

**Л.Я. ЕМЕЛЬЯНОВ**, канд. физ.-мат. наук, зав. отделом, Институт ионосферы, Харьков;

**А.А. КОНОНЕНКО**, м.н.с., Институт ионосферы, Харьков

## **ВАРИАЦИИ ЧАСТОТЫ $f_oF2$ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ**

Представлены результаты наблюдений ионосферы с помощью ионозонда “Базис” (Харьков) в течение двух циклов солнечной активности. Проведено их сравнение с данными дигизондов DPS-4 в Прухонице (Чехия) и Дурбесе (Бельгия), расположенных на близкой широте.

**Ключевые слова:** метод вертикального зондирования ионосферы, ионозонд, критическая частота, временные вариации критической частоты, цикл солнечной активности.

**Постановка задачи.** Метод вертикального импульсного зондирования ионосферы в настоящее время продолжает оставаться одним из основных методов диагностики ионосферы [1–4]. Использование ионозонда «Базис» Ионосферной обсерватории Института ионосферы, которая находится вблизи г. Харькова (49.6° с.ш., 36.3° в.д.), позволяет исследовать долготные эффекты в ионосфере, благодаря удачному расположению на широте, близкой к широтам европейских станций в Прухонице (Чехия, 50.0° с.ш., 14.6° в.д.) [5] и Дурбесе (Бельгия, 50.1° с.ш., 4.6° в.д.) [6]. Выбор этих станций для этой цели обоснован в [7, 8]. В работах [7–9] анализировались данные станций вертикального зондирования для отдельных суток и сезонов. Интерес представляет анализ долговременных вариаций критической частоты слоя F2 ионосферы ( $f_oF2$ ) и изучение её связи с солнечной активностью (СА) на протяжении продолжительного периода. Такого рода исследования важны для изучения среднеширотной ионосферы над центральноевропейским регионом. Актуальность состоит также в том, что 24-й цикл активности Солнца отличается от предыдущих циклов задержкой возрастания активности и умеренной активностью в его максимуме.

**Цель статьи** – анализ данных ионозонда «Базис» Института ионосферы, полученных на протяжении 1997–2012 гг. при различном состоянии космической погоды и сопоставление их с аналогичными данными ионозондов, расположенных на близкой широте.

**Аппаратура.** Ионозонд “Базис” используется в составе радара некогерентного рассеяния для его калибровки с целью определения концентрации электронов, а также автономно в отдельных экспериментах. Он позволяет проводить вертикальное, наклонное и трансionoсферное импульсное зондирование. Его основные параметры приведены в [7]. В частности, диапазон рабочих частот в режиме вертикального зондирования

1–20 МГц, разрешающая способность по высоте – 3 км, импульсная мощность передатчика не менее 15 кВт, чувствительность приемника – 15 мкВ. Приёмная и передающая антенны – ромбические с вертикальным излучением, расположены ортогонально. Каждая антенна состоит из двух ромбов. Большой ромб работает в диапазоне 1–6 МГц, а малый – 6–20 МГц. Погрешность измерения критической частоты – 0,05 МГц.

Для вертикального зондирования ионосферы в Прухонице и Дурбесе используется дигизонд DPS-4, параметры и описание которого приведены в [10].

**Временные вариации критической частоты.** Проведен анализ данных ионозона «Базис» Института ионосферы, полученных на протяжении 1997–2012 гг. при различном состоянии космической погоды. На рис. 1 приведены результаты измерений критической частоты слоя F2 ионосферы в характерные для анализа времена суток: полдень и полночь. Здесь же представлены вариации индексов солнечной ( $F_{10,7}$ ) и геомагнитной ( $Ap$ ) активностей, а также вычисленные тренды  $f_oF2$  и  $F_{10,7}$ .

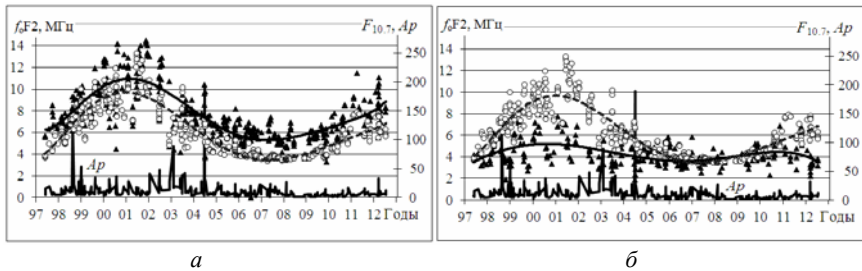


Рис. 1 – Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений критической частоты  $f_oF2$  (треугольники) на фоне вариаций индексов солнечной активности  $F_{10,7}$  (кружки) и геомагнитной активности  $Ap$ . Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций  $f_oF2$ , а штриховыми –  $F_{10,7}$

Как видно из рис. 1, при наличии возмущений в ионосфере ( $Ap > 10$ ) отклонения значений  $f_oF2$  от тренда возрастают.

На рис. 2, а и 2, б представлены результаты измерений  $f_oF2$ , а также индексов  $F_{10,7}$  и  $Ap$ , при отсутствии геомагнитных возмущений.

Видно, что временные вариации  $f_oF2$  коррелируют с вариациями индекса солнечной активности (СА)  $F_{10,7}$ . Экстремальные значения тренда  $\langle f_oF2 \rangle$  близки по времени к экстремальным значениям сглаженных временных зависимостей индекса  $F_{10,7}$ .

Изменение тренда  $\langle f_oF2 \rangle$  измеренной в полдень критической частоты на протяжении 23 цикла СА (май 1996 г. – январь 2009 г.) в 1,4 раза больше прироста  $\langle f_oF2 \rangle$  во время 24 цикла (начало в январе 2009 г.): отношения максимального значения к минимальному в этих циклах СА составляют 2,4 и 1,7 соответственно. Такое отличие вариаций  $f_oF2$  в двух циклах СА

соответствует отличию вариаций концентрации электронов в максимуме слоя F2 примерно в два раза. Аналогичные соотношения имели место и для индекса  $F_{10.7}$ : его изменение в 23 цикле СА в среднем в 1,5 раза больше изменения во время 24 цикла. Среднее значение частоты  $f_oF2$ , измеренной в околополуночное время, изменилось в 1,5 и 1,3 раза в течение 23 и 24 циклов соответственно, т. е. отличие составляет около 1,2 раза.

Минимальные значения в вариациях  $\langle f_oF2 \rangle$  для обоих циклов близки, также как и минимумы в сглаженных зависимостях индекса  $F_{10.7}$ . Они равны 5,5 МГц (полдень) и 3,5 МГц (полночь).

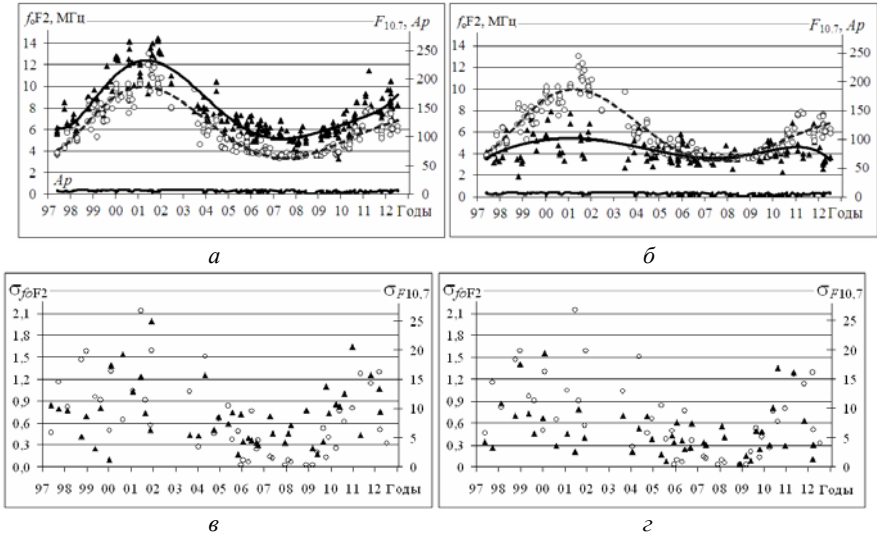


Рис. 2 – Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений частоты  $f_oF2$  (треугольники), индекса  $F_{10.7}$  (кружки) и их среднеквадратических отклонений (в, з), а также индекса  $Ap$  (а, б), при отсутствии геомагнитных возмущений. Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций  $f_oF2$ , а штриховыми –  $F_{10.7}$

Абсолютные значения среднеквадратических отклонений ( $\sigma_{foF2}$ ) частоты  $f_oF2$ , измеряемой в околополуночное время, ниже, но такого же порядка, как и вблизи полудня (рис. 2, в, з). В обоих случаях они увеличивались при росте СА аналогично тому, как возрастал разброс значений индекса  $F_{10.7}$ . Их относительные значения ( $\sigma_{foF2}/f_oF2$ ) в среднем составляли 10–12% для дня и ночи независимо от активности Солнца.

На рис. 3 представлены временные вариации критических частот слоя F2, измеренные в Харькове, Прухонице [5] и Дурбесе [6] при спокойном состоянии ионосферы вблизи местных полудня (рис. 3, а) и полуночи (рис. 3, б). Здесь же приведены относительные расхождения в результатах

измерения  $f_oF2$  в Харькове–Прухонице и Харькове–Дурбесе  $\delta = (f_oF2_{\text{Харьков}} - f_oF2_{\text{Прухонице или Дурбес}}) / f_oF2_{\text{Харьков}} \cdot 100\%$ .

Видно, что вариации критической частоты качественно подобны. Преобладающие отличия в вариациях  $f_oF2$  имеют место в ночное время между данными Харькова и Дурбеса (рис. 3, б, з). Эти отличия тем больше, чем меньше активность Солнца (период с 2005 по 2010 г.). Наибольшие отличия (до 40–50% для Дурбеса и 30% для Прухонице в полуденное и полуночное время) наблюдались в декабре 2008 г. (рис. 3, в, з). Отметим, что околополуденные вариации  $f_oF2$  на всех трёх станциях имели явный колебательный характер с периодом один год (см. рис. 3, б), что объясняется эффектом «сезонной аномалии» [11]). Причем, амплитуда колебаний с возрастанием СА увеличилась примерно с 0,9 МГц в 2007–2008 гг. до 2,2 МГц в 2011–2012 гг. (т.е. в 2,4 раза). При этом индекс  $F_{10,7}$  вырос в среднем в 1,9 раза.

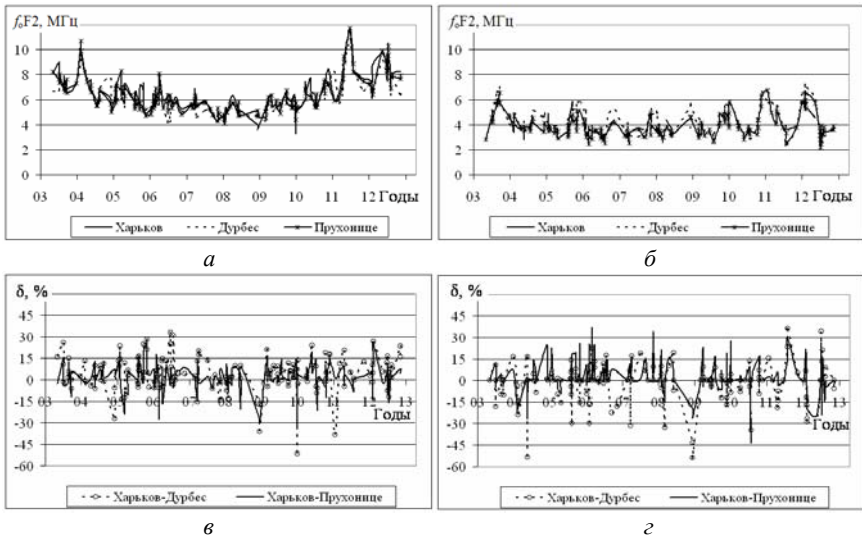


Рис. 3 – Временные вариации критических частот в Харькове, Прухонице и Дурбесе в околополуденное (а) и околополуночное (б) время и их относительные расхождения (в, з)

**Выводы.** Временные вариации критической частоты  $f_oF2$  коррелируют с вариациями индекса солнечной активности  $F_{10,7}$ . Изменения трендов  $\langle f_oF2 \rangle$  критической частоты, измеренной в полдень и полночь, во время 23 цикла СА в 1,4 (день) и 1,2 (ночь) раза больше изменений  $\langle f_oF2 \rangle$  во время 24 цикла: отношения максимального значения  $\langle f_oF2 \rangle$  к минимальному в 23 и 24 циклах СА составили соответственно 2,4 и 1,7 днём, 1,5 и 1,3 ночью. Дисперсия значений частоты  $f_oF2$  увеличивается при росте солнечной активности

подобно тому, как возрастает дисперсия индекса  $F_{10,7}$ . Относительные значения среднеквадратического отклонения частоты  $f_oF2$  в среднем составили 10–12% при любой активности Солнца. Вариации частоты  $f_oF2$ , измеренной в околополуденное и околополуночное время в Харькове, Прухонице и Дурбесе, качественно подобны. Наибольшие отличия наблюдались при минимальной СА зимой 2008 г. между вариациями  $f_oF2$  ионозондов Харькова и Дурбеса. Амплитуда сезонных колебаний ночных значений  $f_oF2$  с возрастанием солнечной активности увеличилась примерно в 2,4 раза, в то время как индекс  $F_{10,7}$  вырос в среднем в 1,9 раза.

**Список литературы:** 1. *McNamara L.F.* Assimilation procedures for updating ionospheric profiles below the F2 peak / *L.F. McNamara, J. M.J. Angling, S. Elvidge et al.* // *Radio Sci.* – 2013. – V. 48, – P. 143 – 157. 2. *Reinisch B.W.* Recent advances in real time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes / *B.W. Reinisch, X. Huang, I.A. Galkin et al.* // *J. Atmos. Terr. Phys.* – 2005. – Vol. 67, No. 12. – P. 1054 – 1062. 3. *McNamara L.F.* Assimilation of ionosonde profiles into a global ionospheric model / *L.F. McNamara, G.J. Bishop, J.A. Welsh* // *Radio Sci.* – 2011. – V. 46. – P. 1 – 14. 4. *Lei J.* Variations of electron density based on longterm incoherent scatter radar and ionosonde measurements over Millstone Hill / *J. Lei, L. Liu, W. Wan, S.-R. Zhang* // *Radio Sci.* – 2005. – V. 40. – P. 1 – 10. RS2008 doi:10.1029/2004RS003106. 5. *Pruhonice / Digisonde-4D / Czech Republic.* – <http://147.231.47.3>. 6. *Dourbes / Digisonde DPS-4/ Belgium* – <http://digisonde.oma.be>. 7. *Емельянов Л.Я.* Ионозонд “Базис” Института ионосферы как средство для мониторинга состояния ионосферы / *Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко* // *Радиотехника: Всеукр. міжвед. науч.-техн. сб.* – 2011. – Вып. 167. – С. 30 – 33. 8. *Емельянов Л.Я.* Сезонные наблюдения ионосферы с помощью ионозонда “Базис” института ионосферы / *Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко* // *Вестник национального технического университета «Харьковский политехнический институт»: Сборник научных трудов. Тематический выпуск “Радиофизика и ионосфера”, № 57 (963).* Харьков: НТУ «ХПИ». – 2012. С. 29–34. 9. *Черногор Л.Ф.* Волновые возмущения концентрации электронов в слое F2 ионосферы: сезонно-суточные вариации / *Л.Ф. Черногор, В.В. Барабан* // *Радиофизика и радиоастрономия.* – 2012. – Т. 17, № 4. – С. 353-362. 10. *Ратовский К.Г.* Современный цифровой ионозонд DPS-4 и его возможности / *К.Г. Ратовский, А.П. Потехин, А.В. Медведев, В.И. Куркин* // *Солнечно-земная физика.* – 2004. – Т. 118, № 5. – С. 102 – 104. 11. *Иванов-Холодный Г.С.* Прогнозирование состояния ионосферы / *Г.С. Иванов-Холодный, А. В. Михайлов.* – Л.: Гидрометеиздат, 1980.–190 с.

*Поступила в редколлегию 19.11.2013*

УДК 550.388:551.510.535:621.396

**Вариации частоты  $f_oF2$  среднеширотной ионосферы в течение двух циклов солнечной активности / Л.Я. Емельянов, А.А. Кононенко** // *Вісник НТУ “ХПІ”. Серія: Радіофізика та іоносфера.* – Х.: НТУ “ХПІ”, 2013. – № 33 (1066). – С. 84-88. *Бібліогр.:* 11 назв.

Наведено результати спостережень іоносфери за допомогою іонозонда “Базис” (Харків) на протязі двох циклів сонячної активності. Проведено їх порівняння з даними дигізондів DPS-4 в Прухонице (Чехія) і в Дурбесі (Бельгія), що розташовані на близькій широті.

**Ключові слова:** метод вертикального зондування іоносфери, іонозонд, критична частота, часові варіації критичної частоти, цикл сонячної активності.

The results of ionospheric observations with ionosonde “Bazis” (Kharkiv) during two solar cycles are presented. A comparison of the Kharkiv ionosonde data with ones of DPS-4 digisondes in Pruhonice (Czech Republic) and Dourbes (Belgium) located at such latitudes is carried out.

**Keywords:** vertical sounding, ionosonde, critical frequency, temporal variations of the critical frequency, solar cycle.