

ВАРИАЦИИ ПАРАМЕТРОВ ИОНОСФЕРНОЙ ПЛАЗМЫ В ПЕРИОД СПАДА 23 ЦИКЛА СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

М.В. Ляшенко

VARIATIONS OF IONOSPHERIC PLASMA PARAMETERS DURING 23 CYCLE OF SOLAR ACTIVITY DECLINE

M.V. Lyashenko

Рассмотрены суточные и сезонные вариации параметров ионосферы в диапазоне высот 190–1030 км для четырех геофизических периодов (зимнего и летнего солнцестояния, весеннего и осеннего равноденствий). Выявлены или подтверждены региональные особенности в суточных и сезонных зависимостях концентрации электронов, температур ионов и электронов.

Diurnal and seasonal variations of ionosphere parameters in height range of 190–1030 km for fourth geophysical periods (winter and summer solstices, vernal and autumnal equinoxes) were considered. Region features in diurnal and seasonal electron density, ion and electron temperature dependences were revealed or confirmed.

Введение

Выявление, интерпретация и моделирование региональных особенностей распределения параметров ионосферы является одной из фундаментальных задач исследования геокосмоса. В настоящее время большое число публикаций [см., например, 1–5 и ссылки в них] посвящено описанию поведения параметров ионосферы в различных гелиогеофизических условиях. Большой частью в этих работах используются данные, полученные различными методами в западном полушарии.

Радар некогерентного рассеяния (НР) в Харькове является единственным и наиболее информативным источником сведений о поведении основных параметров ионосферной плазмы в средних широтах центрально-европейского региона. Данные радара НР успешно использовались для анализа процессов в ионосфере не только в спокойных условиях, но и во время редких событий – сильных магнитных бурь и затмений Солнца [6], стартов космических аппаратов [7], а также для разработки элементов модели ионосферы центрально-европейского региона [8].

Целью настоящей работы является анализ суточных и сезонных вариаций параметров ионосферы в период спада солнечной активности. Полученные результаты в дальнейшем будут использоваться в качестве реперных для построения региональной модели ионосферы над Центральной Европой.

Результаты

В рассматриваемый период геомагнитная обстановка характеризуется следующими параметрами (см. таблицу).

На рис. 1–4 представлены суточные вариации концентрации электронов, температуры ионов и электронов по данным радара НР в Харькове [9] для дат, близких к летнему (15–17 июня 2004 г.) и зимнему (16–18 декабря 2003 г.) солнцестояниям, весеннему (28–30 марта 2004 г.) и осеннему (13–15 сентября 2004 г.) равноденствиям.

Суточные вариации концентрации электронов. Для периода весеннего равноденствия (см. рис. 1) максимум электронной концентрации (N) на высоте 190 км имеет место в 13 LT.

Таблица

Индексы солнечной и геомагнитной активностей для выбранных четырех сезонов

Дата	W	$F_{10.7}$	A_p
29.03.2004 г.	169	129	12
30.03.2004 г.	121	127	12
31.03.2004 г.	95	121	7
15.06.2004 г.	87	109	16
16.06.2004 г.	113	112	7
17.06.2004 г.	106	111	7
13.09.2004 г.	65	118	4
14.09.2004 г.	70	115	8
15.09.2004 г.	67	110	28
16.09.2004 г.	80	108	14
16.12.2003 г.	71	106	25
17.12.2003 г.	92	118	11
18.12.2003 г.	114	123	10

Абсолютное значение $N \approx 0.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. После захода Солнца N уменьшается до минимального фонового уровня ночью ($N \approx 0.03 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$) и начинает возрастать с восходом Солнца. С увеличением высоты (при $h > 260$ км) в суточных вариациях проявляются два максимума в 13 и 20 LT. Следует отметить, что на больших высотах ($h \approx 470$ км) эти максимумы сравнимы по величине. На высоте 320 км значения N достигают величины около $0.75 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ днем и $0.25 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ночью. Также в суточных зависимостях имеются локальные максимумы в ночные часы (02–03 LT).

Для периода осеннего равноденствия (см. рис. 3), как и весной, в суточном ходе ниже максимума области F2 ионосферы (высоты 110–210 км) присутствует один максимум около 12–13 LT со значениями $N \approx (0.1 \div 0.5) \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. На высотах больше высоты максимума области F2 ионосферы появляются два максимума – дневной (около 12 LT) и вечерний (около 20 LT). На высоте 310 км максимальное значение $N \approx 0.75 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ днем и $0.13 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ночью. Как и для весеннего равноденствия, с увеличением высоты дневной и вечерний максимумы становятся сравнимыми по величине. В суточных вариациях N в ночные часы (около 02 LT) появляется локальный максимум на высотах $h \geq 260$ км. Для периода летнего солнцестояния (см. рис. 2) до высот $h \approx 200$ км,

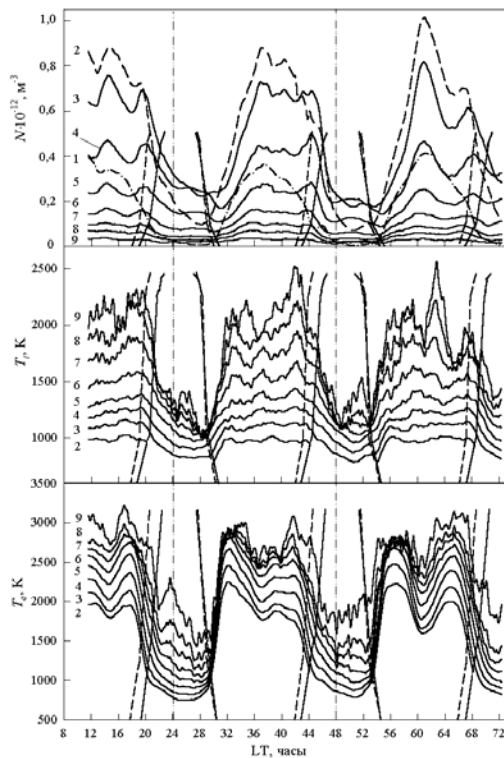


Рис. 1. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к весеннему равноденствию 28–30 марта 2004 г. Цифрами на графиках обозначены высоты: 1 – 190 км; 2 – 260 км; 3 – 320 км; 4 – 390 км; 5 – 470 км; 6 – 560 км; 7 – 660 км; 8 – 770 км; 9 – 1030 км. Здесь и далее сплошные и штриховые наклонные линии показывают восход и заход в Харькове и магнитосопреженной точке на разных высотах.

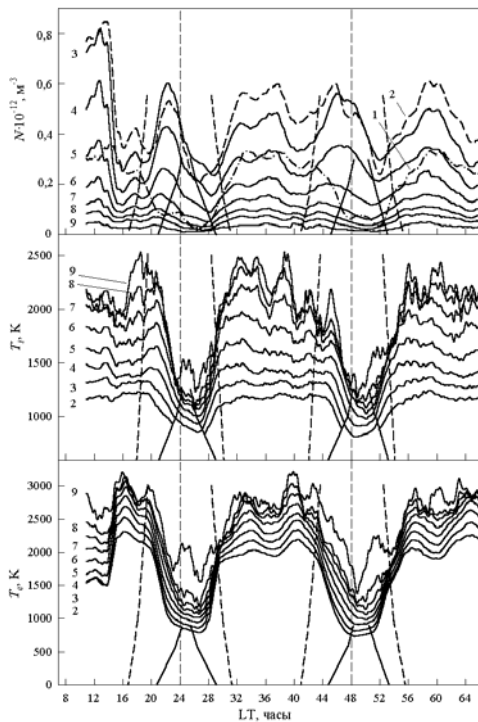


Рис. 2. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к летнему солнцестоянию 15–17 июня 2004 г. Цифрами на графиках обозначены высоты: 1 – 190 км; 2 – 260 км; 3 – 320 км; 4 – 390 км; 5 – 470 км; 6 – 560 км; 7 – 660 км; 8 – 770 км; 9 – 1030 км.

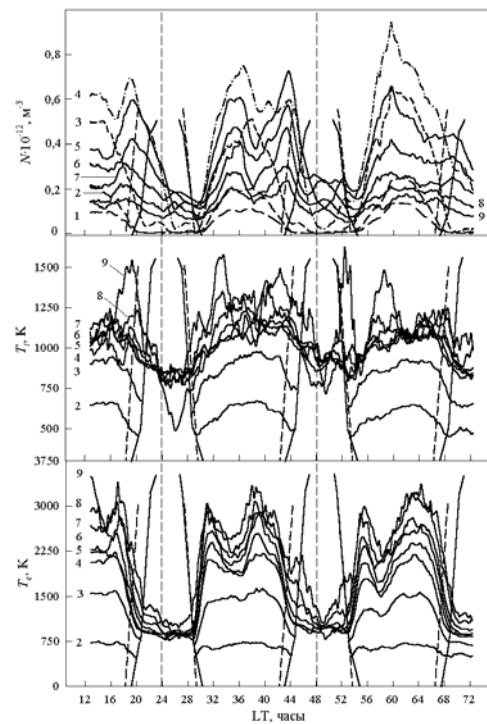


Рис. 3. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к осеннему равноденствию 13–15 сентября 2004 г. Цифрами на графиках обозначены высоты: 1 – 110 км; 2 – 160 км; 3 – 210 км; 4 – 260 км; 5 – 310 км; 6 – 360 км; 7 – 410 км; 8 – 460 км; 9 – 510 км.

т.е. ниже максимума области F2 ионосферы, в суточных вариациях N имеет место один максимум около 12 LT с абсолютным значением $N \approx 0.32 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью – $0.01 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. В дневное время на высоте 320 км максимальное значение $N \approx 0.58 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$, ночью это значение уменьшается до $0.22 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$. Концентрация электронов на всех высотах начинает увеличиваться с восходом Солнца, достигая максимального значения в околополуденные часы. Далее концентрация электронов уменьшается и второй локальный максимум в суточном ходе N (на высотах $h \geq 260$ км) наблюдается около 20 LT. Следует отметить, что на больших высотах вечерний максимум в суточных вариациях начинает появляться раньше, чем на высотах, близких к максимуму ионизации.

Зимой в суточном ходе N на всех высотах присутствует один максимум в околополуденные часы (см. рис. 4). На высоте 190 км максимальное значение $N \approx 0.6 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ днем и $0.01 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ ночью. В полуденные часы на высоте максимума области F2 ионосферы и выше наблюдается локальное увеличение концентрации электронов. Следует также отметить некоторое (до 40 % для $h = 320$ км) повышение N задолго до восхода и после захода Солнца в месте наблюдения.

Суточные вариации температуры ионов и электронов

Для периодов весеннего и осеннего равноденствий (рис. 1 и 3) температура электронов испытывает значительные суточные вариации. В суточном ходе T_e присутствуют два явно выраженных максимума –

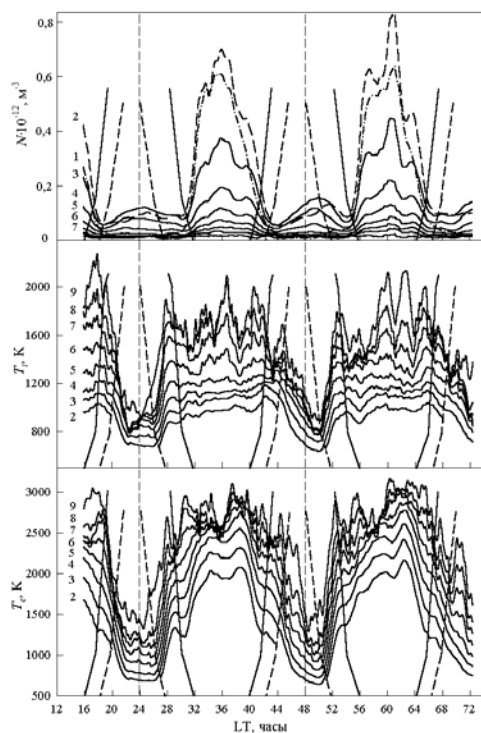


Рис. 4. Суточные вариации электронной концентрации, температуры ионов и электронов в период, близкий к зимнему солнцестоянию 16–18 декабря 2003 г. Цифрами на графиках обозначены высоты: 1 – 190 км; 2 – 260 км; 3 – 320 км; 4 – 390 км; 5 – 470 км; 6 – 560 км; 7 – 660 км; 8 – 770 км; 9 – 1030 км.

утром (около 8–11 LT) и днем (около 14–16 LT). Весной и осенью на высоте 260 км дневные значения $T_e \approx 2250$ К. Весной на высоте 1030 км $T_e \approx 3000$ К, а для периода осеннего равноденствия такие значения температуры электронов достигаются на меньших высотах ($h \approx 510$ км). Ночью на высоте 260 км $T_e \approx 750$ К весной и 375 К осенью. На высоте 500 км $T_e \approx 1000$ К весной и 1125 К осенью. С ростом высоты наблюдается смещение утреннего и дневного максимумов на более ранние и поздние часы соответственно. Также в суточном ходе имеют место локальные экстремумы в околополночные часы.

Летом (см. рис. 2) на всех высотах в суточном ходе T_e присутствуют два максимума – утренний (около 11 LT) и дневной (около 16 LT). Как и для периодов весеннего и осеннего равноденствий, положение этих максимумов с ростом высоты изменяется. Летом на высоте 260 км дневное максимальное значение $T_e \approx 2200$ К, на высоте 1030 км T_e достигает значений порядка 3250 К. Ночью для высот 260 и 1030 км T_e составляет 750 и 2100 К соответственно.

Для периода зимнего солнцестояния (см. рис. 4), так же как и летом, в суточных вариациях T_e присутствуют два основных максимума примерно в такое же время суток. Температура электронов начинает резко увеличиваться после восхода Солнца в магнитосопряженной точке. Далее в суточном ходе имеется небольшое уменьшение температуры, происходящее на время местного восхода Солнца. Далее T_e продолжает увеличиваться до своего максимального значения (на высотах 260 и 1030 км T_e достигает значений 2100 и 3150 К соответственно).

После захода Солнца в месте наблюдения T_e начинает медленно уменьшаться до своего минимального фонового значения ночью (на высоте 260 и 1030 км $T_e \approx 600$ и 1300 К соответственно).

Локальный дневной минимум в суточных вариациях температуры электронов для всех сезонов приходится на 12–13 LT.

Температура ионов в дневной ионосфере весной и осенью на высоте 260 км примерно равна 1050 и 1075 К соответственно, ночью $T_i \approx 500$ К весной и 750 К осенью. Весной на высоте ≈ 500 км T_i не превышает 1050 К, осенью $T_i \approx 1175$ К. После восхода Солнца T_i медленно увеличивается, образуя в суточных вариациях протяженный максимум, далее она уменьшается до ночных значений.

Для периодов летнего и зимнего солнцестояний вариации температуры ионов подобны вариациям T_i весной и осенью. Летом в дневное время максимальное значение $T_i \approx 1200$ К на высоте 260 км и 2500 К на высоте 1030 км. Ночью T_i не превышает 1500 К на высоте 1030 км и 500 К на высоте 260 км. В освещенный период суток зимой $T_i \approx 1100$ К на высоте 260 км и 2100 К на высоте 1030 км. Ночью для этих же высот T_i не превышает 600 и 950 К соответственно.

Сезонные вариации параметров ионосферы

Из рис. 1–4, можно видеть, что параметры ионосферной плазмы существенно изменяются в течение года. Значения N летом ниже максимума области F2 ионосферы примерно в два раза меньше, чем в зимний период. Такое поведение концентрации электронов получило название сезонной аномалии. С увеличением высоты сезонная аномалия постепенно исчезает и летние значения N начинают превышать зимние. Для весеннего и осеннего равноденствий различие в значениях N невелико и составляет примерно 15–20 % для рассматриваемого высотного диапазона.

Для температуры электронов сезонная зависимость выражается в том, что летние значения превышают зимние примерно на 100–150 К днем и на 150–800 К ночью.

Обсуждение результатов эксперимента

Суточные вариации концентрации электронов

Концентрация электронов в течение суток испытывает значительные вариации для всех рассмотренных периодов. В периоды равноденствий происходит переход от зимнего к летнему типу суточных вариаций и наоборот. Данный процесс происходит сравнительно быстро в течение примерно двух недель [2, 4]. Для 27–31 марта (см. рис. 1) такой переход произошел ранее и наблюдаемые суточные вариации характерны для летнего типа. Дневные вариации концентрации электронов ниже максимума области F2 ионосферы определяются, в основном, значением зенитного угла Солнца. Локальные максимумы в ночные часы, по-видимому, связаны с действием двух факторов. Первый фактор – термосферные ветры со скоростями порядка 100–200 м/с [1], направленные ночью к экватору и поднимающие область F2, что приводит к уменьшению скорости рекомбинации [2]. Второй фактор – направленный вниз поток плазмы из плазмосферы [10]. Вклад

термосферных ветров и потоков из плазмосферы для поддержания ночной области F2 примерно одинаков. Результат действия этих процессов может быть достаточным для поддержания концентрации электронов на уровне $0.1 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ зимой и $0.4 \cdot 10^{12} \text{ м}^{-3}$ летом на высоте 320 км.

Дневные значения концентрации электронов в максимуме области F2 ионосферы определяются интенсивностью солнечного ионизирующего излучения и соотношением между концентрациями атомарного кислорода O и молекулярных компонент O₂ и N₂.

Для 12–16 сентября (см. рис. 3) вариации N подобны вариациям концентрации электронов для периода весеннего равноденствия. Судя по форме суточного хода, его можно отнести к летнему типу.

Для периода летнего солнцестояния (см. рис. 2) до высот ниже максимума области F2 ионосферы поведение N зависит, в основном, от значения зенитного угла Солнца.

Зимой (см. рис. 4) процесс увеличения концентрации электронов в околополуночные часы, по видимому, связан с потоками частиц из плазмосферы, а также действием термосферных ветров [3].

Суточные вариации температур ионов и электронов

Для периодов весеннего и осеннего равноденствий (см. рис. 1 и 3) околополуночные максимумы в суточных вариациях температуры электронов связаны с тем, что в ночной спокойной среднеширотной ионосфере, когда образование фотоэлектронов под действием солнечного ионизирующего излучения прекращается, единственным источником тепла остается тепло, запасенное днем в плазмосфере [5]. Эти потоки тепла из плазмосферы способны увеличить температуру электронов в ионосфере. Более явно данный процесс выражен на больших высотах.

Локальный минимум температуры электронов в суточном ходе в околополуденные часы объясняется тем, что охлаждение электронного газа происходит на фоне возрастания концентрации электронов и увеличения интенсивности передачи тепла от электронов к ионам. В этом случае $T_e \sim N^{-1}$ [6].

Сезонные вариации параметров ионосферы

Из рассмотрения периодов летнего и зимнего солнцестояния следует, что на высотах 190 и 260 км околополуденные зимние значения N превышают летние примерно в два раза. На высоте 320 км концентрации электронов сравниваются, а на высотах $h \geq 390$ км летние значения N начинают превышать зимние. Для ночных значений, как было сказано выше, наблюдается обратная зависимость – значения N зимой меньше, чем летом.

Для объяснения сезонной аномалии области F2 ионосферы предложен ряд механизмов [см., например, 2]. Основным механизмом, объясняющим сезонную аномалию, является сезонное изменение ионного состава на высотах вблизи максимума ионизации области F2 ионосферы.

Дневные летние значения температуры электронов приблизительно равны значениям T_e зимой и составляют около 2400 и 3000 К на высотах 320 и 1030 км соответственно. Ночные значения T_e летом также превосходят зимние. По данным Миллстоун

Хилл наблюдается обратное соотношение между летними и зимними температурами. В ночное время зимние температуры превышают летние примерно на 600 К на высоте 300 км [1]. По данным радара в Харькове летние значения T_e превышают зимние значения примерно на 300 и 800 К на высотах 320 и 1030 км соответственно. Температура ионов летом превышает зимние значения T_i примерно на 100–450 К днем и на 150–400 К ночью. Такие сезонные вариации T_e и T_i отражают качественные и количественные различия в поведении параметров ионосферы в западном и восточном полушариях.

Выводы

Для средних широт центрально-европейского региона подтверждено, что основные параметры ионосферной плазмы испытывают значительные суточные и сезонные вариации. Важно, что эти вариации, вообще говоря, не являются монотонными.

Как и следовало ожидать, вариации N для высот ниже максимума области F2 ионосферы как зимой, так и летом контролируются в большей степени величиной зенитного угла Солнца. На высотах, больших высоты максимума ионизации, ночью появляются локальные максимумы, обусловленные потоками частиц из плазмосферы в ионосферу.

Температура электронов также испытывает значительные суточные вариации. В суточных вариациях для температуры электронов присутствуют два максимума – утренний (около 11 LT) и дневной (около 16 LT). С увеличением высоты T_e и T_i увеличиваются, положение утреннего и дневного максимумов в суточных вариациях смещается на более ранние и поздние часы соответственно.

Подтверждено существование эффекта сезонной аномалии. Установлено, что в интервале высот 190–260 км значения N зимой примерно в два раза больше летних. С увеличением высоты значения N летом и зимой сравниваются и при $h \geq 390$ км летние значения N превышают зимние. Основным механизмом, объясняющим сезонную аномалию, может быть связан с сезонными вариациями в нейтральном составе на высотах вблизи максимума области F2 ионосферы.

Для температуры электронов сезонные вариации выражаются в том, что днем летние значения T_e примерно на 100–150 К больше, чем зимние значения, ночью – на 150–800 К. Для температуры ионов имеет место подобная ситуация – днем летние значения T_i примерно на 100–450 К больше зимних, ночью – на 150–400 К. Такие сезонные изменения температур ионов и электронов подтверждают несимметричность земной ионосферы вследствие несовпадения географических и магнитных полюсов, что приводит к качественным и количественным различиям в пространственно-временном распределении параметров ионосферы в западном и восточном полушариях.

Автор благодарит д.ф.-м.н. проф. Черногора Л.Ф. за ценные замечания и интерес к работе, а также Емельянова Л.Я., Кононенко А.Ф., Черняева С.В. за проведение экспериментов на радаре некогерентного рассеяния.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брюнелли Б.Е., Намгаладзе А.А. Физика ионосферы. М.: Наука, 1988. 528 с.
2. Иванов-Холодный Г.С., Михайлов А.В. Прогнозирование состояния ионосферы. Л.: Гидрометеоздат, 1980. 190 с.
3. Михайлов А.В., Островский Г.И. Явление зимнего возрастания электронной концентрации в ночной F2-области и его возможное объяснение // Геомагнетизм и аэрномия. 1980. Т. 20, № 1. С. 29–32.
4. Mikhailov A.V., Schlegel K. Equinoctial transitions in the ionosphere and thermosphere // Annales Geophys. 2001. V. 19. P. 783–796.
5. Schunk R.W., Nagy A.F. Ionospheres: Physics, Plasma Physics, and Chemistry. Cambridge atmospheric and space science series, 2000. 555 p.
6. Григоренко Е.И., Пазюра С.А., Пуляев В.А. и др. Динамические процессы в ионосфере во время геокоsmической бури 30 мая и затмения Солнца 31 мая 2003 г. // Космічна наука і технологія. 2004. Т. 10, № 1. С. 12–25.
7. Бурмака В.П., Таран В.И., Черногор Л.Ф. Волновые возмущения в ионосфере, сопутствовавшие стартам ракет на фоне естественных переходных процессов // Геомагнетизм и аэрномия. 2004. Т. 44, № 4. С. 518–534.
8. Дзюбанов Д.А., Захаров И.Г., Ляшенко М.В. Моделирование электронной концентрации в максимуме области F2 ионосферы по данным радара некогерентного рассеяния в Харькове // Труды XXI Всероссийской научной конференции по распространению радиоволн. Йошкар-Ола, 2005. С. 190–193.
9. Таран В.И. Исследования ионосферы в естественном и искусственно возмущенном состояниях методом некогерентного рассеяния // Геомагнетизм и аэрномия. 2001. Т. 41, № 5. С. 659–666.
10. Грингауз К.И., Бассоло В.С. Структура и свойства плазмосферы Земли. Экспериментальные данные и проблемы их интерпретации (Обзор) // Геомагнетизм и аэрномия. 1990. Т. 30, № 1. С. 1–17.
11. Salah J.E., Evans J., Wand R.N. Seasonal variations in the thermosphere above Millstone Hill // Radio Sci. 1974. V. 9, N. 2. P. 231–238.

*Институт ионосферы Национальной академии наук Украины и
Министерства образования и науки Украины, Харьков*