимнего солнцестояния; для лета и весны величина Q/N составляет $4 \cdot 10^{-22}$ Дж/с. В ночные часы на рассмотренных высотах для всех сезонов значения Q/N близки к нулю.

8. В суточных вариациях плотности потока тепла P_T имели место два явно выраженных минимума — утренний (около 07—08 LT) и вечерний (около 16—17 LT). В полдень для всех сезонов $P_T \approx -(2-3)$ мкВт/м² на высоте 340 км. На высоте 410 км в околополуденные часы $P_T \approx -(3-4)$ мкВт/м², для зимнего солнцестояния $P_T \approx -2.4$ мкВт/м². В ночные часы в периоды равноденствий и солнцестояний поток тепла из плазмосферы в ионосферу незначителен по величине.

Авторы благодарят В. И. Тарана за интерес к работе, Л. Я. Емельянова, А. Ф. Кононенко, И. Б. Склярова, Ю. В. Черняка — за проведение экспериментов на радаре НР, а А. В. Билибок — за первичную обработку экспериментальных данных.

- Акимов Л. А., Григоренко Е. И., Таран В. И. и др. Комплексные радиофизические и оптические исследования динамических процессов в атмосфере и геокосмосе, вызванных солнечным затмением 11 августа 1999 года // Зарубежная радиоэлектроника. Успехи современной радиоэлектроники.—2002.—№ 2.—С. 25—63.
- Брюнелли Б. Е., Намгаладзе А. А. Физика ионосферы. — М.: Наука, 1988.—528 с.
- Григоренко Е. И., Лысенко В. Н., Пазюра С. А. и др. Аномальная ионосферная буря 21 марта 2003 года // Космічна наука і технологія.—2004.—10, № 1.—С. 4—11.
- 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.
- Емельянов Л. Я., Григоренко Е. И., Скляров И. Б. Радиофизические наблюдения вертикального дрейфа плазмы в области F ионосферы на Харьковском радаре некогерентного рассеяния // Радиотехника.—2004.—Вып. 136.—С. 102—108.
- Иванов-Холодный Г. С., Михайлов А. В. Прогнозирование состояния ионосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1980.—190 с.
- Лысенко В. Н. Измерение вертикальной составляющей скорости дрейфа плазмы и кинетических температур в ионосфере // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 3.—С. 365—368.
- 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.
- Ляшенко М. В., Скляров И. 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.
- 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.
- Михайлов А. В., Островский Г. И. Явление зимнего возрастания электронной концентрации в ночной F2-области и его возможное объяснение // Геомагнетизм и аэрномия.—1980.—20, № 1.—С. 29—32.
- Ришбет Г., Гарриот О. К. Введение в физику ионосферы. — Л.: Гидрометеиздат, 1975.—304 с.
- Таран В. И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия.—2001.—41, № 5.—С. 659—666.
- Черногор Л. Ф. Физика Земли, атмосферы и геокосмоса в свете системной парадигмы // Радиопизика и радиоастрономия.—2003.—8, № 1.—С. 56—104.
- Черногор Л. Ф. Земля — атмосфера — геокосмос как открытая динамическая нелинейная система // Космічна наука і технологія.—2003.—9, № 5/6.—С. 96—105.
- Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 1) // Нелинейный мир.—2006.—4, № 12.—С. 655—697.
- Черногор Л. Ф. «Земля — атмосфера — ионосфера — магнитосфера» как открытая динамическая нелинейная физическая система (часть 2) // Нелинейный мир.—2007.—5, № 4.—С. 198—231.
- Bilitza D. International Reference Ionosphere 2000 // Radio Sci.—2001.—36, N 2.—P. 261—275.
- Evans J. V. Seasonal and sunspot cycle variations of F-region electron temperatures and protonospheric heat fluxes // J. Geophys. Res.—1973.—78, N 13.—P. 2344.
- Farello A. F., Herraiz M., Mikhailov A. V. Global morphology of night-time $N_m F_2$ enhancements // Ann. Geophysicae.—2002.—20.—P. 1795—1806.
- Mikhailov A. V., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere // Ann. Geophysicae.—2001.—19.—P. 783—796.
- 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, N A12.—P. 1—16.
- Richards P. G. Seasonal and solar cycle variations of the ionospheric peak electron density: Comparison of measurement and models // J. Geophys. Res.—2001.—106, N A7.—P. 12803—12819.
- Rishbeth H. How the thermospheric circulation affects the ionospheric F2-layer // J. Atmos. Solar-Terr. Phys.—1998.—60.—P. 1385—1402.

25. Rishbeth H., Muller-Wodarg I. C. F. Why is there more ionosphere in January than in July? The annual asymmetry in the F2-layer // *Ann. Geophysicae.*—2006.—**24**.—P. 3293—3311.
26. 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.
27. Salah J. E., Evans J., Wand R. N. Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill // *Radio Sci.*—1974.—**9**, N 2.—P. 231—238.
28. Schunk R. W., Nagy A. F. Ionospheres: physics, plasma physics, and chemistry // *Cambridge atmospheric and space science series.*—2000.—555 p.
29. Sethi N. K., Dabas R. S., Vohra V. K. Diurnal and seasonal variations of h_mF2 deduced from digital ionosonde over New Delhi and its comparison with IRI 2001 // *Ann. Geophysicae.*—2004.—**22**.—P. 453—458.
30. 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.—**109**, N A11.—P. 1—9.

**INVESTIGATION AND MODELING
OF IONOSPHERIC PLASMA PARAMETER
VARIATIONS DURING MINIMUM PERIOD
OF THE 23-th SOLAR ACTIVITY CYCLE**

D. A. Dzyubanov, M. V. Lyashenko, L. F. Chernogor

Analysis results of diurnal and seasonal variations of ionospheric plasma parameters (electron density N , electron T_e and ion T_i temperatures) for the 23-th solar activity cycle minimum are presented. Seasonal and semiannual F2-peak anomalies were confirmed. Semi-empirical simulation of geospace dynamic processes was carried out. Regional features of spatial and temporal distribution of ionospheric parameters over the Central Europe at solar activity minimum were revealed.