

## РАДИОФИЗИЧЕСКИЕ НАБЛЮДЕНИЯ ВАРИАЦИЙ ЧАСТОТЫ $f_oF_2$ СРЕДНЕШИРОТНОЙ ИОНОСФЕРЫ В ТЕЧЕНИЕ ДВУХ ЦИКЛОВ СОЛНЕЧНОЙ АКТИВНОСТИ

### Введение

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 ( $f_oF_2$ ) и изучение ее 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 работы – 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. Приемная 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 околополуденных и околополуночных значений критической частоты слоя F2 ионосферы

Проведен анализ данных ионозонда «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 ( $A_p$ ) активностей, а также вычисленные тренды  $f_oF_2$  и  $F_{10,7}$ .

Как видно из рис. 1, при наличии возмущений в ионосфере ( $A_p > 10$ ) отклонения значений  $f_oF_2$  от тренда возрастают.

На рис. 2, а, б представлены результаты измерений  $f_oF_2$ , а также индексов  $F_{10,7}$  и  $A_p$ , при отсутствии геомагнитных возмущений.

Видно, что временные вариации  $f_oF2$  коррелируют с вариациями индекса солнечной активности  $F_{10.7}$ . Экстремальные значения тренда  $\langle f_oF2 \rangle$  близки по времени к экстремальным значениям сглаженных временных зависимостей индекса  $F_{10.7}$ .

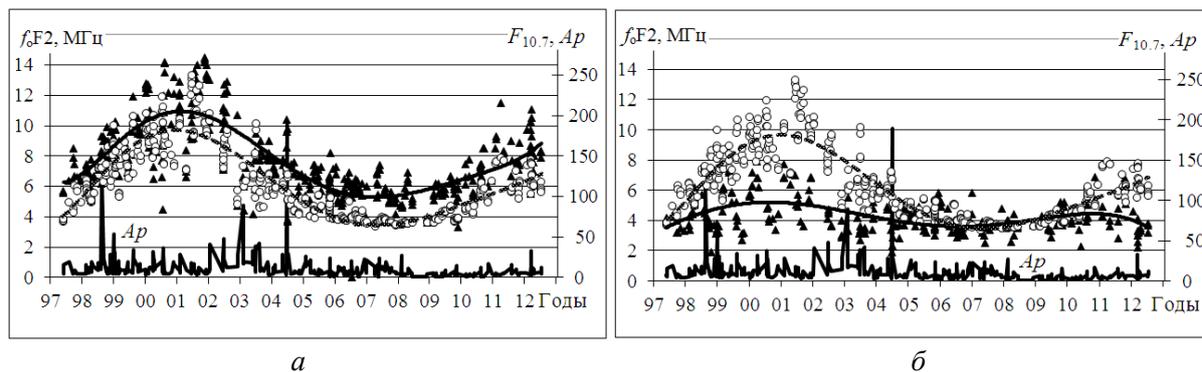


Рис. 1. Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений критической частоты  $f_oF2$  (треугольники) на фоне вариаций индексов солнечной активности  $F_{10.7}$  (кружки) и геомагнитной активности  $A_p$ .

Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций  $f_oF2$ , а штриховыми –  $F_{10.7}$

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.

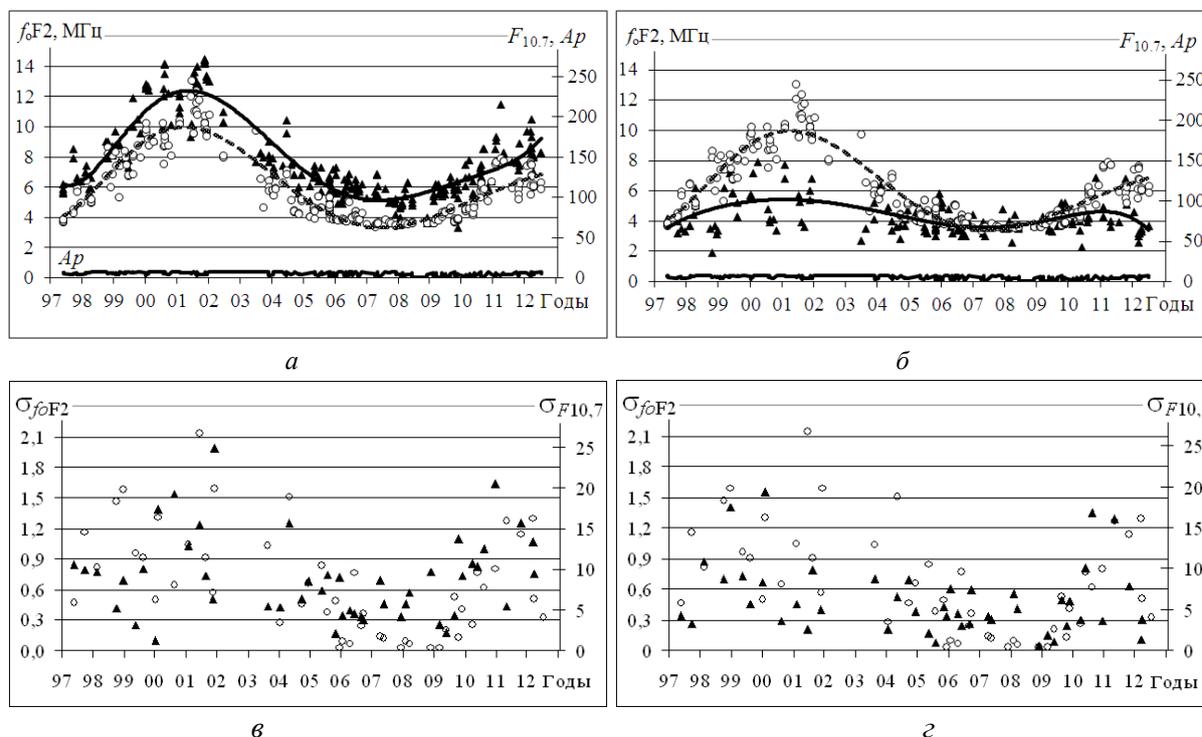


Рис. 2. Временные вариации полуденных (а) и полуночных (б) значений частоты  $f_oF2$  (треугольники), индекса  $F_{10.7}$  (кружки) и их среднеквадратических отклонений (в, г), а также индекса  $A_p$  (а, б), при отсутствии геомагнитных возмущений.

Сплошными линиями показаны тренды временных вариаций  $f_oF2$ , а штриховыми –  $F_{10.7}$

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  $5,5 \text{ МГц}$  (полдень) и  $3,5 \text{ МГц}$  (полночь).

Абсолютные значения среднеквадратических отклонений ( $\sigma_{f_oF2}$ ) частоты  $f_oF2$ , измеряемой в околополуденное 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 ( $\sigma_{f_oF2}/f_oF2$ ) 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  $\delta = (f_oF2_{\text{Харьков}} - f_oF2_{\text{Прухонице/Дурбес}}) / f_oF2_{\text{Харьков}} \cdot 100\%$ .

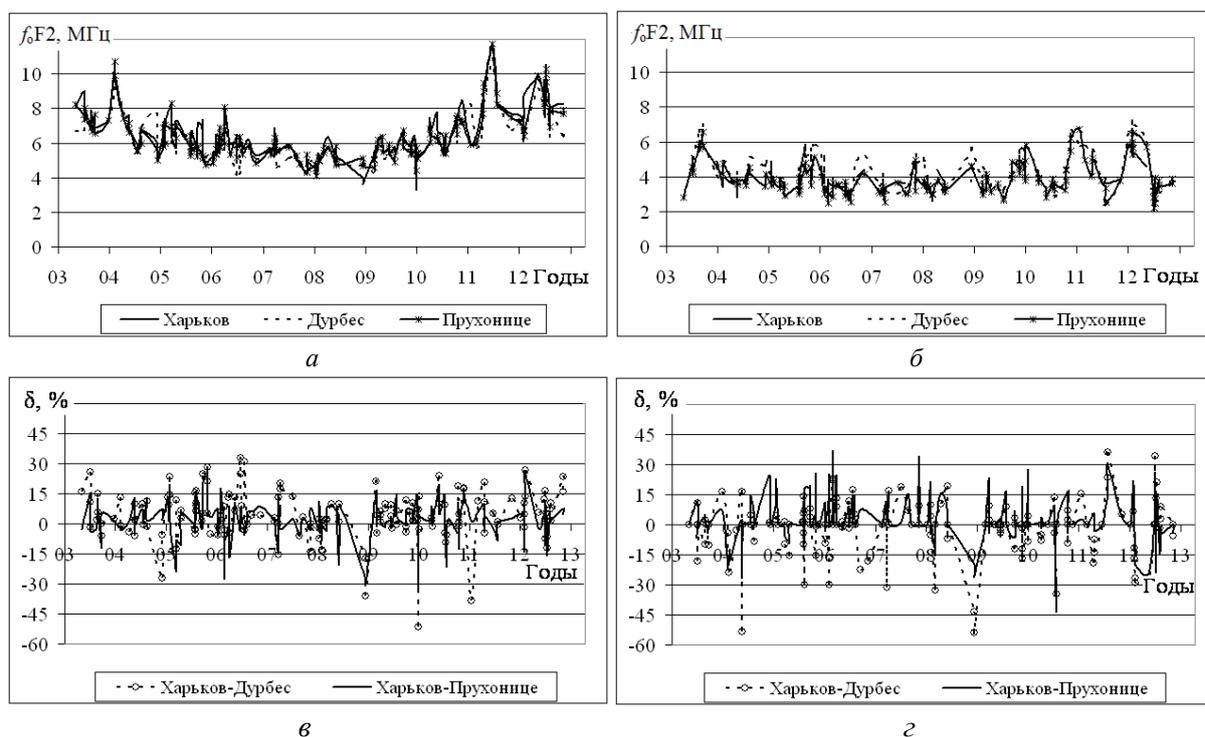


Рис. 3. Временные вариации критических частот в Харькове, Прухонице и Дурбесе в околополуденное (а) и околополуночное (б) время и их относительные расхождения (в, з)

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 околополуночные вариации  $f_oF2$  на всех трех 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  $0,9 \text{ МГц}$  в 2007–2008 гг. до  $2,2 \text{ МГц}$  в 2011 – 2012 гг. (т.е. в 2,4 раза). При этом индекс  $F_{10,7}$  вырос в среднем в 1,9 раза.

### Суточно-сезонные вариации критической частоты

Результаты ионосферных измерений показали, что при спокойном состоянии ионосферы ионограммы станции “Базис” и дигизондов DPS-4 в Прухонице и Дурбесе находятся в удовлетворительном согласии при учете разницы местного времени, которая составляет

1 ч 27 мин и 2 ч 07 мин соответственно.

На рис. 4 представлены временные вариации  $f_oF2$ , измеренные в Харькове, Прухонице [5] и Дурбесе [6] при спокойном состоянии ионосферы в периоды весеннего (а) и осеннего (б) равноденствия. Здесь же приведены индексы солнечной ( $F_{10,7}$ ) и магнитной ( $A_p$ ) активности для рассматриваемых дней.

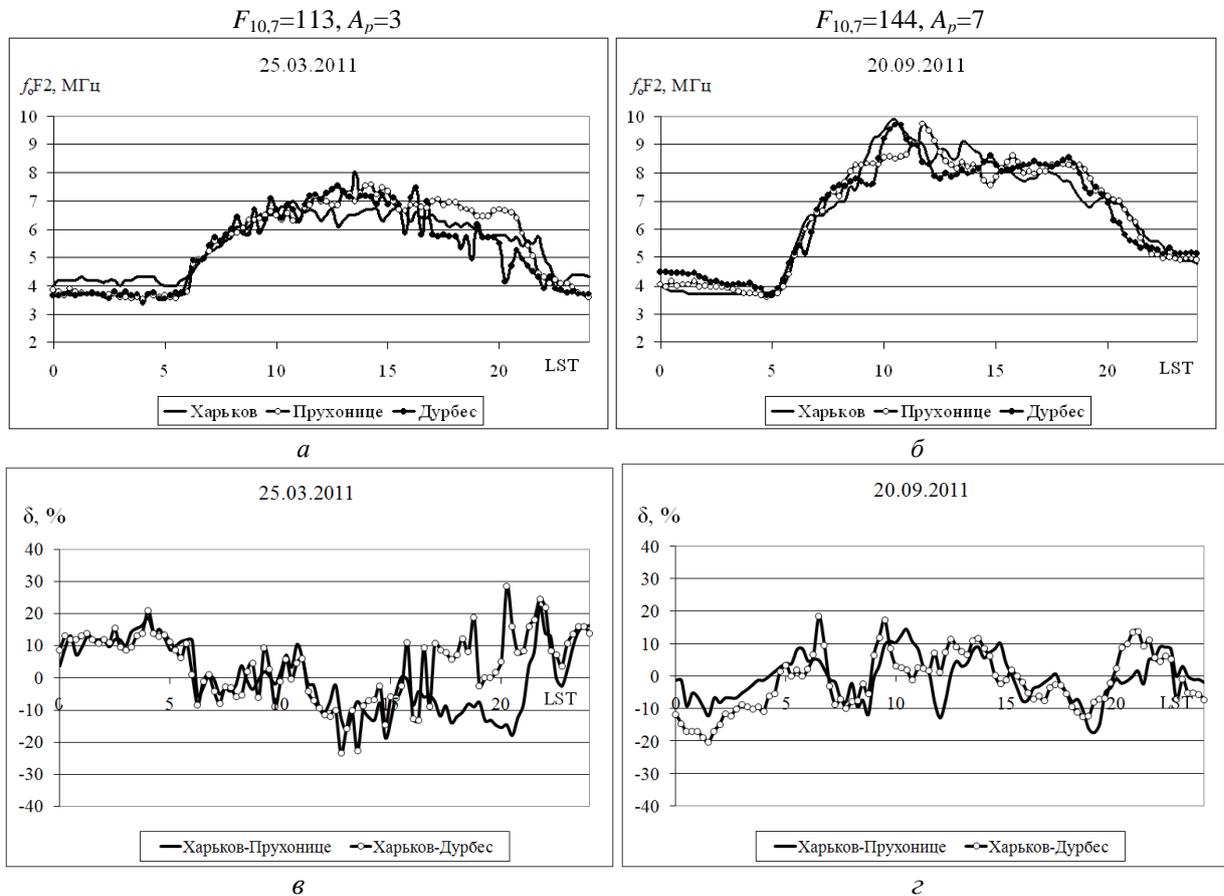


Рис. 4. Временные вариации критических частот в периоды весеннего (а) и осеннего (б) равноденствия и их относительных расхождений (в, г)

На рис. 5 представлены временные вариации критических частот  $f_oF2$ , полученные в периоды летнего и зимнего солнцестояния.

В результате сравнения данных харьковской станции с данными дигизондов DPS-4, расположенных в Прухонице и Дурбесе, выяснено, что вариации критической частоты качественно подобны (см. рис. 4 и 5). Однако в ночное и дневное время расхождения между значениями  $f_oF2$  заметно возрастали, достигая 22–26 % летом и 37 % зимой. При этом различия между данными  $f_oF2$  харьковской станции и станции в Дурбесе большие, чем между аналогичными данными ионизондов Харькова и Прухонице, расстояние между которыми примерно в 1,5 раза меньше. Это свидетельствует о долготных эффектах в ионосфере. В утреннее и вечернее время вариации  $f_oF2$  трех станций имеют слабые отличия (на уровне статистического разброса данных) за исключением вариаций 25 марта 2011 г., когда различия имели разный знак и достигали +28 % между данными Харькова и Дурбеса и –18% между данными Харькова и Прухонице (см. рис. 4, а и б).

На рис. 6 приведены взаимные корреляционные функции  $r(\tau)$  критических частот  $f_oF2$ , измеренных 22 июня и 22 декабря 2011 г. в Харькове и Прухонице (сплошная линия), а также в Харькове и Дурбесе (линия с кружками).

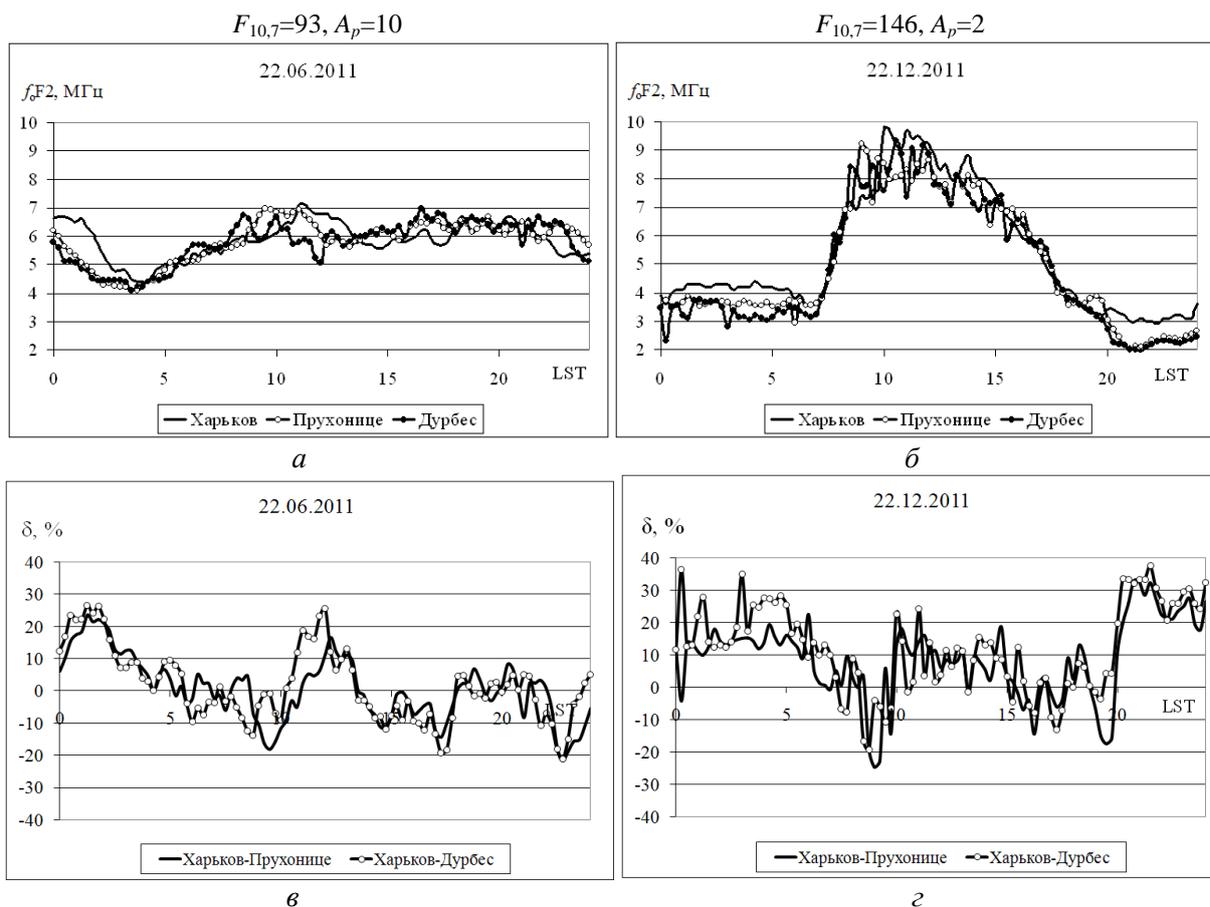


Рис. 5. Временные вариации критических частот в период летнего (а) и зимнего (б) солнцестояний в Харькове, Прухонице, Дурбесе и их относительных расхождений (в, г)

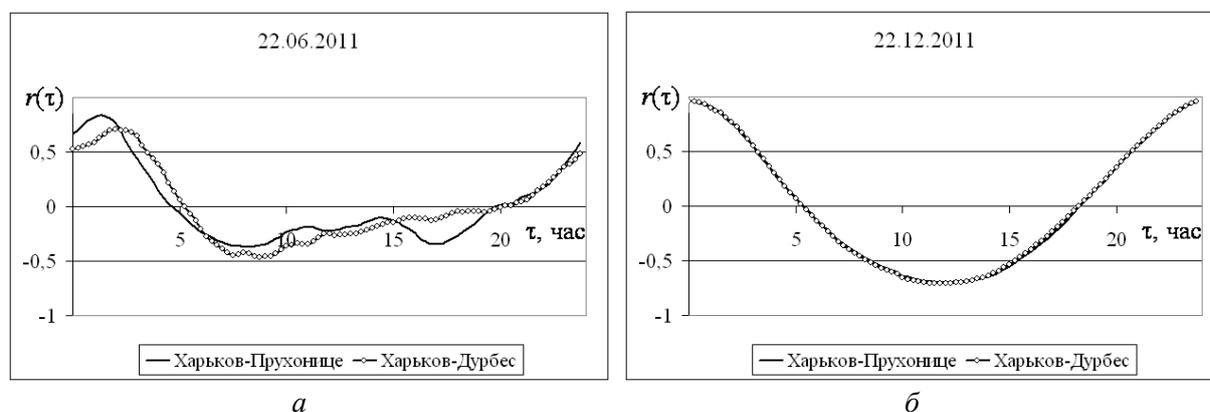


Рис. 6. Взаимные корреляционные функции критических частот  $f_0F_2$

Анализ взаимной корреляции критических частот  $f_0F_2$ , измеренных с помощью ионозондов в Харькове и Прухонице, а также в Харькове и Дурбесе, показал, что при отсутствии возмущений в ионосфере вид нормированных взаимных корреляционных функций  $f_0F_2$

близок к гармоническому с периодом 24 ч. Типичным примером являются результаты обработки, приведенные на рис. 6, б. При возникновении возмущений в ионосфере взаимная корреляционная функция критических частот, измеренных ионозондами в Харькове и Прухонице, заметно искажалась (см. рис. 6, а, где показаны результаты обработки за 22 июня 2011 г., когда были слабые ( $A_p=10$ ) геомагнитные возмущения). Подобные искажения имели место и для взаимной корреляционной функции критических частот, измеренных

ионозондами в Харькове и Дурбесе.

## 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 раза (днем) и 1,2 раза (ночью) 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 днем, 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. В условиях невозмущенной ионосферы суточные вариации частоты  $f_oF2$  в Харькове, Прухонице и Дурбесе находятся в хорошем согласии в утреннее и вечернее время. Днем и ночью отличия  $f_oF2$  составляют до 10 – 15 % (в отдельных случаях до 26 %), а зимой – до 30 % и выше (в отдельных случаях до 37 %), что соответствует существенному отличию вычисляемых значений концентрации электронов – до 70 %. Различия между данными  $f_oF2$  харьковской станции и станции Дурбесе больше, чем между аналогичными данными ионозондов Харькова и Прухонице, расстояние между которыми примерно в 1,5 раза меньше, что свидетельствует о долготных эффектах в ионосфере.

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

*Институт ионосферы  
НАН и МОН Украины*

*Поступила в редколлегию 12.03.2014*