

БЪЛГАРСКА АКАДЕМИЯ НА НАУКИТЕ
НАЦИОНАЛЕН ИНСТИТУТ ПО ГЕОФИЗИКА, ГЕОДЕЗИЯ И
ГЕОГРАФИЯ

Департамент Геофизика
Секция „Физика на йоносферата“

ЕМПИРИЧНО МОДЕЛИРАНЕ НА
ЙОНОСФЕРНИТЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ НАД
БЪЛГАРИЯ

РУМЯНА ЦВЕТАНОВА БОЖИЛОВА

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд

ЗА ПРИСЪЖДАНЕ НА НАУЧНАТА И ОБРАЗОВАТЕЛНА СТЕПЕН
“ДОКТОР” ПО ПРОФЕСИОНАЛНО НАПРАВЛЕНИЕ 4.4. НАУКИ ЗА
ЗЕМЯТА, СПЕЦИАЛНОСТ “ФИЗИКА НА ОКЕАНА, АТМОСФЕРАТА И
ОКОЛЗЕМНОТО ПРОСТРАНСТВО”

Научен консултант: доц. д-р Борислав Андонов

СОФИЯ

2021г.

Дисертацията е обсъдена и насочена за защита от разширен семинар на департамент „Геофизика“ на НИГГГ – БАН , проведен на 24. 02. 2021г.

Дисертационният труд се състои от увод, шест глави и заключение. Общият обем на дисертацията е от 116 страници, включвайки 65 фигури и 10 таблици. Списъкът на използваната литература съдържа 72 източника и е приложен след основните приноси на дисертационния труд.

Дисертантът е докторант на самостоятелна подготовка в Национален институт по геофизика, геодезия и география –БАН, департамент „Геофизика“, секция „Физика на йоносферата “, където е разработен дисертационният труд.

Публичната защита ще се проведе на 10.05.2021 г. от 14:00 ч. Материалите по защитата са публикувани на интернет страницата на НИГГГ – БАН и са на разположение на интересувашите се в администрацията на НИГГГ на адрес гр.София, ул. „Акад. Г. Бончев“, бл. 3.

СЪДЪРЖАНИЕ

Увод	3
Глава I Йоносфера	3
I.1 Йоносфера – история и структура	3
I.2 Практическо приложение на йоносферата	4
I.3 Метод A1 за сондиране на йоносферата	4
I.4 Исторически сведения за йоносферните изследвания в България	6
Глава II Основни процеси в йоносферата. Математически методи, използвани при анализа на данните	6
II.1 Основни процеси водещи до образуване на йоносферата	6
II.2 Математически методи, използвани при анализа на данните	7
Глава III Анализ на данните за България. Изследване на денонощните, сезонни, слънчеви и геомагнитни зависимости на основните йоносферни характеристики над България	8
III.1 Анализ на данните за България	8
III.2 Корелация на йоносферните параметри foF2 и MUF3000 със слънчевата и геомагнитна активност; закъснение на реакцията	9
III.3 Регресионен анализ между йоносферните характеристики foF2 и MUF3000 и слънчевата и геомагнитната активност	15
Глава IV Краткосрочно прогнозиране на йоносферните характеристики под въздействие на геомагнитни аномалии и късопериодичните вариации на слънчевата активност	19
IV.1 Синтез на модела	19
IV.2 Оценка на точността на модела	24
IV.3 Примери за прогнозиране на критичните честоти при конкретни геомагнитни бури и при спокойни условия	26
Глава V Определяне на основните йоносферни характеристики по данни на TEC	28
V.1 Функционална зависимост на критичните честоти и TEC	29
V.2 Определяне на регресионните коефициенти в зависимост от сезона и локалното време	31
V.3 Оценка на точността	33
Глава VI Изчисление на радиотрасета	35
Заклучение	38
Основни приноси на дисертационния труд	39
Литература	40

Благодарности

Авторът изказва благодарност за настоящия дисертационен труд на всички колеги от департамент Геофизика към НИГТГ и по-специално на научния си консултант доц. д-р Борислав Андонов за подкрепата и препоръките. Специални благодарности докторантът дължи на колегата Пламен Мукhtarов за отделеното време, приятелското отношение и многобройните дискусии по темата.

Авторът дължи признателност на организациите осигуряващи свободен достъп до данни, използвани за изготвянето на дисертационния труд:

Данни за TEC: Center for Orbit Determination of Europe (CODE): <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>

Данни за слънчевата активност (F10.7): NASA- <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>

Данни за геомагнитната активност (Kp): NOAA - <https://www.ngdc.noaa.gov>

УВОД

Състояние на проблема

Благодарение на намирането на достоверни връзки между критичните честоти на йоносферата и тоталната електронна концентрация се дава възможност да бъде създаден модел за прогнозиране на йоносферните величини. Основните характеристики на йоносферата, получени чрез разработения емпиричен модел са любезно предоставени на потребителите както и на заинтересованите органи.

Цел и задачи на настоящото изследване

Целта на настоящия дисертационен труд е създаването на осъвременен модел на йоносферата над България, както и представяне на методика за прогнозиране на йоносферните характеристики, представящи условията за разпространение на радиовълните над страната ни при отсъствие на работеща йоносферна станция. Усъвършенстването на подобен модел е актуална тема, изключително важна както за чисто научни цели, така и за ежедневните прогнози, използвани от Министерството на Отбраната.

Едно от основните изисквания при създаването на емпиричен едностанционен модел за прогноза на йоносферните характеристики е наличието на достатъчно дълъг времеви ред от измервания на съответните йоносферни величини над България. На базата на този времеви ред трябва да се извърши подробно изследване на поведението на йоносферните характеристики в зависимост от постоянно действащи фактори, водещи до изменения свързани с: (а) денонощен ход; (б) годишното време (сезонен и годишен ход); (в) влияние от Слънцето с различни времеви мащаби (слънчева активност), и (г) зависимост от геомагнитната активност. Информация за последните два, външни за йоносферата фактора, се предлага свободно от световните бази данни. Зависимостите, получени в резултат на това изследване се използват при синтеза на емпиричния модел. Определянето на конкретните функционални зависимости от различни параметри, които позволяват прогнозирането на основните йоносферни характеристики f_oF_2 (т.нар. критичната честота на слоя F_2) и MUF_{3000} (максималната приложима честота на разстояние 3000 км) при изпълнение на определени критерии за достоверност, се проверяват по методите на математическата статистика.

Представена е възможност за получаване на двете най-съществени йоносферни величини за територията на Република България в условия на неработеща йоносферна станция чрез данни за ТЕС (total electron content), притежаващи дълъг времеви ред и свободно предоставени от световните бази данни.

Глава I Йоносфера

I.1 Йоносфера – история и структура

За съществуването на проводящ слой във високата атмосфера на Земята се предполагало още през 1878 г., когато Стюард прави опит да даде обяснение за магнитните бури и полярните сияния. През 1924 г. Епелтон и Барнетон измерили ъгълът на падане върху приемната антена на радиовълни, излъчени от предавател отдалечен на десетки километри, и установили, че те падат върху антената от “небето”. Това означавало, че те се отразяват някъде от високата атмосфера. Изчисленията показали, че отразяващата област се намира на около 110 км височина. По-късно този слой, намиращ се на тази височина бил наречен “слой Е” – първата буква от името на откривателя Епелтон. През 1926 г. Брайт и Тю предложили метод, по който може да бъде изследван отразяващият радиовълните слой в атмосферата. Той се състоял в

следното: излъчват се радиоимпулси с определена честота и дължина вертикално нагоре. Те се пречупват от отразяващия слой в атмосферата и се връщат обратно на земята, попадайки в приемната антена. Чрез определяне на времето между излъчения и приетия сигнал се изчислява височината на слоя като се приема, че сигналът се движи със скоростта на светлината. Същата година на този принцип е построена и първата станция. Тя излъчва радиоимпулси с честота от 1 до 15 MHz с дължина около 100 микросекунди. Тогава за първи път се установява, че отразяващата област в атмосферата има слоист характер т.е. освен вече открития слой E на височина около 110 km над и под него има други слоеве. Слойт под слой E бил наречен D (според реда на буквите в латинската азбука), а този над него слой F. Уат и Уотсън предложили тази област от атмосферата, в която се намират слоевете D, E и F да бъде наречена “йоносфера”.

Приблизителните височинни диапазони на йоносферните слоеве са:

- D слой от около 50 до 90 km;
- Слой E от около 90 до 140 km;
- Слой F1 от около 140 до 210 km;
- F2 слоя се простира над около 210 km.

I.2 Практическо приложение на йоносферата

Йонизацията е процесът, при който неутралните атоми се разпадат на отрицателно заредени свободни електрони и положително заредени йони. Йоните са тези, които дават името си на йоносферата, но много по-леките и по-свободно движещи се електрони са важни по отношение на HF (високочестотното) радиоразпространение. Свободните електрони в йоносферата предизвикват пречупването на HF радиовълните и в крайна сметка се отразяват обратно към земната повърхност. Колкото по-голяма е плътността на електроните, толкова по-високи са честотите, които могат да бъдат отразени. През деня може да съществуват и четирите слоя - D, E, F1 и F2. В определени моменти по време на годината F1 слоя може да не се отличава от F2 слоя, като двата се сливат и образуват F областта. През нощта областите D, E и F1 имат силно намалено съдържание на свободни електрони, оставяйки само F2 областта достъпна за комуникация. Само областите E, F1 и F2 пречупват/отразяват високите радиочестотни (HF) вълни. D областта е много важна, защото, въпреки че не пречупва HF радиовълните, тя ги абсорбира или отслабва.

F2 областта е най-важният слой за разпространение на високочестотните (HF) радиовълни, защото:

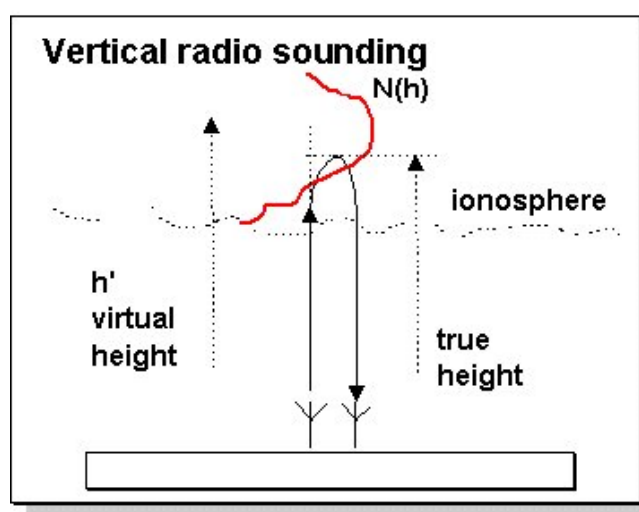
- съществува 24 часа в денонощието;
- голямата му надморска височина позволява най-дългите комуникационни трасета;
- отразява най-високите честоти в HF диапазона.

Животът на свободните електрони е най-голям в F2 областта, което е една от причините този слой да присъства и през нощта (Space Weather Prediction Center) .

I.3 Метод A1 за сондиране на йоносферата

Най-важната особеност на йоносферата по отношение на радиокомуникациите е способността ѝ да отразява радиовълните в определен честотен диапазон. За изследване на йоносферата са използвани различни методи, като най-широко разпространен е т. н. „сондиране“ чрез йоносонда. Йоносондата е високочестотен радар, който изпраща много къси импулси вертикално в йоносферата. Ако радиочестотата не е твърде висока, импулсите се отразяват обратно към земната повърхност и се регистрират. Йоносондата записва времето на закъснение между предаването и приемането на импулсите в диапазон от различни честоти. Отражения се появяват първо от най-ниската област и

впоследствие с по-голямо закъснение от областите F1 и F2. През нощта отражения се появяват само от F областта, тъй като E областта не присъства в нощни условия. Методът A1 е един от основните методи за изследване на движенията в йоносферата. Този метод в съчетание с метода A3 за измерване на амплитудно-времевия ход на абсорбцията на радиовълните, отразени от йоносферата, дава възможност за определяне параметрите на движението на нееднородностите в областта на отражението. Идеята на метода A1 се основава на това, че при разпространение в йонизирана среда радиовълните се отразяват от област с определена стойност на електронната концентрация, която стойност зависи от честотата на радиовълните. Използвайки радиовълни с различни честоти и измервайки времето, което е необходимо на радиосигналите да се върнат обратно се получава информация за височинното разпределение на електронната концентрация на йоносферата. На Фиг. I.3.1 е представен схематично методът на вертикално сондиране на йоносферна станция KOS89/2.



Фиг. I.3.1 Схема на вертикално сондиране на йоносферата по метода A1

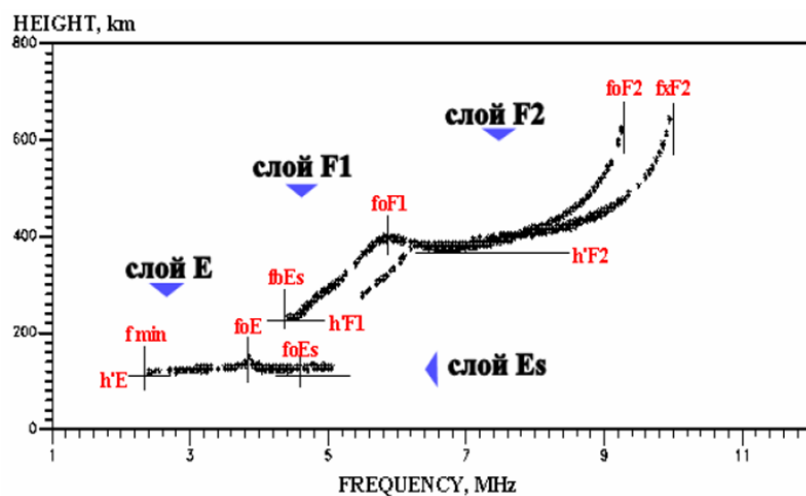
По традициите на йоносферните изследвания се работи не с времето на закъснение на отразения сигнал, а с височина на отражение, получена при предположение, че скоростта на радиовълните е равна на скоростта на светлината във вакуум. Но скоростта на радиовълните в йонизирана среда е по-малка от скоростта на светлината и зависи от електронната концентрация. По тази причина височината на отражение, получена чрез закъснението на отразения сигнал се означава като "виртуална" височина на отражение, h' [km]. Графиката $h'(f)$ е прието да се нарича йонограма. В йонограмата личи наличие на вторично отражение, с удвоени височини. Отраженият от йоносферата сигнал се отразява от земната повърхност и отново от йоносферата.

Йонограмите дават възможност да се определят пряко електронните концентрации на максимумите на отделните йоносферни области. В областта на максимумите скоростта на разпространение на радиовълните, която зависи от електронната концентрация и нейния височинен градиент клони към нула, което предизвиква в йонограмата наличие на асимптотичен ход на графиката. Тези честоти, при които се получава асимптотично поведение съответстват на максималните електронни концентрации, които могат да се определят по следната проста формула:

$$N_m [el/cm^3] = 1.24 \cdot 10^4 f_{cr}^2 [MHz] \quad (1.4.1)$$

Честотите, съответстващи на максималните електронни концентрации се означават като критични честоти. Чрез интерпретация на йонограмите могат да бъдат определени

както критичните честоти на йоносферните области, така и приблизителните височини на отделните слоеве. Пример за такава интерпретация е представен на Фиг. I.3.2.



Фиг. I.3.2 Йонограма, получена от йоносферна станция KOS 89/2

I.4 Исторически сведения за йоносферните изследвания в България

През 1959 г. Научно-изследователският институт по съобщенията под ръководството на акад. Кирил Серафимов закупува първата в България станция за вертикално сондиране на йоносферата - IRX 59. В двора на Полувисшия институт по съобщенията, в район Дианабад - София ($42^{\circ}41' \text{ N}$, $23^{\circ}21' \text{ E}$), се построява малка къщичка, в която се монтира новата йоносферна станция. Къщичката се строи по всички изисквания за сграда, в която ще работи апаратура, изследваща поглъщането в йоносферата, без никакъв железобетон, само с тухли и дърво. На метър от югозападния ѝ край се монтира централната мачта на антената висока 44 метра. Предавателната антена представлява двоен ромб. Голям ромб за честоти до 3 MHz и малък ромб за честотите до 20 MHz. Приемната антена е делта антена със същата височина. Голямата височина на антената позволява да се предават и приемат честоти около 1 MHz, което дава възможност да се изследва косвено и областта D.

От началото на 1961 г. йоносферната станция с целия ѝ персонал е прехвърлена към новооткрития Геофизичен институт към Българската академия на науките. През 1989 г. йоносферната станция е сменена с нова, полска цифрова станция "KOS 89/2". Същата йоносферна станция от 2006 г. работи в района на Плана планина ($42^{\circ}07' \text{ N}$, $23^{\circ}40' \text{ E}$) с геомагнитна ширина и дължина ($41^{\circ}00' \text{ N}$, $103^{\circ}9' \text{ E}$). Предавателната и приемната антена са от вида делта с височина 22 метра. Йоносферна станция «София» е типична средноширинна станция където влиянието както на йоносферните суббури така и на аномалиите в екваториалната токова струя са слаби.

Глава II Основни процеси в йоносферата. Математически методи, използвани при анализа на данните

II.1 Основни процеси водещи до образуване на йоносферата

Обикновено в теорията за образуване на йоносферата (Rishbeth and Garriott, 1969; Иванов-Холодный и Михайлов, 1980) се използва така нареченото уравнение на непрекъснатостта и баланса, което описва механизма на вариациите на йонизираните

компоненти при съвместното действие на трите основни процеса: образуването на йони и електрони, техния пренос и рекомбинация. При анализа на йоносферните данни над България трябва винаги да се има пред вид какви основни механизми формират изследваната йоносферна област и как се изменят те в зависимост не само от денонощието и сезона, но и от променящата се слънчева и геомагнитна активност.

II.2 Математически методи, използвани при анализ на данните

Основни дефиниции за случайни процеси

Времеви редове на йоносферните и слънчеви характеристики в някакъв интервал време могат да се тълкуват като реализации на случайни процеси на независимия аргумент време (Korn, G. and T. Korn, 1968). Стойностите на дадена физическа величина в определени моменти време се тълкуват като характеристики на физическата система (в конкретния случай системата Слънце- земна атмосфера) и притежават свойства на случайна величина, притежаваща вероятностни характеристики:

1. Математическо очакване

$$Mx(t) = \bar{x} \quad (\text{II.2.1})$$

2. Среден квадрат

$$M(x^2(t)) \quad (\text{II.2.2})$$

3. Дисперсия- среден квадрат на центрирания процес

$$\sigma^2 = M(x(t) - \bar{x})^2 \quad (\text{II.2.3})$$

4. Стандартно отклонение- σ

5. Корелационна функция

$$R_{xy}(\tau) = M[x(t)y(t+\tau)] = R_{yx}(-\tau) \quad (\text{II.2.4})$$

6. Автокорелационна функция

$$R_{xx}(\tau) = M[x(t)x(t+\tau)] = R_{xx}(-\tau) \quad (\text{II.2.5})$$

7. Нормирана корелационна функция (корелационен коефициент).

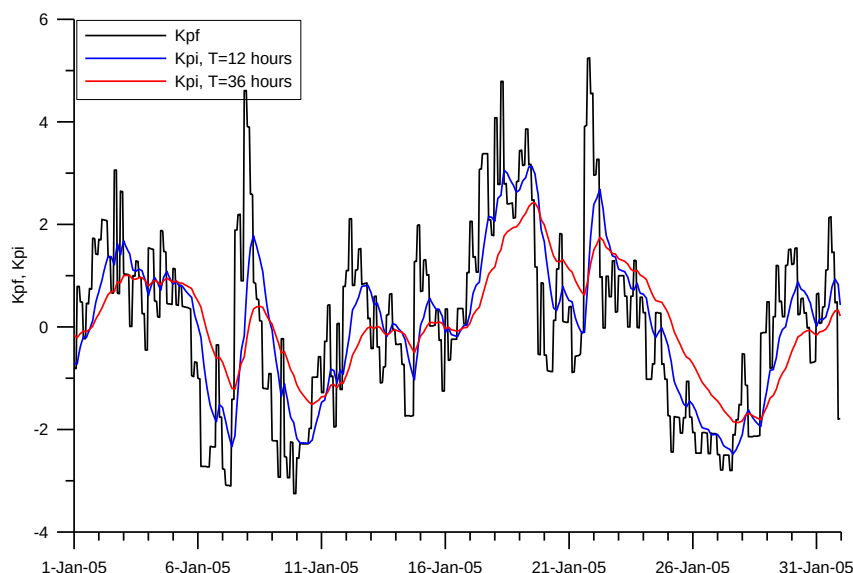
Корелационният анализ цели изследване на подобие на различни случайни и неслучайни физически процеси, от което се правят заключения за причинно-следствените връзки между тях. За тези цели се изчислява и анализира корелационната функция съгласно горните дефиниции.

При прилагане на корелационния анализ винаги трябва да се отчита възможността двата разглеждани процеса да представляват две следствия от трети процес, т.е. между тях да няма причинно-следствена връзка независимо от стойностите на корелационната функция между тях.

Представляват интерес корелационните зависимости в случая, когато връзката между причината и следствието е по-сложна, например ако се описва от линейно диференциално уравнение. Важен частен случай е когато уравнението е от първи ред с постоянни коефициенти. Това уравнение описва много физически процеси, свързани с натрупване на енергия, например топлинна. Голяма част от процесите на реакция на йоносферата са свързани със загряването на неутралния газ в полярния овал от изсипващите се там частици на слънчевия вятър, което дава основание да се предположи, че реакцията на йоносферата ще има инертен характер с някаква времеконстанта (Kutiev and Muhtarov, 2001). Представените съображения за инертния характер на реакцията на йоносферата при геомагнитни смущения прави целесъобразно преобразуването на филтрирания индекс на геомагнитна активност K_{pf} чрез симулиране на преминаването му през инертна система, описвана от диференциално уравнение от първи ред със зададена времеконстанта. Стойностите на индекса K_{pf} са

зададени като дискретни стойности със стъпка 1 час. Представяйки K_{pf} като стъпалообразна функция, дефинирана за моменти време 0, 1,... t_k ,... t_n , модифицираният индекс K_{pi} се получава по формулата (Kutiev and Muhtarov, 2001):

$$K_{pi}(t_n) = \left(\exp\left(\frac{1}{T}\right) - 1 \right) \sum_{k=0}^{n-1} K_{pf}(t_k) \exp\left(-\frac{t_n - t_k}{T}\right) \quad (\text{II.2.21})$$



Фиг. II.2.1 Поведение на филтрирания K_{pf} (черен цвят) и модифицирани стойности при различни времекопстанти, съответно 12 часа (син цвят) и 36 часа (червен цвят) за януари 2005г.

На Фиг. II.2.1 е показан ходът на филтрирания индекс K_{pf} и модифицираните стойности, получени при времекопстанти съответно 12 и 36 часа за м. януари 2005 г.

Глава III Анализ на данните за България. Изследване на денонощните, сезонни, слънчеви и геомагнитни зависимости на основните йоносферни характеристики над България

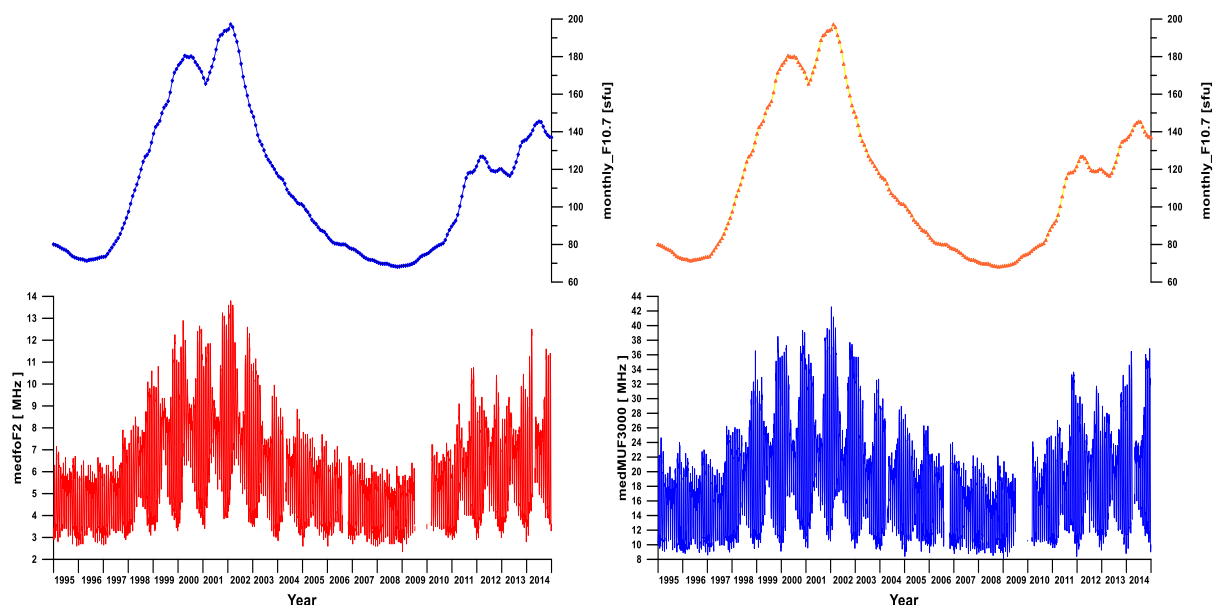
III.1 Анализ на данните за България

В тази глава е обяснена обработката и анализа на данните за йоносферата над България. Представен е подробен анализ на вариациите на йоносферните характеристики за нашата страна за периода 1995-2014г. на базата на данни от йоносферната станция KOS89/2. Изследван е ходът на най-важните компоненти.

В настоящата дисертация са използвани данните от Йоносферна станция- София за периода 1995- 2014. Причината да не се използват данните от предшестващия период е, че само за този период от йонограмите са отчитани стойностите на параметъра $M3000$ ($M3000=MUF3000/foF2$), което стана възможно след въвеждането на полуавтоматична система за интерпретация на йонограмите и тяхното архивиране.

Този ред $foF2$ данни (около 20 години) съдържа почти два цикъла на слънчевата активност. По традиция в йоносферните изследвания денонощният и сезонен ход на йоносферните характеристики и неговата зависимост от дългопериодичните изменения на слънчевата активност се дава от месечните медиани на часовите стойности. Преимуществовата на медианите пред средните стойности се дължат на отстраняване

влиянието на стойностите по време на геомагнитни смущения (Pancheva and Mukhtarov, 1996). По тази причина медианите се използват като характеристика на спокойните в геомагнитен смисъл условия на йоносферата в даден календарен месец. Като характеристика на слънчевата активност по традиция се използват изгладените стойности на потока радиоизлъчване на Слънцето с дължина на вълната 10.7 cm - F10.7.



Фиг. III.1.1 Обобщен ход на часовите месечни медиани на foF2 (долен ляв панел) и MUF3000 (долен десен панел) съпоставени със стойностите на изгладената слънчева активност (горен ляв и десен панел), дефинирани от F10.7 за периода 1995-2014г.

Показаният на Фиг. III.1.1 общ ход на часовите месечни медиани на foF2 и MUF3000 показват характерните особености на денонощния и сезонен ход и тяхната зависимост от нивото на слънчевата активност. При висока слънчева активност се увеличават стойностите на двете величини. Дневните стойности нарастват най-много, особено в зимния сезон.

От подробния представен по-горе анализ се вижда съществено влияние на слънчевата активност върху йоносферата, което е основна предпоставка за отчитането на тази величина при създаване по-късно на модел за прогноза на йоносферата над България.

III.2 Корелация на йоносферните параметри foF2 и MUF3000 със слънчевата и геомагнитна активност; закъснение на реакцията

Изследването на краткoperиодичните зависимости на йоносферните характеристики от геомагнитната активност и вариациите на слънчевата йонизираща радиация в рамките на ротационния цикъл на Слънцето (например 27-дневните колебания) е удобно да се извършва не с конкретните стойности на величините (които имат силно изразен денонощен и сезонен ход) а с релативните отклонения от пълзящи медиани. Въвеждането на релативните отклонения е обосновано в Andonov et al., (2011). Релативните отклонения на величините се получават по формулите:

$$r_{foF2}(t) = \frac{foF2(t) - foF2_{med}(UT)}{foF2_{med}(UT)};$$

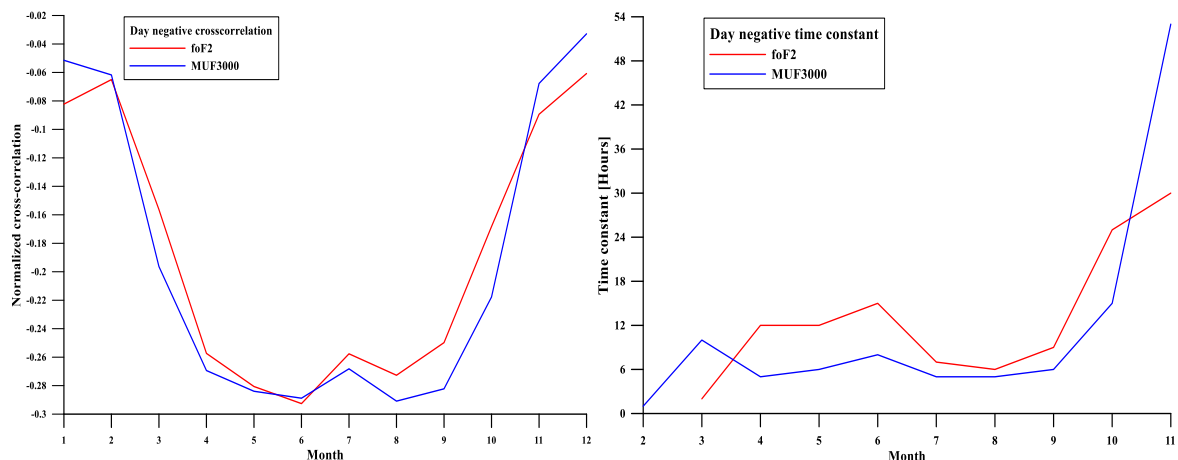
$$r_{MUF3000}(t) = \frac{MUF3000(t) - MUF3000_{med}(UT)}{MUF3000_{med}(UT)};$$

(III.2.1 и III.2.2)

От стойността, измерена в някакъв момент t се изважда медианата на стойностите, измерени в същото универсално време за интервал от 15 дни центриран спрямо текущия ден и разликата се дели на същата медианна стойност.

Добре известно е, че освен от слънчевата активност йоносферата зависи и от геомагнитната активност. Ето защо в следващите няколко страници е представено изследване, което се базира на предложения в Kutiev and Muhtarov (2001) и Mukhtarov et al. (2013) инертен модел на реакцията на релативното отклонение на йоносферните величини при геомагнитни смущения, описван от линейно диференциално уравнение от първи ред с дадена времеконстанта. Данните за слънчевата и геомагнитна активност са получени от световните бази данни на NASA- <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/> и NOAA- <https://www.ngdc.noaa.gov>. За целта е извършено интегриране на индекса K_p с различни времеконстанти от 1 до 72 часа. За всяка времеконстанта е изчислена кроскорелационната функция между интегрирания K_p и релативното отклонение на $foF2$ и $MUF3000$, като се избира тази времеконстанта, при която се получава най-висока корелация (положителна или отрицателна). Приема се, че тази времеконстанта характеризира реалната инертност на йоносферата.

За да се получи информация за сезонните различия са изчислени кроскорелациите за всеки календарен месец, като е представено разделянето на дневни и нощни стойности.

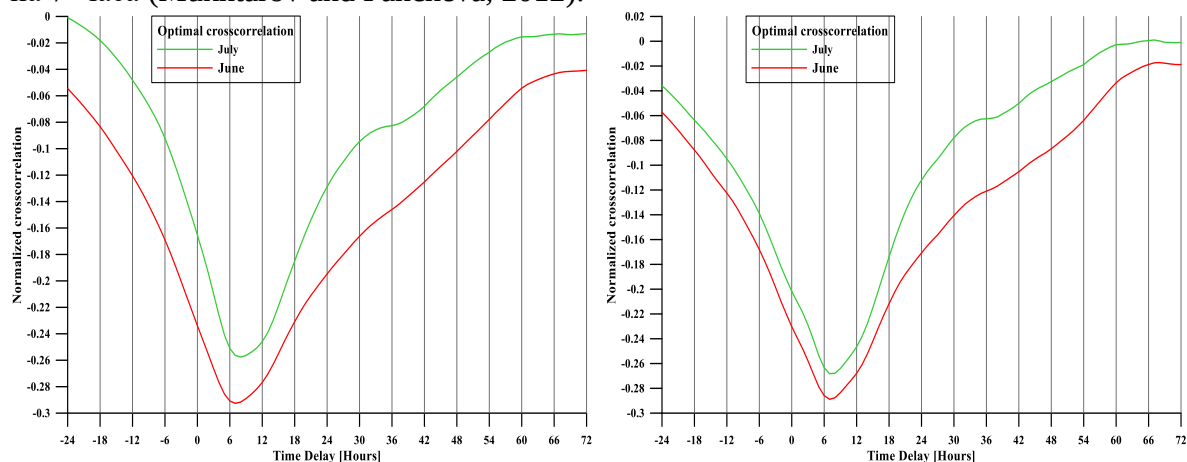


Фиг. III.2.1 Дневни условия, негативна кроскорелация (ляв панел); времеконстанта (десен панел)

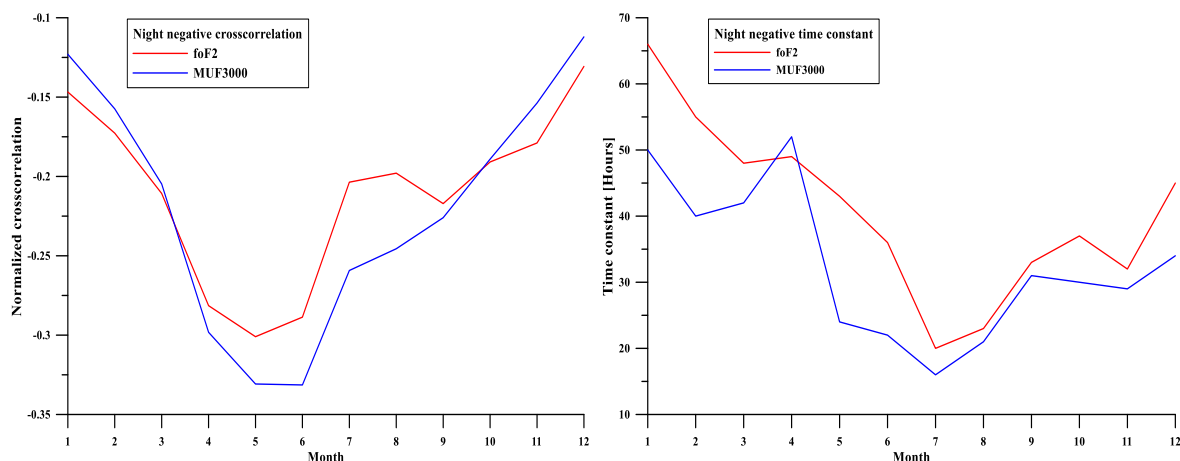
На Фиг. III.2.1 е показан сезонният ход на отрицателната корелация при показания сезонен ход на оптималните времеконстанти в дневни условия. От Фиг. III.2.1 ляв панел се вижда, че значителна отрицателна корелация се получава в летните и равноденствени месеци (за двете величини $foF2$ and $MUF3000$) за разлика от зимните месеци където корелацията е значително по-малка (от порядъка на 3-8%). Десен панел на Фиг. III.2.1 илюстрира поведението на времеконстантата за $MUF3000$ и $foF2$, което показва малки времеконстанти от порядъка на 2- 15 часа за месеците от февруари до септември.

Фиг. III.2.2 показва кроскорелационната функция за два типично летни месеца юни и юли, за разглежданите параметри $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) в дневни

условия. Графиката илюстрира добрата негативна кроскорелация по време на тези месеци и за двете величини, достигаща и надхвърляща в някои случаи 30%. Закъснението, съответстващо на максималната отрицателна кроскорелация за дневни условия в разглежданите месеците юни и юли, представено на Фиг. III.2.2 е от порядъка на 7 часа (Mukhtarov and Pancheva, 2012).



Фиг. III.2.2 Дневни условия, оптимална негативна кроскорелация за месеците юни и юли за $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел)

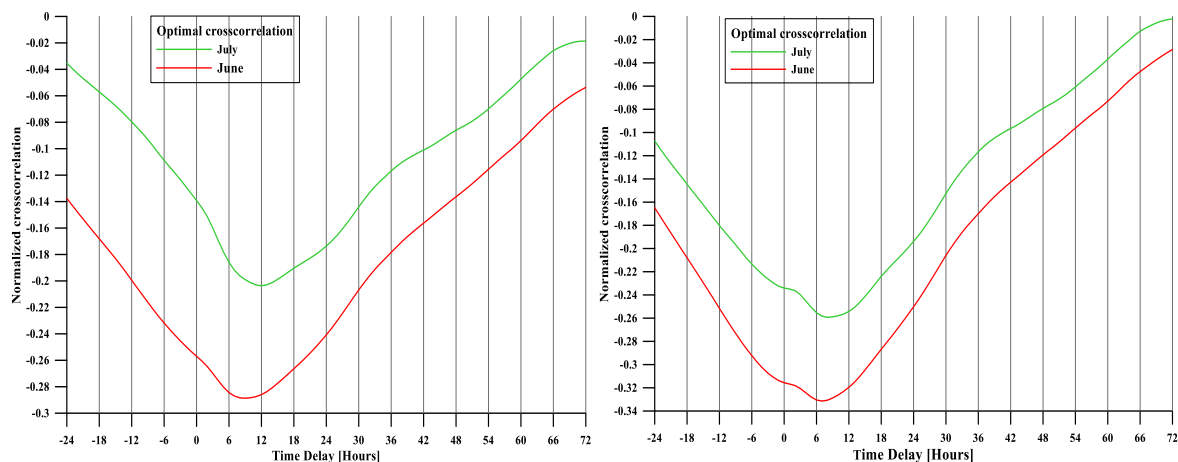


Фиг. III.2.3 Нощни условия, негативна кроскорелация (ляв панел); времеконстанта (десен панел)

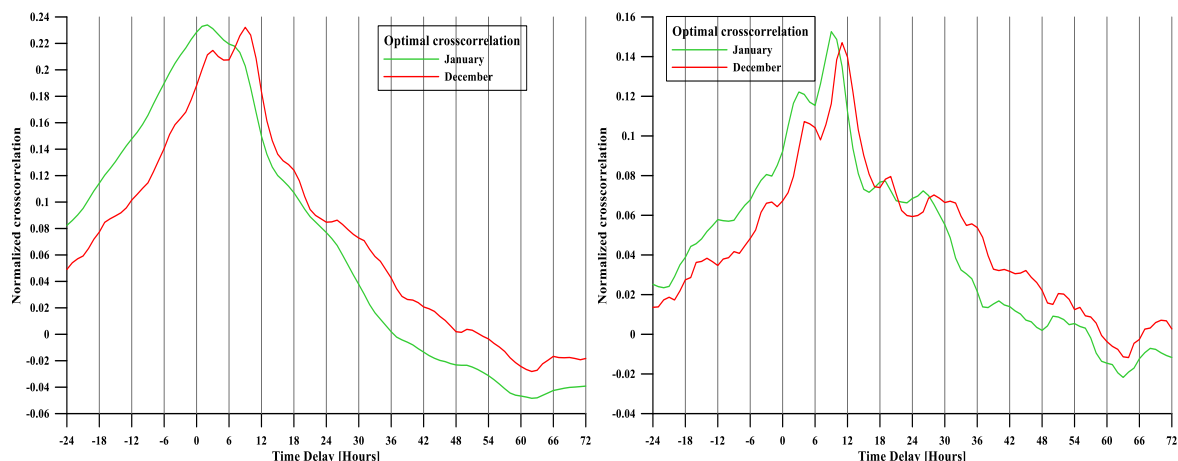
Фиг. III.2.3 е аналогична на Фиг. III.2.1 като илюстрира същите зависимости, но за нощни условия. Отново се вижда добре изразената отрицателна кроскорелация на двете величини $-foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) през летните месеци, достигаща до около 30% за $MUF3000$ и надвишаваща тези проценти за $foF2$. Зимните месеци отново се характеризират с по- слаба кроскорелация. Времеконстантата, показана на десен панел на Фиг. III.2.3 показва най- малки стойности (около 15 часа) отново в летните месеци. В зимните месеци времеконстантата започва да нараства и достига до около 66 часа.

Фиг. III.2.4 е сходна с Фиг. III.2.2 и представя кроскорелационните функции за два типично летни месеца – юни и юли за двете разглеждани величини $foF2$ - ляв панел и $MUF3000$ - десен панел, но този път в нощни условия. На фигурата се вижда добрата отрицателна кроскорелация през разглежданите месеци и за двете величини, достигаща

до почти 30% за foF2 (ляв панел) и надхвърляща 32% за другата величина – MUF3000 (десен панел). Закъснението, съответстващо на максималната отрицателна кроскорелация за нощни условия в месеците юни и юли, представено на III.2.4 (ляв и десен панел) е от порядъка на 6-8 часа.



Фиг. III.2.4 Нощни условия, оптимална негативна кроскорелация за месеците юни и юли за foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел)



Фиг. III.2.5 Оптимална позитивна кроскорелация в дневни условия за зимните месеци декември и януари за foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел)

На Фиг. III.2.5 са показани кроскорелационните функции при дневни условия в типично зимните месеци декември и януари за двете величини foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел). Представянето на тези месеци на отделна фигура е направено заради получената положителна кроскорелация при практически нулева стойност на времеконстантата. Максималната положителна кроскорелация за величината foF2 (ляв панел) през разгледаните два зимни месеца е около 24%, докато тази на MUF3000 е приблизително 15% (десен панел). Закъснението, съответстващо на максималната положителна кроскорелация в дневни условия в месеците декември и януари за foF2, представено на Фиг. III.2.5 (ляв панел) е от порядъка на 3 и 9 часа. Същото времезакъснение, отговарящо на максималната положителна кроскорелация за MUF3000, показано на Фиг. III.2.5 (десен панел) е около 10-11 часа, което е значително повече в сравнение с летните месеци представени на фигури III.2.3 и III.2.5.

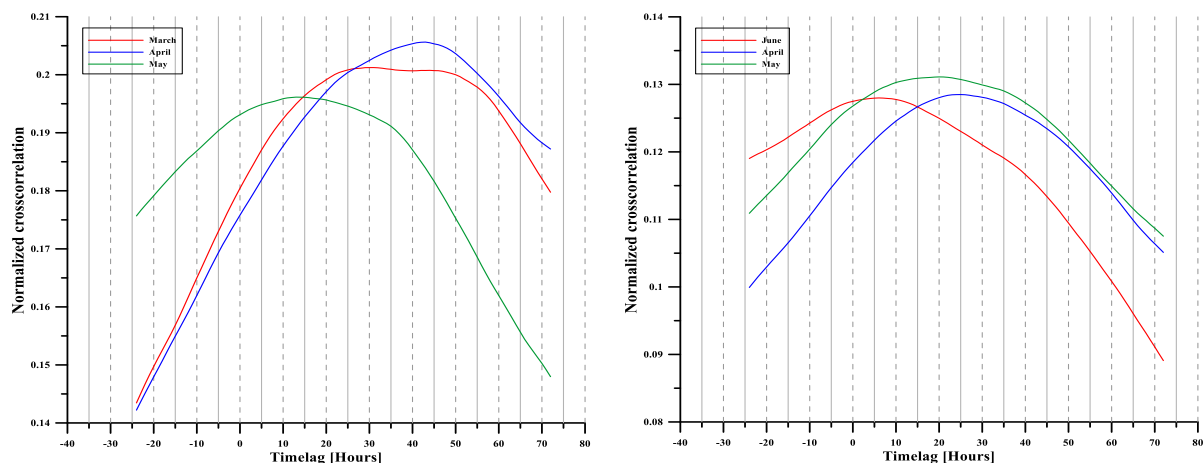
Стойностите на кроскорелационната функция до голяма степен определят коефициента на линейна регресия между изследваните величини. Негативните стойности определят обратна пропорционалност, позитивните – правата такава. Самите стойности показват интензивността на реакцията на йоносферата на геомагнитни смущения (Pancheva and Mukhtarov, 1998). От направените анализи следва, че негативната реакция на йоносферните параметри от геомагнитната активност е силна през летните и равноденствени месеци и отслабва през зимните (Penov et al., 2015; Pancheva et al., 2016), което се дължи на смяната на посоката на преноса на загрегия в полярния овал неутрален въздух под въздействието на изсипващите се там частици на слънчевия вятър (от полюса към екватора през лятото). Увеличението на времеконстантите, т.е. на забавянето на реакцията през зимния сезон потвърждава този извод. Негативната реакция в нощни условия се оказва по-значима отколкото в дневни условия. Положителна реакция практически без закъснение се наблюдава само през зимните месеци в дневни условия (Mendillo, 2006, Rishbeth, 1991).

Аналогично изследване е направено и за зависимостта на йоносферните параметри foF2 и MUF3000 от късопериодичните вариации на слънчевата активност (представена чрез индекса F10.7). Стойностите на потока радиоизлъчване на Слънцето с дължина на вълната 10.7 cm характеризират както общото ниво на слънчевата йонизираща радиация в рамките на 11-годишния цикъл, така и късопериодичните ѝ вариации, свързани с ротационния период на Слънцето. Използване на необработените данни за индекса F10.7, получени от NASA- <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/>, е неправилно когато се използват релативните стойности на йоносферните характеристики, при които ходът на 11-годишния цикъл е отфилтриран. По тази причина се налага да се работи с релативните стойности на F10.7 (Mukhtarov and Vojilova, 2017) получени по формулата:

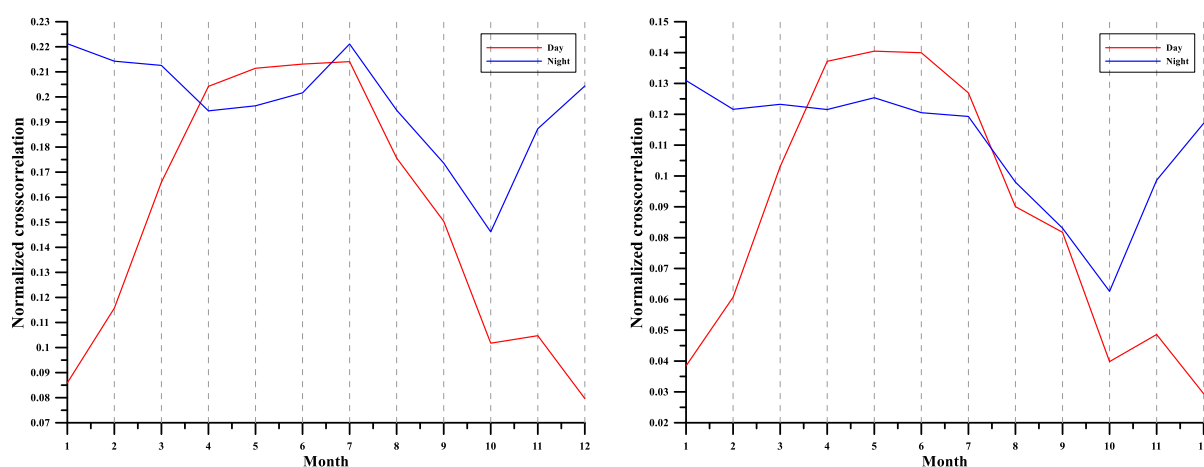
$$rF10.7(t) = \frac{F10.7(t) - F10.7_m}{F10.7_m}, \quad (\text{III.2.3})$$

където $F10.7_m$ е средната стойност на пълзящ сегмент, центриран в текущия момент t аналогично на релативните характеристики на йоносферните величини, но без да се прилага разделяне по часове. Така получените релативни стойности съдържат вариациите, свързани с ротационния период на Слънцето (с период около 27 денонощия и неговите хармоници), но не и вариациите, дължащи се на 11-годишния цикъл на слънчевата активност.

На Фиг. III.2.6 са показани кроскорелационни функции за двата йоносферни параметъра – foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел) за някои избрани месеци. Както се вижда от фигурата кроскорелационните функции и за двете йоносферни величини имат симетричен характер, което ги отличава от съответните им кроскорелационни функции с геомагнитната активност. По тази причина в настоящото изследване няма да се прилага хипотезата за инертен характер на въздействието на слънчевата активност. Наблюдава се, обаче забележимо закъснение на йоносферната реакция, отговарящо на оптимална кроскорелация, което за foF2 през месец май е около 15 часа; през месец април нараства и е от порядъка на 42 часа, а за март е средно около 40 часа. Закъснението на другата величина MUF3000 (десен панел) при максимална кроскорелация за март месец е около 5 часа; за месец април е 25 часа, а през май е приблизително 20 часа. Възможна причина за значително по-малко закъснение на MUF3000 може да се дължи на това, че критичната честота при дистанция 3000 km зависи не само от критичната честота на областта F, но и от цялостната форма на електронния профил под максимума, включително и от височината на максимума.



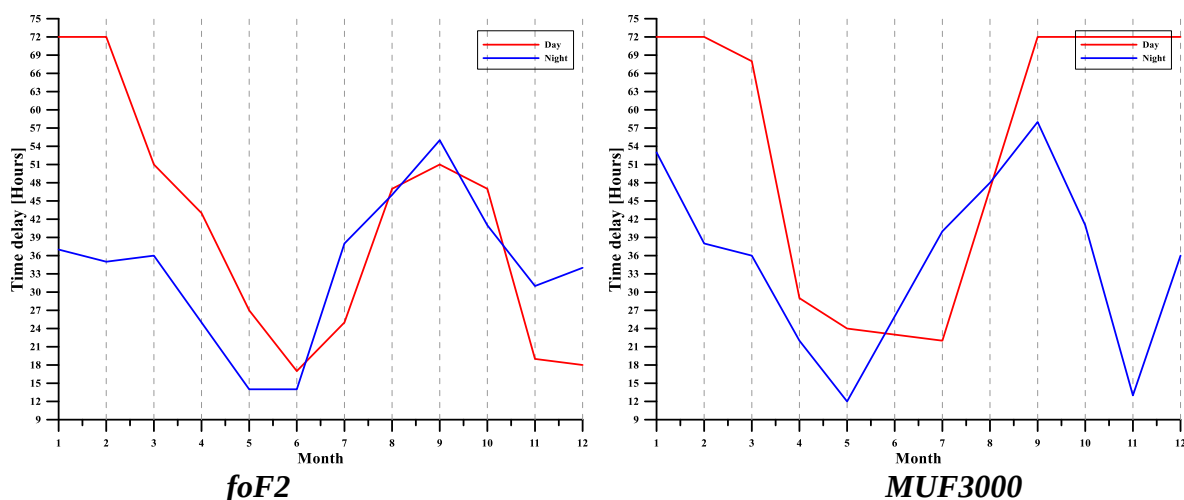
Фиг. III.2.6 Кроскорелационни функции на $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) за месеците март, април и май



Фиг. III.2.7 Максимална кроскорелация между релативните стойности на $F10.7$ и двете йоносферни характеристики $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) в зависимост от календарния месец, разделена на дневни и нощни стойности

На Фиг. III.2.7 е показана максималната корелация между релативните стойности на $F10.7$ и двете йоносферни характеристики $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) в зависимост от календарния месец, разделена на дневни и нощни стойности. От фигурата се вижда, че в дневни условия корелацията е по-силна в летните месеци, което означава, че през лятото йоносферата реагира по-силно на вариациите в слънчевата активност. Максимални стойности на кроскорелацията от фигурата по-горе се вижда, че има през месеците април, май, юни и юли, съответно средно около 21% за $foF2$ (ляв панел) и приблизително 14% за $MUF3000$ (десен панел). Това е обяснимо, като се имат предвид вариациите на зенитния ъгъл на Слънцето в зависимост от сезона, а зенитният ъгъл на Слънцето е важна характеристика на йонообразуването. От графиката става ясно, че през зимните месеци (от октомври до февруари) и при дете йоносферни величини имаме минимални стойности на кроскорелацията средно около 10% за $foF2$ (ляв панел) и 5% за $MUF3000$ (десен панел). В нощни условия, когато няма директна йонизация, сезонният ход на кроскорелацията няма същата добре изразена зависимост както през деня. Представените на Фиг. III.2.7 положителни стойности на кроскорелацията в нощни условия са от същия порядък, както и в дневни условия. Вероятно причината за това е, че електронното съдържание в $F2$ областта през нощта е

резултат от йонизацията, настъпила през същия ден, като количеството електрони в нощни условия постепенно намалява под действия на рекомбинационните процеси, следователно е подложено на вариациите на слънчевата активност.



Фиг. III.2.8 Закъснение на реакцията на йоносферната от вариациите на слънчевата активност.

На Фиг. III.2.8 е илюстрирана сезонната зависимост на закъснението на реакцията на йоносферните характеристики от вариациите на слънчевата активност. Съответните закъснения през нощта на foF2 (ляв панел) варират от малко повече от половин денонощие (през месеците май и юни) до над два дни за месец септември. Дневните стойности на закъснението в реакцията на този йоносферен параметър в зимните месеци януари и февруари са от порядъка на три дни, докато през лятото са средно в рамките на 1.5-2 дни. Закъсненията в дневни условия на другата йоносферна величина MUF3000 (десен панел) са максимални – 72 часа през месеците януари, февруари, септември, октомври, ноември, декември. Минимално закъснение през деня имаме в летните месеци май, юни и юли около едно денонощие. Нощните стойности на закъсненията на MUF3000 (десен панел) са най-големи през месец септември – над два дни и най-малки през май месец когато закъснението е около половин денонощие. Както се вижда от графиката по-горе сезонният ход на разглежданите йоносферни характеристики има отчетлива полугодишна зависимост с изключение на дневния MUF3000, който има годишна осцилация. Дневните и нощни закъснения имат сходен сезонен ход. Полугодишната зависимост вероятно е свързана със сезонния ход на рекомбинационните процеси в йоносферата.

Резултатите от кроскорелационния анализ, представени в този раздел, обосновават необходимостта от въвеждане в представения емпиричния модел на реакцията на йоносферните характеристики от вариациите в слънчевата и геомагнитна активност зависимости, разделени по календарни месеци и отделно за дневни и нощни условия.

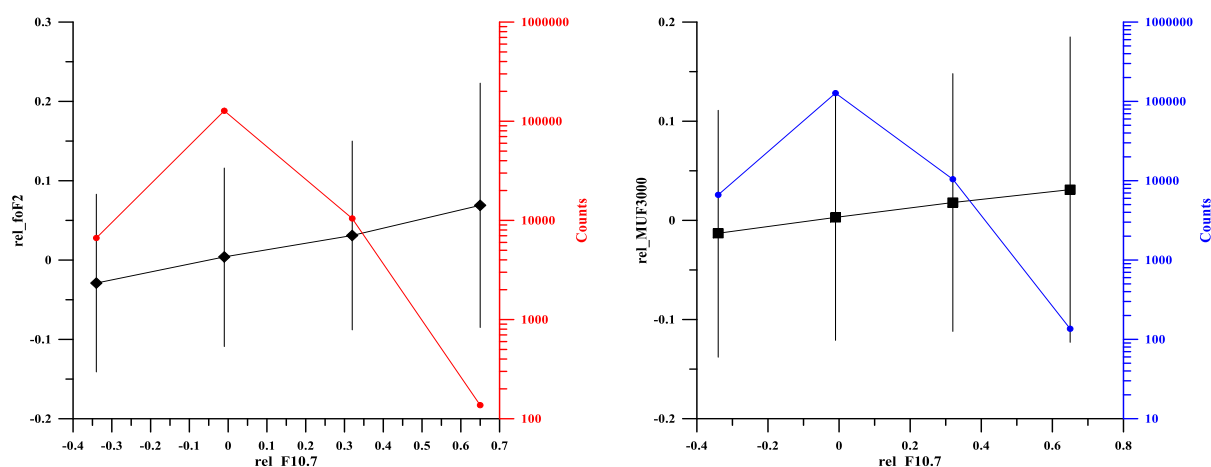
III.3 Регресионен анализ между йоносферните характеристики foF2 и MUF3000 и слънчевата и геомагнитната активност

Представеният в предходната точка кроскорелационен анализ изследва зависимостите между йоносферните характеристики със слънчевата и геомагнитна активност на ниво линейна зависимост, което е заложено в математическите дефиниции на корелационните функции. За целите на емпиричното моделиране представлява интерес да се установи доколко зависимостите могат да се сведат до линейни и ако това не е

достатъчно, да се определи вида на оптималните функционални зависимости. За целта в настоящия раздел са представени резултатите от т.нар. груповая регресия между релативните стойности на йоносферните характеристики и модифицираните слънчеви и геомагнитни индекси. При груповата регресия диапазонът на изменение на величината „причина“ се разделя на интервали и за всеки такъв интервал се определят средните стойности на величината „причина“ и съответните ѝ по време стойности на величината „следствие“. Регресията, пресметната по метода на най-малките квадрати се изчислява на базата на тези групови средни стойности. Преимуществото на този подход в конкретния случай се основава на факта, че слънчевите и геомагнитни индекси имат много стойности при условия, близки до спокойните (модифицираните индекси при спокойни условия имат стойности близки до нула) и твърде малко стойности при смутени условия. Ако регресиите се изчисляват на базата не на груповите, а на изходните стойности, зависимостите придобиват характера на зависимостите при условия, близки до спокойните и някои особености при смутени условия могат и да не бъдат отчетени и да се загубят.

В следващите примери ще бъдат подробно илюстрирани и обяснени резултатите от регресионния анализ на йоносферните характеристики foF2 и MUF3000 поотделно със слънчевата и геомагнитната активност.

Фиг. III.3.1 представя груповата регресия между foF2 (ляв панел), MUF3000 (десен панел) и слънчевата активност, дефинирана чрез rel_F10.7. Грешката при определяне на средната стойност на rel_foF2 и rel_MUF3000 за дадено rel_F10.7 е представена чрез стандартното отклонение. III.3.1 представя още и броят стойности в даден интервал на rel_F10.7, показани с червен цвят за foF2 и син цвят за MUF3000. Тези две графики ясно показват преобладаването на случаите със спокойното състояние в слънчевата активност. Броят на случаите с екстремално повишение са на два и повече порядъка по-малко, което обстоятелство потвърждава правомерността на използването на груповая регресия. От графиката се вижда, че оптималната функция, описваща получените резултати е близка до линейна. Важно е да се отбележи, че в този случай часовете, при които стойността на Kp е над 5 (магнитна буря) са игнорирани. По този начин се намалява противоречието между вариациите в слънчевата активност, които предизвикват положителна реакция в йоносферата и геомагнитните смущения, които предизвикват най-често отрицателна реакция.



Фиг. III.3.1 Груповая регресия между relF10.7 и двете йоносферни характеристики foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел) представена в черен цвят, както и броят попадения при съответната регресия показан в червен цвят за foF2 и син цвят за MUF3000.

Следващите примери илюстрират сравнение на груповите регресии на релативните стойности на критичните честоти и филтрирания индекс Кр разделени по календарни месеци, с регресиите на същите в дневни и нощни условия.

Филтрираният Кр се получава като от всяка стойност във времевия ред се извади средната стойност, получена за сегмент време с дължина 27 денонощия и центриран спрямо текущия момент време. Това преобразуване осигурява отстраняването на вариации в Кр със времеви мащаб по-голям от 27 денонощия. Това е полезно, защото резултатът (именно релативните стойности на йоносферните характеристики) не съдържат вариации с времеви мащаб по-голям от 27 денонощия.

Критерий, който се използва за определяне дали даден час е през деня или през нощта е косинусът на зенитния ъгъл на Слънцето в съответния час, отрицателните стойности означават нощни условия. Стойностите на косинуса на зенитния ъгъл χ се определят по опростената астрономическа формула:

$$\cos \chi = \sin \varphi \sin \varphi_0 + \cos \varphi \cos \varphi_0 \cos \left(\frac{\pi}{180} (15(UT - 12) - \theta) \right)$$

$$\varphi_0 = \frac{\pi}{180} 23.45 \sin \left(\frac{360}{365} (DOY - 21) \right)$$
(III.3.1)

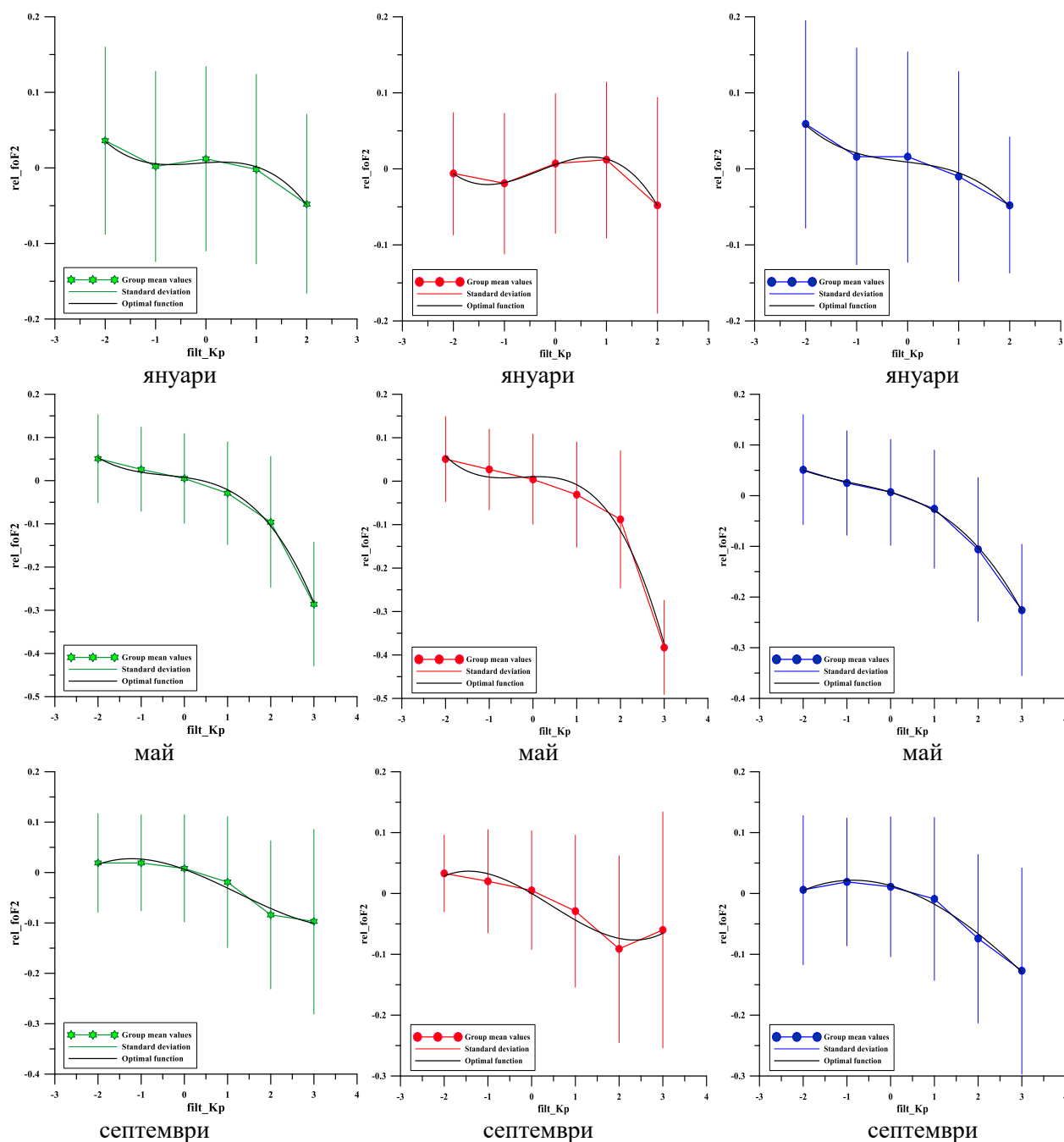
Във формулата фигурира географските ширина и дължина на станцията φ , θ , универсалното време и поредният номер на деня от годината броен от 1 януари - DOY.

Представените на Фигури III.3.2 и III.3.3 регресионни зависимости потвърждават получените чрез корелационния анализ сезонни зависимости на реакцията на критичните честоти на геомагнитната активност: през зимните месеци реакцията е по-слаба от реакцията в летните и равноденствени месеци. Зависимостите се оказват съществено нелинейни, като изискват апроксимация с полином от трета степен. Забелязва се, че диапазонът на изменение на геомагнитната активност е различен през различните месеци, което не позволява в някои случаи (месеците януари и февруари) да се получат достоверни стойности на средната реакция при силни геомагнитни смущения. Това се дължи на все пак недостатъчния статистически материал, с който се разполага.

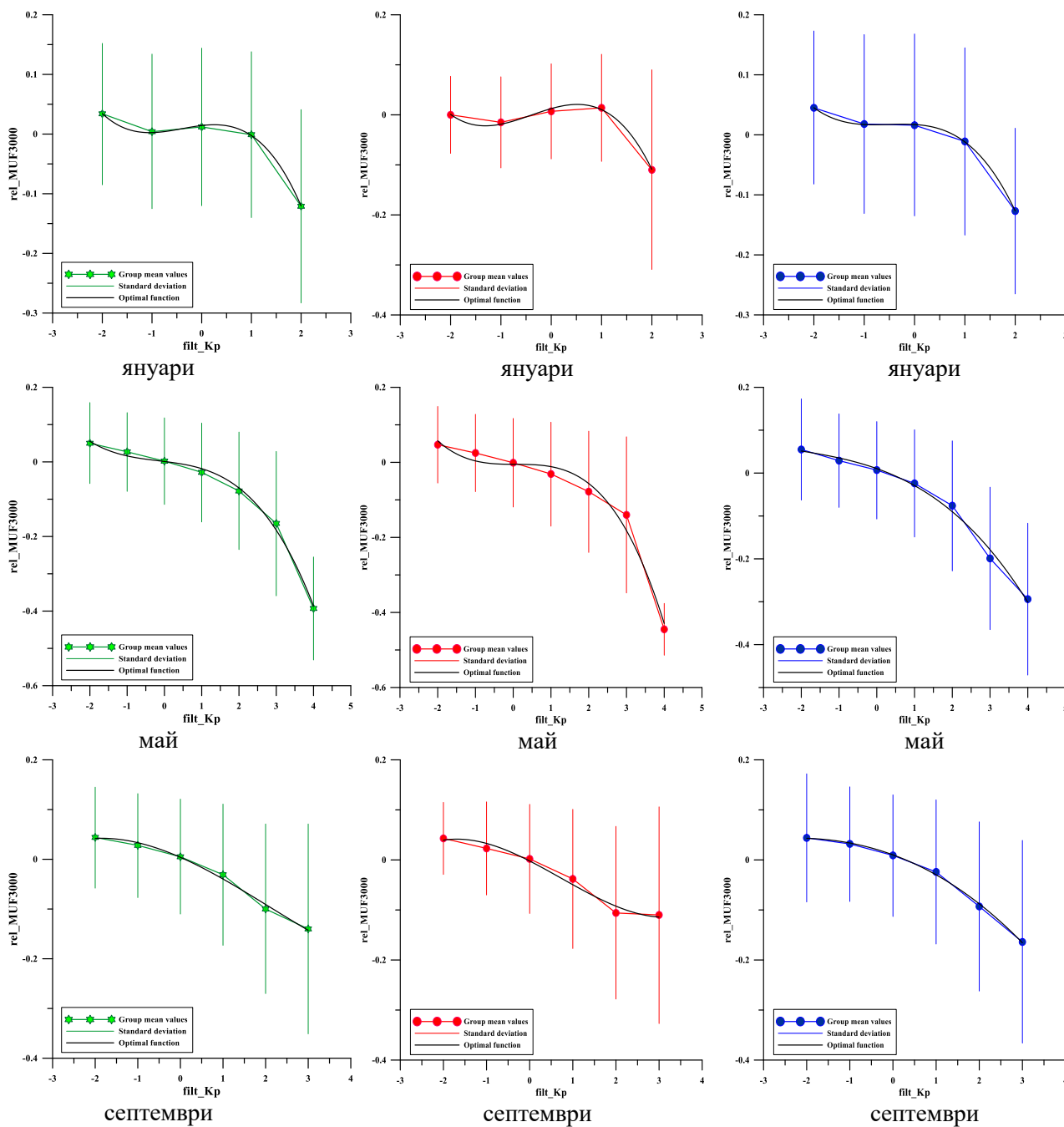
Характерна особеност на аномалиите от геомагнитен произход е засилването на отклоненията при по-големи стойности на въздействието в отрицателна посока, т.е. при силни магнитни бури нелинейността на реакцията се засилва, особено през летните месеци. Сравнението на формата на регресиите отделно при дневни и нощни условия показва значителни разлики особено през зимните месеци. Например през януари и декември зависимостта в дневни условия показва положителен (нарастващ) ход при средни стойности на геомагнитната активност, докато при нощни условия нарастваща зависимост се наблюдава напротив, при високи стойности на геомагнитния индекс. Това може да се обясни с наблюдаваното при конкретни бури (Bojilova and Mukhtarov, 2019b) преобладаване на положителна реакция в дневни условия. Трябва да се има предвид, че представеният регресионен анализ не е в състояние да отчете нееднозначния характер на реакцията на йоносферата в зимни условия, който подробно е изследван в цитираните по-горе статии.

В летните и равноденствени месеци не се забелязва никаква съществена разлика между дневните и нощни регресии, които имат определено негативен ход, което отразява известният факт, че в тези месеци геомагнитните бури предизвикват преимуществено негативни реакции в критичните честоти. По резултатите от корелационния анализ в летни условия се наблюдава само негативна корелация, докато през зимните условия се получава позитивна корелация с малка времева константа на закъснение и негативна с

голяма времекопстанта. Този резултат се потвърждава и от регресионния анализ. Получените при корелационния и регресионния анализ различия между реакцията на критичните честоти в дневни и нощни условия обосновава целесъобразността емпиричният модел да се синтезира отделно за деня и нощта, което е едно от съществените нововъведения в предлагания емпиричен модел. Потвърждава се и целесъобразността на въвеждане на зависимост на релативното отклонение на критичните честоти от геомагнитната активност като полином от трета степен, получено и при изследване на аналогичните зависимости на ТЕС както и разделянето на реакцията на позитивна и негативна (Andonov et al., 2011).



Фиг. III.3.2 Сравнение на груповите регресии по месеци между филтрираните стойности на геомагнитната активност K_p и релативните стойности на $foF2$ за цялото денонощие (ляв панел) с регресиите разделени на ден (среден панел) и нощ (десен панел), както и техните оптимални апроксимации



Фиг. III.3.3 Сравнение на груповите регресии по месеци между филтрираните стойности на геомагнитната активност K_p и релативните стойности на MUF3000 за цялото денонощие (ляв панел) с регресиите разделени на ден (среден панел) и нощ (десен панел), както и техните оптимални апроксимации

Глава IV Краткосрочно прогнозиране на йоносферните характеристики под въздействие на геомагнитни аномалии и късо-периодичните вариации на слънчевата активност

IV.1 Синтез на модела

Разработеният в настоящата дисертация емпиричен модел за прогнозиране на йоносферните характеристики - критичните честоти f_oF_2 и MUF3000 е предназначен за работа в реални условия и реално време при наличие на данни от измервания за тези

йоносферни характеристики в някакъв период, предшестващ момента на прогнозиране, както и на данни за слънчевата и геомагнитна активност. Предполага се, че или има работеща йоносферна станция или данните за критичните честоти се получават по индиректен начин от данни за ТЕС. Такъв метод ще бъде описан по-нататък. В настояще време NOAA предлага в реално време и със свободен достъп по Интернет стойности на индекса K_p и прогнози такива за предстоящите три дни, както и стойности на индекса $F_{10.7}$ и прогнози такива за следващите 27 денонощия. Разработеният модел разделя задачата за определяне на стойностите на критичните честоти в даден момент, за който няма измерени стойности, на две подзадачи. Едната е определяне на стойности, отговарящи на стационарното (спокойно) състояние на йоносферата, включващо стационарния денонощен ход зависещ от сезона и общата слънчева активност. Втората е определянето на смущенията, предизвикани от късопериодичните вариации на слънчевата активност и аномалиите от геомагнитен произход. Решаването на тези две отделни задачи се свежда до прогнозиране на медианите на часовите стойности и релативното отклонение на критичните честоти. Двете величини позволяват определянето на самите критични честоти.

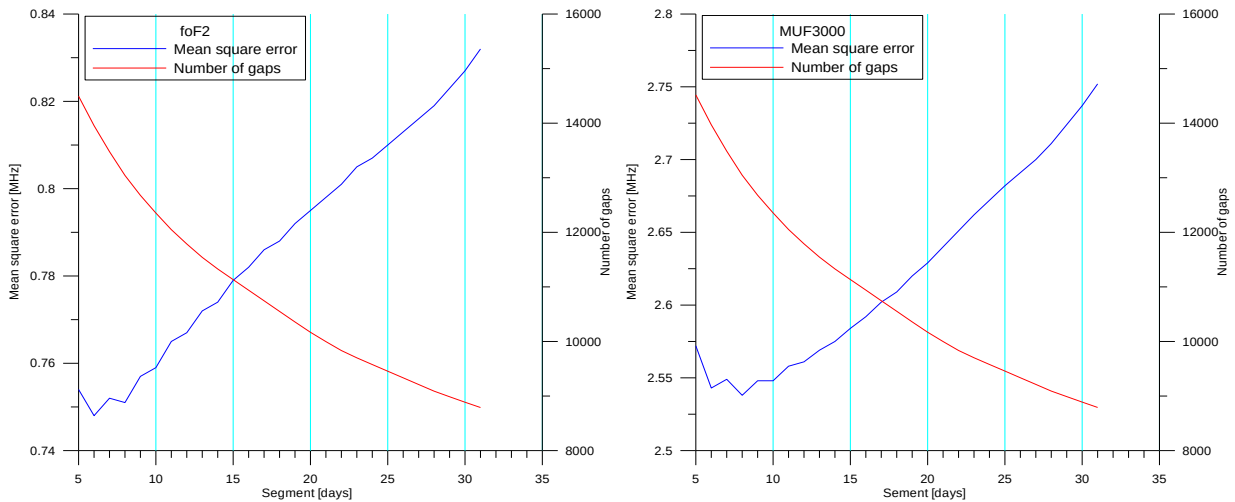
От дефиницията на релативното отклонение следва:

$$\begin{aligned} foF2(t) &= foF2_{med}(UT)(1 + foF2_{rel}(t)); \\ MUF3000(t) &= MUF3000_{med}(UT)(1 + MUF3000_{rel}(t)) \end{aligned} \quad (IV.1.1)$$

При анализа на зависимостите на релативното отклонение пълзящите медиани бяха определяни на базата на сегмент време, центриран спрямо текущия момент. При прогнозиране, обаче, това не е приложимо, защото не е възможно да се използват бъдещи стойности. Налага се да се работи с несиметричен пълзящ сегмент, който да използва данни преди момента на прогнозиране. От тези измерените стойности не е трудно да се определят часовите медиани, които характеризират спокойното състояние на йоносферата. За решаване на първата част от задачата за прогнозиране е целесъобразно да се определи каква е оптималната дължина на пълзящия сегмент при прогнозирането.

За целта са изчислени пълзящите медиани за всеки час от разполагаемия ред данни при различна дължина на несиметричния пълзящ сегмент и е определено средноквадратичното отклонение на пълзящите медиани, изчислени от стойностите на предходните денонощия от измерените стойности в дадения час. Фиг. IV.1.1 представя зависимостта на средното квадратично отклонение от дължината на несиметричния пълзящ сегмент, както и броят пропуски, който се получава при различна дължина на сегмента (т.е. броят часове, за който не е възможно да се изчисли пълзяща медиана поради липса на достатъчно измерени стойности в предходните денонощия).

Показаните на Фиг. IV.1.1 зависимости означават, че при намаление на дължината на пълзящия сегмент за определяне на медианите точността на прогнозата се увеличава сравнително малко, но нарастването на пропуските е значително. В настоящия модел е приета стойност на сегмента 15 денонощия, която е компромисна.



Фиг. IV.1.1 Зависимост на средно-квадратичното отклонение (синя линия) и на броя пропуски (червена линия) от дължината на пълзящия несиметричен сегмент за $foF2$ (ляв панел) и за $MUF3000$ (десен панел).

Прогнозирането на стационарното (спокойно) състояние на йоносферните характеристики се допълва от прогнозирането на аномалиите предизвикани от вариациите на слънчевата и геомагнитна активност. В предходния раздел са изследвани основните зависимости на вариациите на релативните отклонения на критичните честоти от модифицираните индекси на слънчевата и геомагнитна активност. Установено е, че късопериодичните вариации на слънчевата активност, свързани с ротационния цикъл на Слънцето корелират положително с релативните критични честоти, като се наблюдава известно закъснение от порядъка на 1-2 денонощия, което варира в зависимост от сезона. Реакцията на критичните честоти на геомагнитните смущения е по-сложна. Наблюдава се положителна реакция (през зимните месеци) с малка времеконстанта на инертност и негативна реакция с по-голяма времеконстанта. Времеконстантите, определени чрез корелационния анализ имат отчетлив сезонен ход както и коефициентите на корелация. Разлики има и в реакциите през дневни и нощни условия. Това даде основание да се раздели моделът на дневен и нощен и за дневните и нощни условия да се търсят самостоятелни моделни функции. Също така за всеки календарен месец се търсят самостоятелни моделни функции. По този начин се решава проблемът за влиянието на зависещото от сезона състояние на земната атмосфера и разликите в процесите за образуване и рекомбинация на електронното съдържание при наличие и отсъствие на йонизираща слънчева радиация.

В най-общ вид търсената зависимост на релативните отклонения на критичните честоти в даден календарен месец и отделно за дневни и нощни условия представлява функция на модифицираните слънчеви и геомагнитни индекси и денонощното време:

$$\begin{aligned} foF2_{rel}(t) &= \Phi_{foF2}(UT, K_{piT1f}(t-t_{gf1}), K_{piT2f}(t-t_{gf2}), F10.7_{rel}(t-t_{sf})) \\ MUF3000_{rel}(t) &= \Phi_{MUF3000}(UT, K_{piT1m}(t-t_{gm1}), K_{piT2m}(t-t_{gm2}), F10.7_{rel}(t-t_{sm})) \end{aligned} \quad (IV.1.2)$$

Освен закъснението от инертен характер, представено от времеконстантите на интегриране на Kp $T1$ и $T2$, е предвидено допълнително закъснение по време на геомагнитната реакция означено с t_g . Основание за въвеждане на допълнително закъснение е предположението, че за преместване на неутралния въздух с променена температура от полярния овал до средни ширини е необходимо допълнително време, зависещо от общата атмосферна циркулация. На този етап не е извършвана оптимизация на допълнителното закъснение, свързано с времеконстантата $T1$ (t_{gf1}/t_{gm1}),

което е фиксирано като нулево поради недостиг на машинно време. Предвижда се в това да бъде направено в окончателния вариант на дисертацията.

Закъснението на реакцията от вариациите на слънчевата активност е означено с t_{sf}/t_{sm} . Фигуриращите във формулата две различни стойности на интегрирания индекс K_p (с времекопстанти T_1 и T_2) са предназначени да моделират положителната и отрицателна реакция спрямо геомагнитните аномалии.

Въведените допълнителни индекси f (за foF_2) и m (за $MUF3000$) означават, че времекопстантите и закъсненията за двете критични честоти в общия случай са различни и подлежат на отделно определяне.

Предлаганият в настоящата дисертация емпиричен модел на реакцията на критичните честоти е значително по-сложен от разработените до сега модели за прогнозиране на ТЕС. Въведено е отделно моделиране на дневните и нощни условия, въведени са времезакъснения на геомагнитните и слънчеви аномалии.

Въведените в общ вид функционални зависимости се уточняват по известния метод на разделяне на променливите.

$$\Phi = \Phi_{UT}(UT)\Phi_{sol}(F10.7_{rel})\Phi_g(K_{pi}) \quad (IV.1.3)$$

От своя страна трите функции, моделиращи влиянието на денонощното време, слънчевата и геомагнитна активност могат да се представят чрез своето разложение в редове. Функцията, моделираща влиянието на денонощното време е периодична функция с период 24 часа и е естествено да се представи с разложението си в ред на Фурие. Другите две функции могат да се представят със своите разложения в ред на Тейлор. Изследването на функционалната зависимост на релативните отклонения от геомагнитната активност показаха, че е целесъобразно да се използва полином от трета степен, което означава, че частичната сума на реда на Тейлор може да се ограничи до третата степен. Зависимостта от слънчевата активност се оказва близка до линейната, но ще се приеме полином от втора степен. Методът на най-малките квадрати, който се използва за определяне на константите на модела има свойството да анулира тези степени, които се оказват излишни. Разложението на денонощната зависимост в ред на Фурие се ограничава до втория хармоник (период 12 часа). Опитите показаха, а и това е достатъчно очевидно, че когато се работи отделно за деня и нощта въвеждането на по-високи хармоници е безсмислено.

При тези допускания трите функции придобиват следния вид:

$$\Phi_{UT} a_0 + a_1 \cos\left(\frac{2\pi}{24} UT\right) + a_2 \sin\left(\frac{2\pi}{24} UT\right) + a_3 \cos\left(\frac{2\pi}{12} UT\right) + a_4 \sin\left(\frac{2\pi}{12} UT\right) + a_5 \cos\left(\frac{2\pi}{8} UT\right) + a_6 \sin\left(\frac{2\pi}{8} UT\right) + a_7 \cos\left(\frac{2\pi}{6} UT\right) + a_8 \sin\left(\frac{2\pi}{6} UT\right) \quad (IV.2.4)$$

$$\Phi_s = b_0 + b_1 F10.7_{rel}(t - t_s) + b_2 F10.7_{rel}^2(t - t_s) \quad (IV.1.5)$$

$$\Phi_g = c_0 + c_1 K_{piT1}(t - t_{g1}) + c_2 K_{piT1}^2(t - t_{g1}) + c_3 K_{piT1}^3(t - t_{g1}) + c_4 K_{piT2}(t - t_{g2}) + c_5 K_{piT2}^2(t - t_{g2}) + c_6 K_{piT2}^3(t - t_{g2}) \quad (IV.1.6)$$

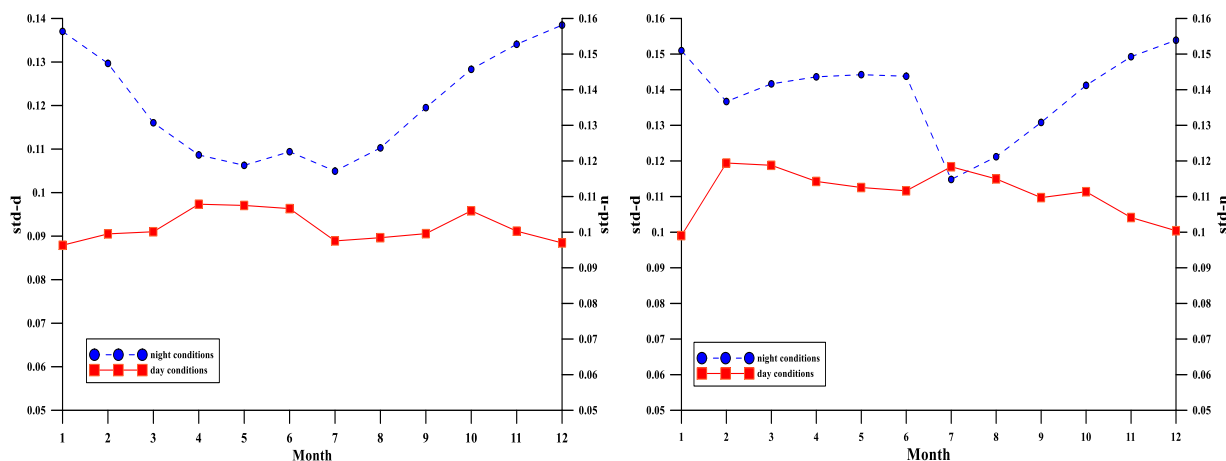
Закъснението t_{g1} на настоящия етап е фиксирано с нулева стойност. След умножението на изразите от горните формули (разкриване на скобите) моделът придобива вид на мултилинейна регресия от функции, които се оказват произведения на степените на слънчевите и геомагнитни индекси и синусоидалните компоненти на денонощния ход, което дава възможност да се приложи методът на най-малките квадрати за определяне на константите, всъщност на произведенията от означените константи. Както ще се

покаже по-нататък, разкриването на скобите е целесъобразно да се извърши от изчислителния софтуер.

Неизвестните времеконстанти на инертност и времезакъсненията участват нелинейно във формулите и не могат да се определят пряко по метода на най-малките квадрати. Налага се да се приложи методът на "сляпото търсене" (Kutiev et al., 2009), при който стойностите им се варират в някакви граници и за всяка комбинация от тях останалите константи се определят по метода на най-малките квадрати. Избира се тази комбинация, при която грешката от апроксимацията е минимална.

Процедурата за определяне на константите на модела по критерия за най-добро приближение (в смисъл на минимизиране на сумата от квадратите на разликите) може да се разкрие чрез фрагменти от специално разработения за целта софтуер. В него, освен стандартните функции на езика C са използвани специализираните процедури, разработени в департамента и предназначени за работа по метода на най-малките квадрати.

На Фиг. IV.1.2 е показан сезонният ход на стандартните отклонения на моделните релативни foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел) представени отделно за дневни (червена линия с квадратчета) и нощни (синя линия с точки) условия. От левия панел на фигурата се вижда, че при нощни условия се наблюдава намаление на грешката през лятото спрямо зимата, което отговаря на получената по-ниска корелационна зависимост на foF2 от геомагнитната активност. Представения на графиката сезонен ход на грешката при дневни условия е незначителен. Грешките при дневни условия се оказват, като цяло, по-ниски от тези в нощни условия. Това е така защото дневната йоносфера е силно контролирана от слънчевата активност, която е отчетена в модела докато нощната йоносфера, специално през зимата, зависи и от процеси в ниската и средната атмосфера, които не са включени в този модел.



Фиг. IV.1.2 Сезонен ход на стандартните отклонения на моделните релативни foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел), представени отделно за дневни (червена линия с квадратчета) и нощни (синя пунктирна линия с точки) условия.

Десния панел на Фиг. IV.1.2 показва сезонния ход на стандартните отклонения за MUF3000, който се оказва сходен количествено и качествено с аналогичните резултати получени за foF2 (ляв панел на Фиг. IV.1.2). Сезонният ход на грешките в нощни условия, обаче, не е толкова добре очертан както при foF2. От графиката се вижда, че при дневни условия има слабо изразена тенденция за намаление на грешките в зимни условия в сравнение с летните, но разликите са твърде незначителни за да бъдат тълкувани от физическа гледна точка. Аналогично на foF2 грешките в дневни условия, като цяло, са по-малки от тези при нощни условия. Но трябва да се има предвид, че

използваната при синтеза на модела мултирегресионна зависимост (едновременно със слънчевата и геомагнитна активност) е по-достоверна отколкото корелационните и регресионни зависимости от двата форсиращи фактора поотделно.

IV. 2 Оценки за точността на модела

За оценка на достоверността на предлагания модел е извършена симулация на прогнозирането за целия интервал време, за който се разполага с данни от йоносферната станция София. Симулацията е извършена по начин, който е максимално близък до прогнозирането в реално време- не се използват никакви бъдещи стойности при определяне на стойностите на критичните честоти в даден момент, а само стойности, получени в изминали моменти време. Симулацията включва изчисление на пълзящите медиани за период 15 денонощия назад от текущото денонощие, стойностите на модифицирания индекс K_{p1} чрез интегриране на стойностите в минало време при получените моделни времеконстанти в зависимост от календарния месец и денонощно време както и стойността на релативния индекс на слънчева активност. След намиране на релативните отклонения на критичните честоти и чрез получените вече пълзящи медиани се изчисляват прогнозните стойности на критичните честоти, както и разликите между тях и измерените стойности. На базата на тези разлики са изчислени средните и средноквадратични отклонения за целия ред данни, за всеки календарен месец от всички години и за всеки конкретен календарен месец.

Систематичната грешка (средната стойност на разликите- ME):

$$ME = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{cr \text{ mod}} - f_{cros}) \quad (IV.2.1)$$

се оказва близка до нула. Този резултат е една изключително важна характеристика на предложения модел, която показва, че той няма склонност нито да повишава, нито да намалява прогнозираните стойности.

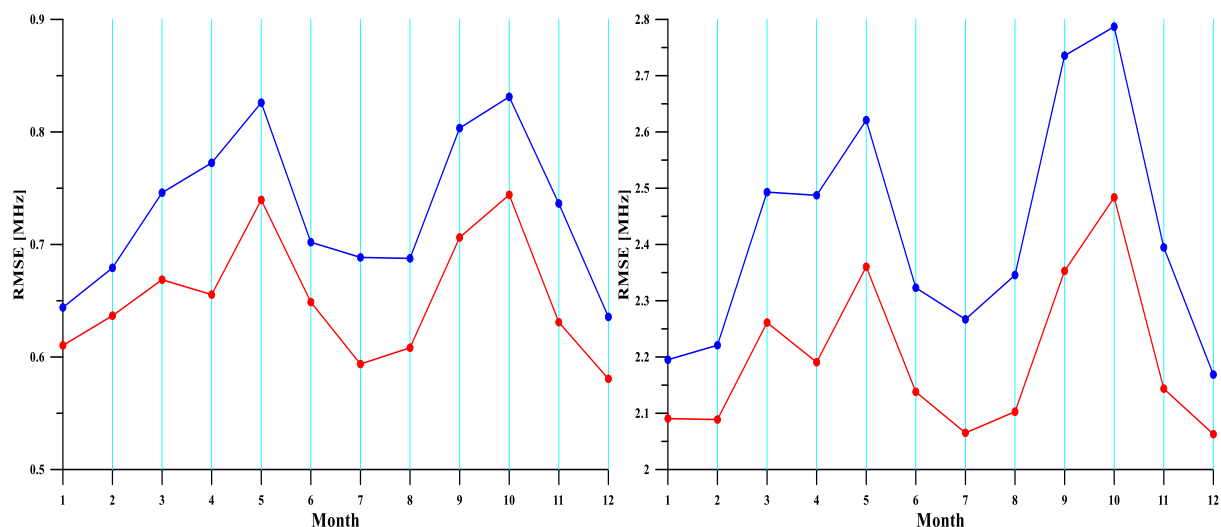
Критерий за качеството на приближение на модела към данните е средноквадратичната грешка (RMSE).

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (f_{cr \text{ mod}} - f_{cros})^2} \quad (IV.2.2)$$

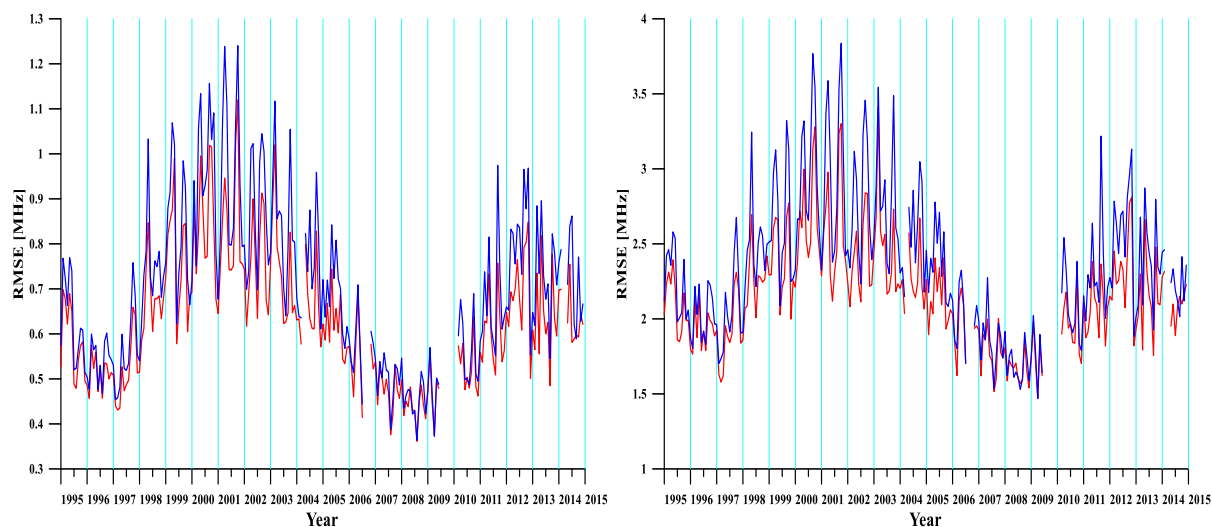
Изчислени са и отклоненията и техните статистики при прогнозиране само на базата на пълзящите медиани, т.е. прогнозиране само на стационарното състояние. Сравнението на тези статистики дава информация за това с колко се подобрява прогнозата на foF2/MUF3000 когато се отчете прогнозирането на аномалиите от слънчев и геомагнитен произход.

На Фиг. IV.2.1 са показани средноквадратичните грешки на модела по календарни месеци за foF2 (ляв панел) и MUF3000 (десен панел) респективно, изчислени на базата на всички години от реда данни на йоносферната станция. За foF2 подобрението на точността на прогноза на пълния модел спрямо медианната прогноза възлиза на 0.05-0.5 MHz, докато за MUF3000 подобрението е 0.1- 0.3 MHz. Най-малко подобрене има през зимните месеци, което отговаря на получената при анализа на данните слаба зависимост на йоносферното отклонение от геомагнитната активност през този сезон. Сезонният ход на грешката има отчетлив двувълнов характер, като максимумите се наблюдават през равноденствените месеци. Причината за това е, че през

равноденствените месеци сезонното изменение на критичните честоти е по-силно отколкото в зимните и летни месеци, което се отразява негативно на точността на прогнозата. Съществува метод за автокорелационно подобряване на тази прогноза, описан в Mukhtarov et al., (2014).



Фиг. IV.2.1 Средноквадратична грешка на прогнозата на $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) -медианите (син цвят) и пълния модел (червен) по месеци за всички години 1995-2014.

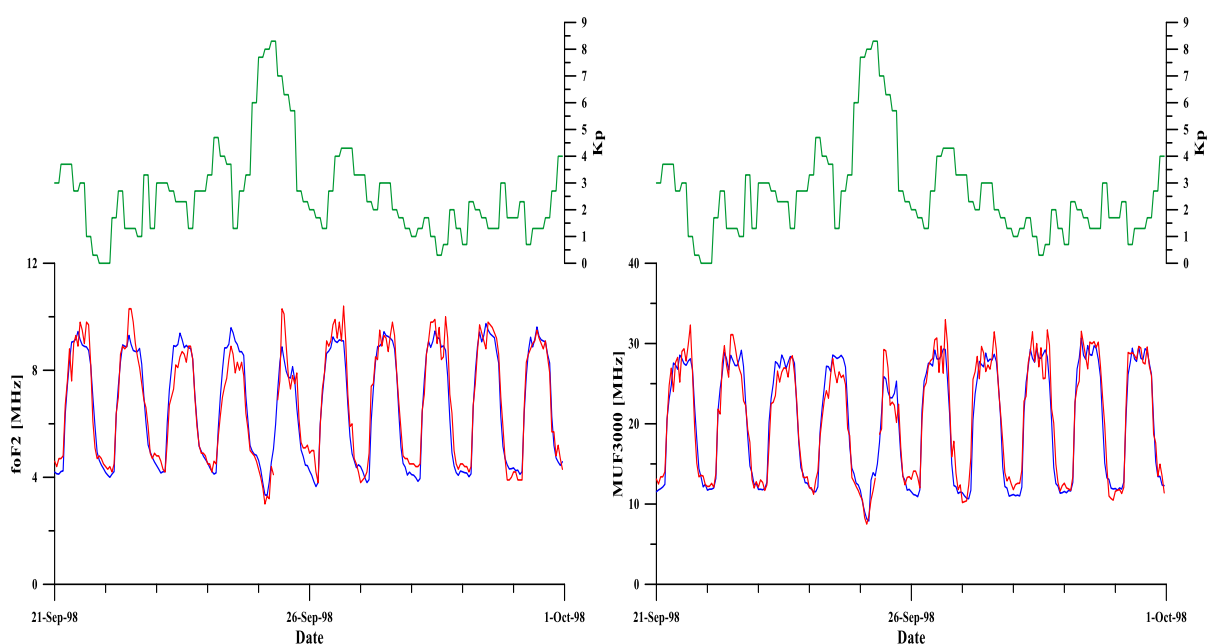


Фиг. IV.2.2 Средноквадратична грешка на прогнозата на $foF2$ (ляв панел) и $MUF3000$ (десен панел) -медианите (син цвят) и пълния модел (червен) за всеки конкретен календарен месец.

На Фиг. IV.2.2 са представени средноквадратичните грешки, изчислени за всеки месец от всяка година в интервала 1995- 2014. Тези фигури илюстрират влиянието на 11-годишния цикъл на слънчевата активност. В години на висока слънчева активност различията между медианния и пълния модел са най-големи защото тогава нараства влиянието както на геомагнитната активност, така и на късо-периодичните вариации на слънчевата ктивност, които слабо са отчетени от медианния модел. При ниска слънчева активност липсват съществени аномалии в слънчевата йонизираща радиация и геомагнитни аномалии и ходът на критичните честоти се определя главно от стационарното състояние.

IV. 3 Примери за прогнозиране на критичните честоти при конкретни геомагнитни бури и при спокойни условия

За да бъде направена демонстрация на резултатите от създадения емпиричен модел в условията на геомагнитни смущения в настоящата подглава са представени примери от симулацията на прогнозиране в реално време на някои избрани бури при различни нива на слънчевата активност както и за различните сезони. За тази цел на всяка фигура е показан ходът на индекса K_p (зелен цвят), измерените стойности от станция София, маркирани с червен цвят и за двете критични честоти (левият панел показва f_oF_2 , десният MUF3000) и моделните стойности, начертани със син цвят и за двата параметъра. За разгледания времеви интервал на всяка отделна буря са изчислени и представени в таблици съответните средна и средноквадратичната грешка за двете критични с цел онагледяване на сравнителния анализ между генерирания емпиричен модел и данните, получени от йоносферна станция София.



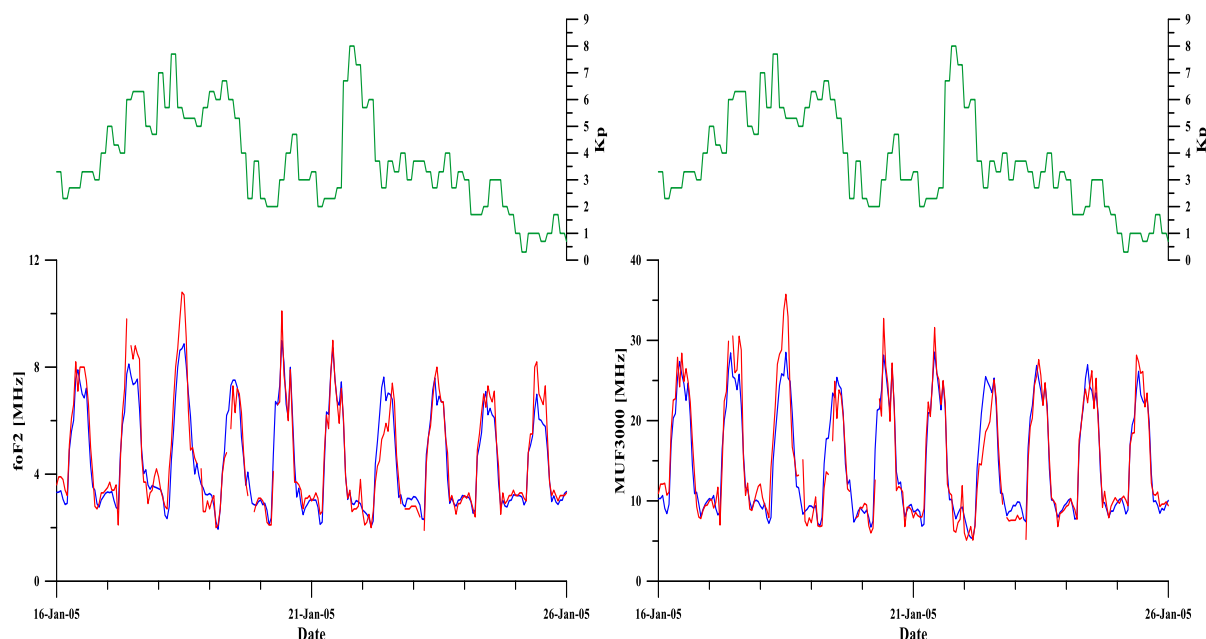
Фиг. IV.3.1 Аналогична на горните две фигури , но за геомагнитната буря на 24-25 септември 1998г.

На Фиг. IV.3.1 е показана геомагнитна буря с максимален K_p индекс почти 9 и продължителност около едно денонощие в есенното равноденствие. Геомагнитната буря е с внезапно начало и протича в условията на сравнително спокоен в геомагнитно отношение календарен месец. Показването на стойностите на K_p на 25 септември (горен ляв и десен панел; зелена линия) е съпроводено първоначално със слаба отрицателна реакция в критичните честоти на йоносферата в ранните часове на 25 септември , последвано от слабо забележима положителна реакция (по-силно изразена в f_oF_2 ; ляв долен панел; червена линия) малко преди достигането на максимума на K_p индекса. Характерно за тази типично есенна буря е сравнително слабата реакция на критичните честоти. Полученото съвпадение на прогнозата с данните е показано на Фиг. IV.3.1, което за настоящата задача се оказва достатъчно задоволително. Потвърждение на доброто сходство между модел и данни е показано в Таблица IV.3.1, съдържаща средната и средноквадратичната грешка за двете критични честоти за периода 21-30 септември 1998г. И при този пример имаме добро съвпадение между данни и модел, с незначителни средни (систематични) грешки и за двата параметъра,

както и напълно задоволителни за практическото приложение на модела стойности на RMSE (виж грешките в Таблица IV.3.1).

ME_{foF2}	-0.08 MHz	$RMSE_{foF2}$	0.57 MHz
$ME_{MUF3000}$	-0.26 MHz	$RMSE_{MUF3000}$	1.90 MHz

Таблица IV.3.1 Средна и средноквадратичната грешка за двете критични честоти за периода 21-30 септември 1998г.



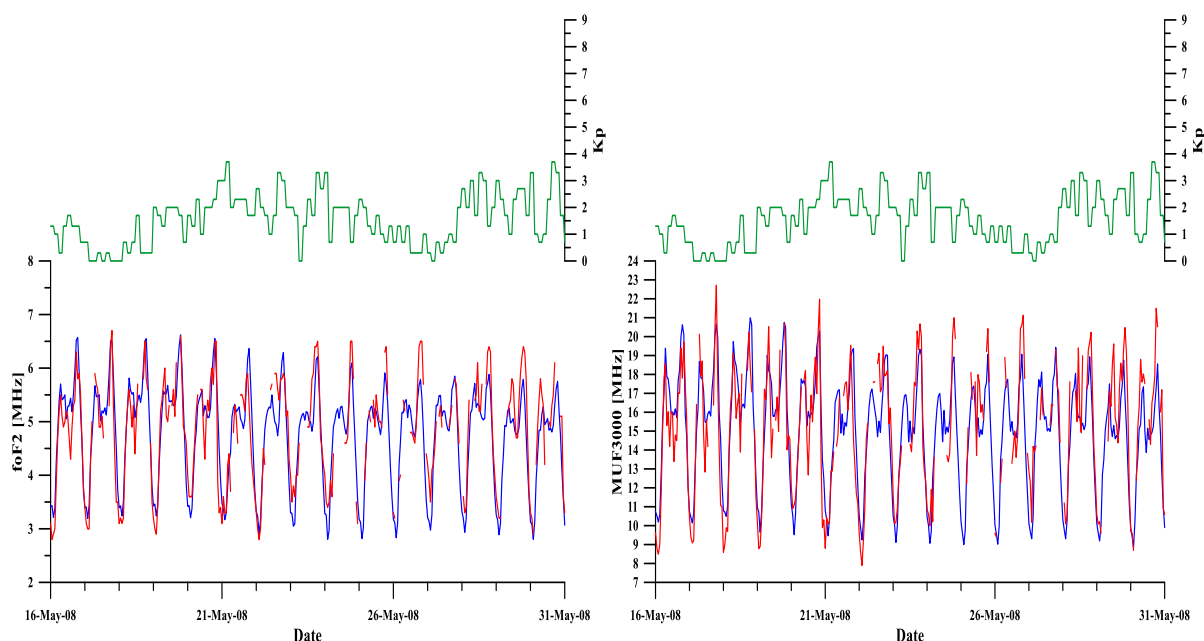
Фиг. IV. 3.2 Аналогична на Фиг. IV. 3.1, но за геомагнитната две геомагнитни събития през януари 2005г.

Показаните на Фиг. IV.3.2 примери са на бури, протичащи в типично зимни условия. Показаният интервал време (от 16 до 25 януари) включва две отделни бури, подробно изследвани от (Bojilova and Mukhtarov, 2019a). При първата буря (17-19 януари) се наблюдава много плавно начало и значителна продължителност от повече от две денонощия, а индекса на геомагнитната активност Kp в този период е между 6 и 8. Втората буря (нощните часове на 21 до нощта на 22 януари) е с внезапно начало и е кратковременна с продължителност от едно денонощие, като максималната стойност на Kp е около 8 (горен ляв и десен панел; зелена линия). Моделът не е отразил положителните реакции на критичните честоти (foF2 ляв долен панел; синя линия и MUF3000 десен долен панел; синя линия) в дневни условия (от 17 и 18 януари), но е отразил успешно негативната реакция на 19 януари (при затихване на бурята) и в двете критични честоти. При втората представенана буря на Фиг. IV. 3.2 (21-22 януари) имаме добро съвпадение на моделните данни (долен ляв и десен панел; синя линия) с измерените (долен ляв и десен панел; червена линия) и за двете критични честоти: foF2 (ляв долен панел) и MUF3000 (десен долен панел).

В таблица IV.3.2 са показани средната грешка и средноквадратичната грешка, отново с цел да се покаже доколко моделът се е справил успешно или не и както се вижда резултатите са достатъчно задоволителни за целите на радио-прогнозирането.

ME_{foF2}	-0.12 MHz	$RMSE_{foF2}$	0.67 MHz
ME_{MUF300}	-0.20 MHz	$RMSE_{MUF3000}$	2.31 MHz

Таблица IV.3.2 Аналогична на Таблица IV.3.1, но за периода 16-25 януари 2005г.



Фиг. IV.3.3 Аналогична на Фиг. IV.3.1, но за избран спокоен период според Кр-индекса и за година на ниска слънчева активност, 16-30 май 2008г.

На следващата Фиг. IV.3.3 е показан пример за поведение на модела при спокойни условия. Избран е месец май 2008г. когато Кр (горен ляв и десен панел; зелена линия) не надвишава 4, т.е. година на много ниска слънчева активност. От графиката се вижда, че получените критични честоти на йоносферата за избрания период са задоволително описани от модела. Очаквано по-добро съвпадение между модел и данни имаме при foF2 (ляв панел), което се потвърждава от направените в глава IV. 3 оценки за точността на модела.

Идентично на предходните примери в таблица IV.3.3 са показани средната и средноквадратичната грешка. И в този случай малките средни (систематични) грешки са както резултат от доброто представяне на модела в разглеждания интервал от време, така и отчасти от компенсирането на недооценените дневни максимуми и надценените нощни минимума.

ME_{foF2}	-0.08 MHz	$RMSE_{foF2}$	0.52 MHz
$ME_{MUF3000}$	-0.19 MHz	$RMSE_{MUF3000}$	1.76 MHz

Таблица IV.3.3 Аналогична на Таблица IV.3.1, но за периода 16-30 май 2008г.

Глава V Определяне на основните йоносферни характеристики по данни на ТЕС

В настоящата глава е предложен метод за определяне на критичните foF2 честоти на йоносферата (т.е. максималната електронна концентрация) и MUF3000 (максималната приложима честота на разстояние до 3000 км) в случаите когато липсват в момента измервания чрез вертикално сондиране на йоносферата в дадена точка, но са на разположение данни за вертикалната тотална електронна концентрация (TEC) в същата или близка до нея точка. Данните за TEC са достъпни от наземни GNSS приемници разположени по цялата земна повърхност, като броят им съществено нараства през последните години. Това е особено благоприятно обстоятелство даващо възможност за създаване на обобщени глобални TEC карти в регулярна географска мрежа. Тези карти

предоставят възможност да се изследва зависимостта между TEC и foF2 в такива географски координати, за които има достатъчен обем данни от вертикалното сондиране. Стойностите на TEC са взети от Center for Orbit Determination of Europe (CODE)- <ftp://ftp.unibe.ch/aiub/CODE/>. Поради това, че данните предоставени от CODE са в географска мрежа със стъпка 2.5° по ширина и 5° по дължина е избрана най-близката до координатите на София точка, а именно 42.5°N, 25°E. За разработването на модел е необходим достатъчно дълъг ред от данни, като за целта са взети годините от 1999 до 2014г. Това е периодът, в който има едновременно данни за TEC и критичните честоти на йоносферата.

Получените емпирични зависимости между величините могат да се използват за възстановяване на данните в периоди, в които станциите за вертикално сондиране не осигуряват такива, например по технически причини.

V.1 Функционална зависимост на критичните честоти от TEC

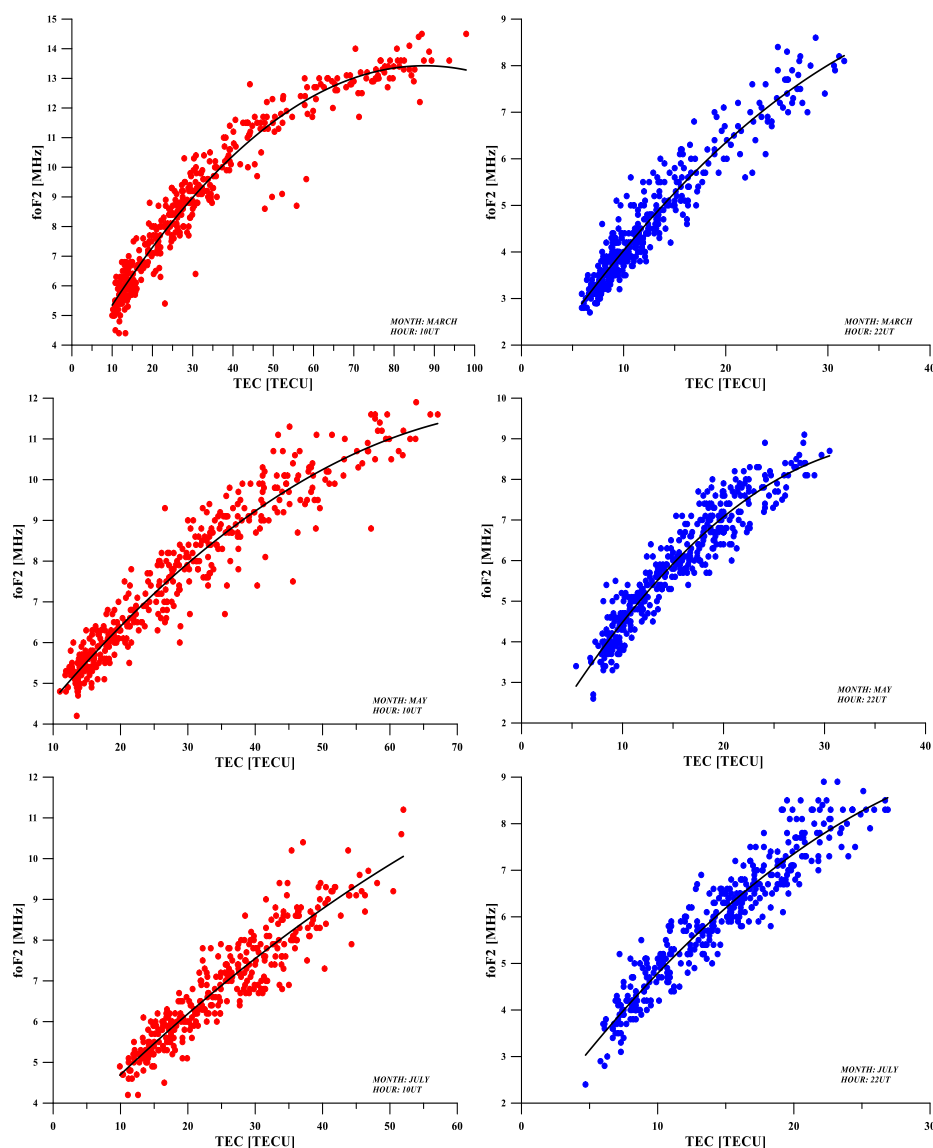
По определение тоталната електронна концентрация представлява интеграл на йоносферната електронна концентрация за цялата йоносфера по линия, вертикална в дадена точка от повърхността на Земята. Профилът на електронната концентрация притежава максимум на височина 200- 400 км, чиято максимална електронна концентрация е свързана еднозначно с критичната честота на слоя F2 по формулата:

$$NmF2 = 1.24(foF2)^2 \quad (V.1)$$

По-горе бе споменато, че за да се намери статистически репрезентативни зависимости на foF2 и MUF3000 от TEC е необходимо да се разполага с достатъчно дълги редове от данни едновременно за трите параметъра. В нашия случай се разполага едновременно с данни за TEC и йоносферните критични честоти за периода от 16 пълни години. Този интервал е недостатъчен за изследване на цикличната слънчева активност върху зависимостта на йоносферата от TEC. Подробното изучаване на времевото разпределение на геомагнитните бури в разглеждания интервал показва, че наличните данни са недостатъчни и за изследване на геомагнитната активност върху зависимостта на критичните честоти от TEC. Следователно, в тази глава ще бъдат представени резултати за зависимостта на foF2 и MUF3000 от TEC над София от UT/LT и сезона (за подбран календарен месец).

В следващите примери е показано, че наистина получените регресионни зависимости между foF2 и MUF3000 от една страна и TEC от друга за станция София могат да се опишат чрез полином от втора степен.

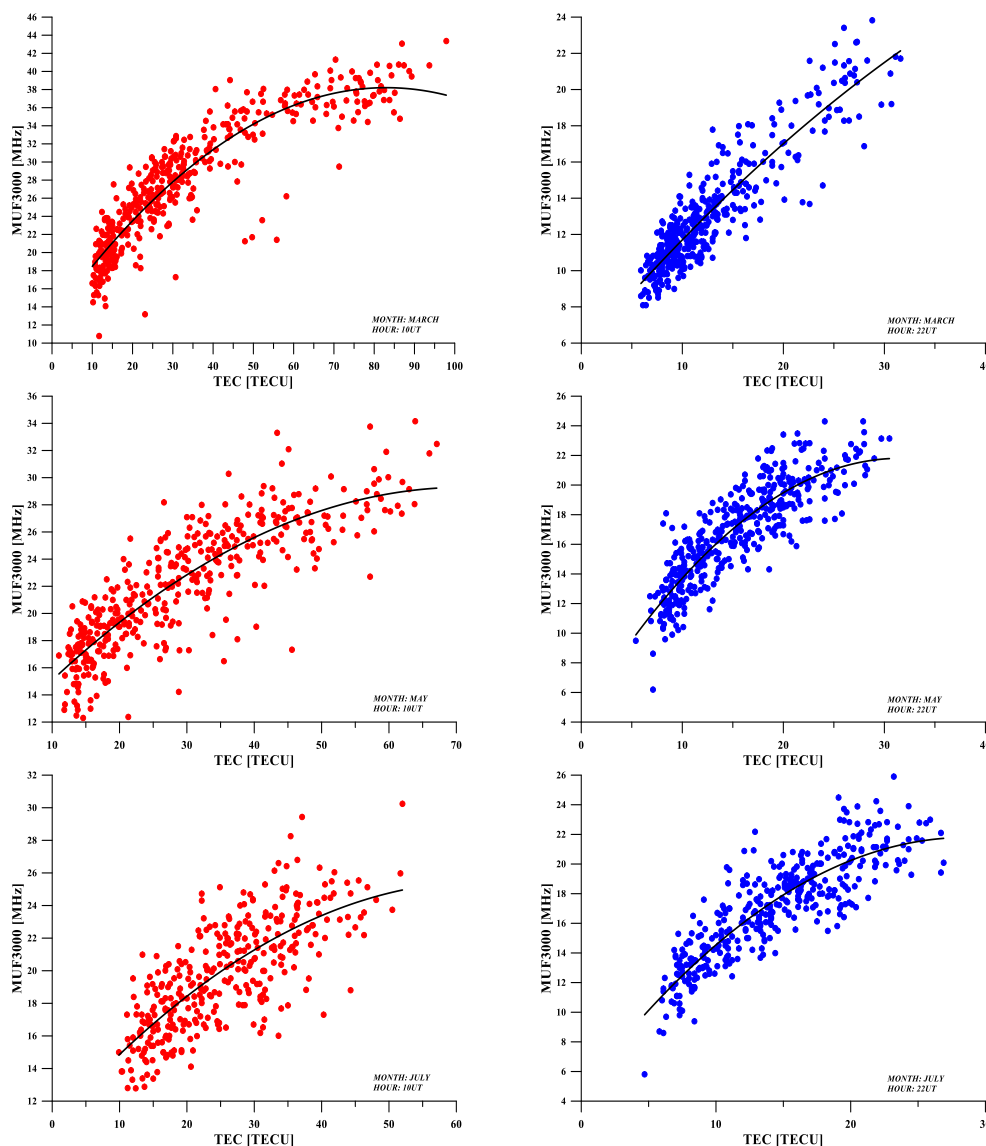
Изобразените на Фиг. V.1.1 зависимости представляват регресии на foF2 от TEC, получени по метода на най-малките квадрати, за месеците март, май, юли, като са показани зависимости за дневни (10UT; лява част панели) и нощни (22UT; дясна част панели) условия. В показаните примери ясно се вижда, че параболичната зависимост е подходяща за определяне на връзката между TEC и foF2. Резултатите от регресионните зависимости показват още, че коефициентите на параболичната зависимост силно зависят и от сезона и от денонощното време. Важно е да се отбележи, че в примерите са използвани всички стойности за дадения месец и час през интервала 1999-2014г., който включва периоди както на ниска, така и на висока слънчева и геомагнитна активности. Такива регресии са получени за всеки календарен месец и за всеки час от денонощието поотделно за двете йоносферни характеристики – foF2 и MUF3000.



Фиг. V.1.1 Регресионни зависимости на стойностите на $foF2$ от TEC за календарните месеци март, май, юли, за 10 UT (ляв ред панели; червен цвят символи) и 22 UT (десен ред панели; син цвят символи), получени от всички данни (1999г. – 2014г.)

Аналогична на Фиг. V.1.1 следващата Фиг. V.1.2 показва регресионната зависимост на $MUF3000$ от TEC отново получени по метода на най-малките квадрати за месеците март, май, юли, както за дневни (10UT; лява част панели), така и нощни (22UT; дясна част панели) условия. В този случай наблюдаваните случаи на линейна регресионна зависимост между $MUF3000$ и TEC са само в нощни условия през месец март (Фиг. V.1.2; десен панел). При всички останали случаи параболичната зависимост е целесъобразна. Подобно на предходния пример и в този случай ясно се вижда, че регресионните зависимости показват, че коефициентите на параболичната зависимост силно зависят и от денонощното време и от сезона.

Както се вижда от получените регресии между йоносферните характеристики $foF2$ и $MUF3000$, от една страна, и TEC , от друга те могат да бъдат описани достатъчно добре с полином от втора степен.



Фиг. V.1.2 Аналогична на Фиг. V.1.1, но илюстрираща регресионните зависимости на стойностите на MUF3000 от TEC

Съгласно резултатите от регресионния анализ, представени на предходните две фигури можем да приемем, че търсените зависимости на foF2 от TEC и MUF3000 от TEC имат следният вид:

$$foF2 \approx a_f(month, UT) TEC^2 + b_f(month, UT) TEC + c_f(month, UT) \quad (V.1.1)$$

$$MUF3000 \approx a_m(month, UT) TEC^2 + b_m(month, UT) TEC + c_m(month, UT) \quad (V.1.2)$$

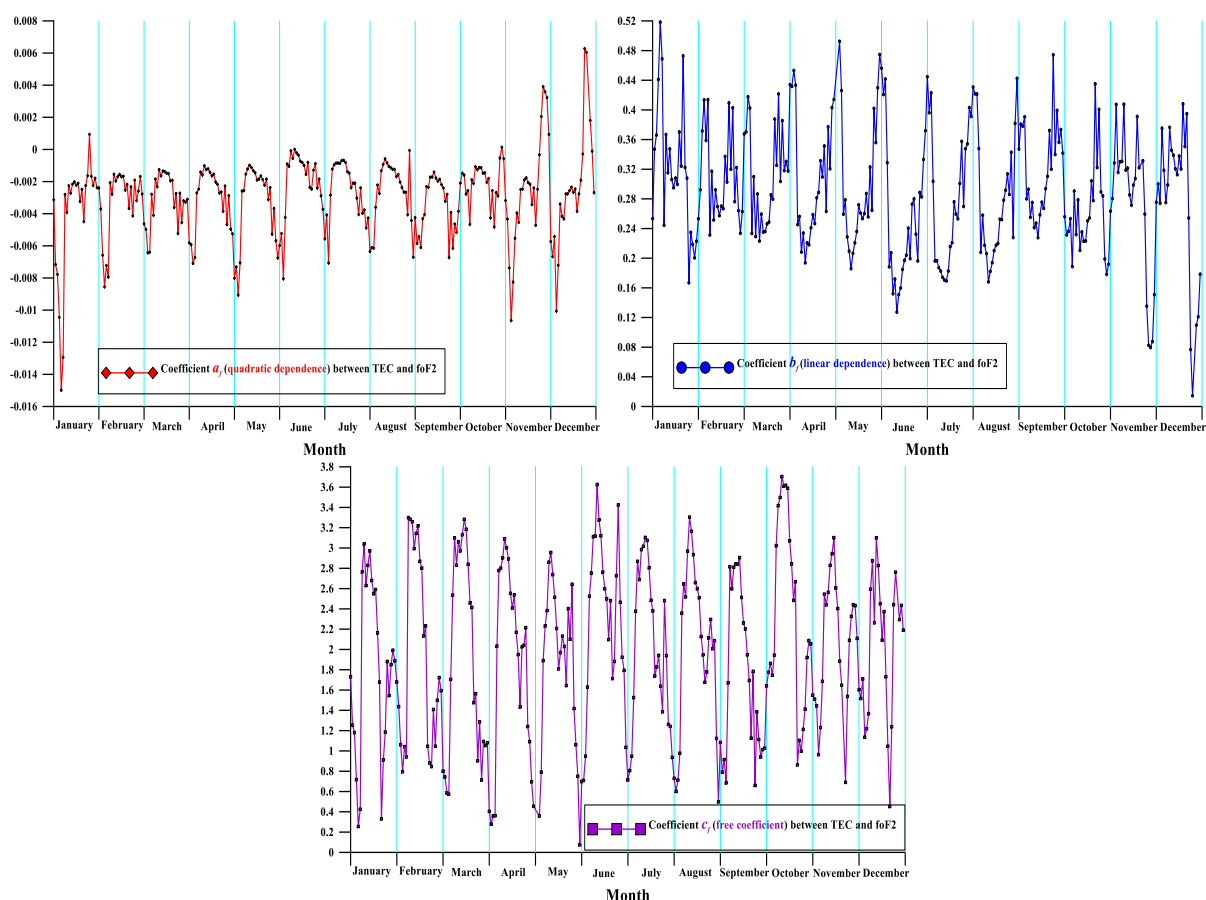
В подкрепа на приетата по формули (V.1.1 и V.1.2) връзка между TEC и критичните честоти на йоносферата е работата на Ssessanga et al., (2014), които представят подобна зависимост, валидна за Южно Африканския регион.

V.2 Определяне на регресионните коефициенти в зависимост от сезона и локалното време

Добре известна е зависимостта на йоносферата както от сезона, така и от локалното време. Ето защо следващите примери имат за цел да покажат именно тази зависимост на регресионните коефициенти между TEC и двете йоносферни характеристики.

Изчислени са всички стойности на foF2 за целия интервал време от 1999г. до 2014г. по параболичните зависимости от стойностите на TEC- общо 116886 часови стойности и са сравнени с измерените. Средната грешка е практически равна на нула, а средноквадратичната грешка е 0.55MHz. За практически цели, например за изчисляване на приложимите честоти за дадено радиотрасе, тази грешка е допустима.

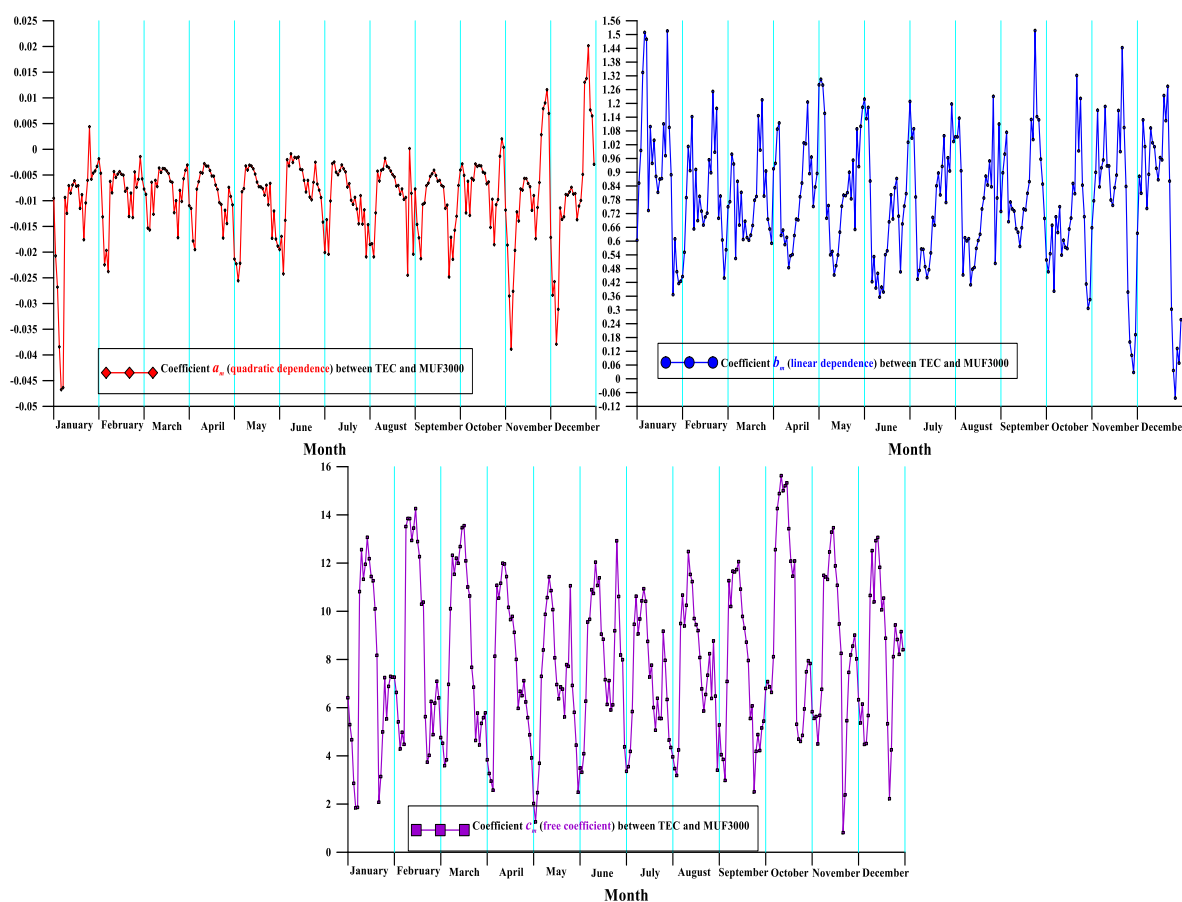
Фиг. V.2.1 демонстрира зависимостта на трите коефициента (коефициент a_f – квадратична зависимост; горен ляв панел; червена линия с ромбоидни символи; коефициент b_f – линейна зависимост; горен десен панел; синя линия с кръгли символи и свободен коефициент c_f – долен панел; лилава линия с квадратни символи) в представянето на foF2 от TEC (формула V.1.1) от денонощното време и сезона (календарния месец) получени по метода на най-малките квадрати. Очевидна е зависимостта на регресията от денонощното време както и от сезона, което оправдава подхода за индивидуално определяне на регресията по месеци и по часове. Получените зависимости са чисто емпирични, но те отразяват и определени физически закономерности. Тоталната електронна концентрация, която е интеграл на височинния профил на електронната концентрация на цялата йоносфера зависи не само от областта на най-силна йонизация (областта F на йоносферата, която се характеризира от foF2) но и от разпределението на електронната концентрация над максимума, за която област вертикалният сондаж на йоносферата не може да представи данни. Сезонните и денонощни вариации на тази част от йоносферата имат различен характер от тези в областта F, което предизвиква неизбежни отклонения в изведените зависимости.



Фиг. V.2.1 Времево разпределение на коефициентите на параболичната регресия представяща зависимостта на foF2 от TEC за всеки календарен месец и всеки час по UT

Аналогично на foF2 и за другата величина MUF3000 са изчислени стойностите за целия интервал време от 1999г. до 2014г. по параболичните зависимости от стойностите на TEC- общо 116644 часови стойности и са сравнени с измерените. Средната грешка е практически равна на нула, а средноквадратичната грешка в този случай е 2.1MHz. От практическа гледна точка в случаите на изчисление радиотрасета, тази грешка е допустима.

Фиг. V.2.2 е аналогична на Фиг. V.2.1 и илюстрира зависимостта на трите коефициента в представянето на MUF3000 от TEC от денонощното време и сезона, получени посредством метода на най-малките квадрати. Отново се наблюдава добре изразена зависимост на регресионните коефициенти от денонощното време както и от сезона, което е обосновката и в този случай за индивидуално определяне на регресията по месеци и по часове.



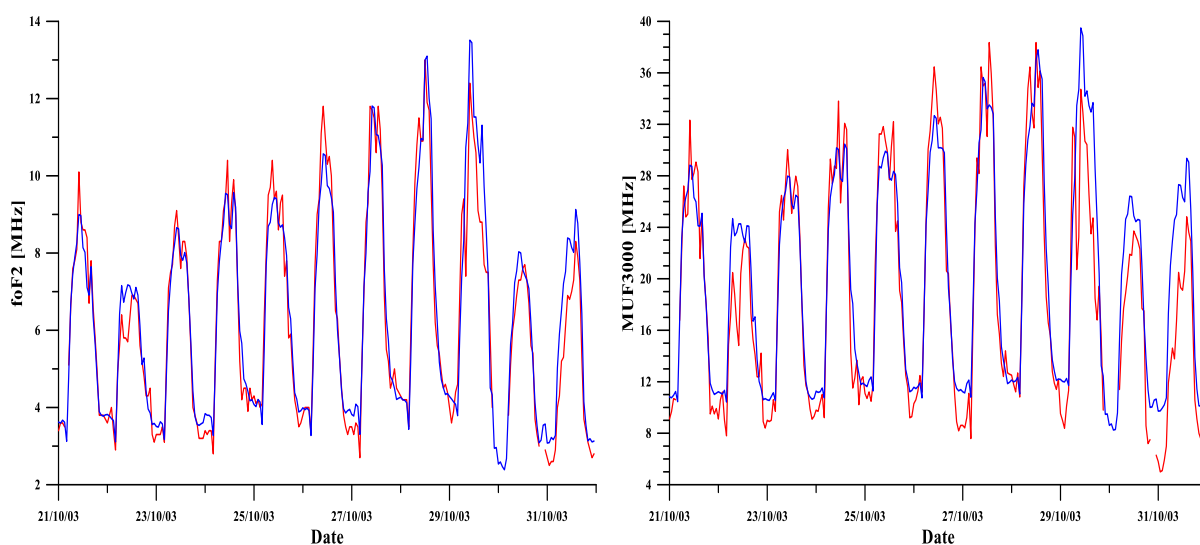
Фиг. V.2.2 Аналогична на Фиг. V.1.1, но представяща коефициентите на MUF3000 от TEC

V.3 Оценка на точността

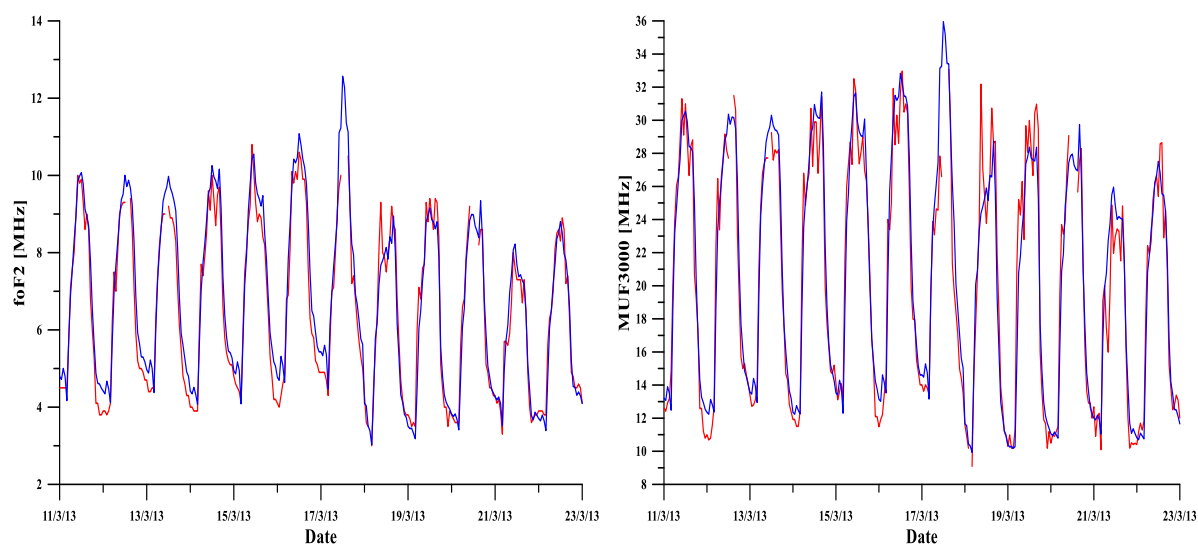
За оценка на достоверността на използваната зависимост между критичните честоти на йоносферата и TEC (формули V.1.1 и V.1.2) е извършена симулация за целия интервал време 1999г. - 2014г. Чрез заместване във формулите на получените в предходната глава регресионните коефициенти в зависимост от сезона и локалното време се прави възстановяване на стойностите на foF2 и MUF3000 от TEC. В следващите примери е показано поведението на получените чрез TEC критични честоти сравнени с измерените такива, в условията на конкретни геомагнитни бури. Пресметнати са и съответните средни и средноквадратични отклонения за всеки конкретен случай.

На Фиг. V.3.1 са показани измерените стойности на двата параметъра: foF2 (ляв панел;

червена линия) и MUF3000 (десен панел; червена линия) и съответните реконструирани такива по TEC за foF2 (ляв панел; синя линия) и MUF3000 (десен панел; синя линия) за периода 21- 31 октомври 2003 г. Разгледаният времеви интервал е избран поради регистрираната екстремална по сила геомагнитна буря, известна като Halloween geomagnetic storm, в периода 29-30 октомври. От Фиг. V.3.1 се вижда, че съпадението на измерените и моделираните стойности е задоволително не само в спокойните дни на месеца, но и в смутените. За показания интервал време на Фиг. V.3.1 средната грешка за foF2 възлиза на 0.2 MHz, докато тази за MUF3000 е 1.55MHz, а съответните RMS на foF2 е 0.73MHz, а RMS на MUF3000 е 3.47 MHz. RMS стойностите на двата йоносферни параметъра при разгледания по-горе пример, не се различават съществено от грешките за целия интервал от години.



Фиг. V.3.1 Сравнение на определените по TEC часови стойности на foF2 (синя линия; ляв панел) и измерените такива (червена линия; ляв панел) и съответните пресметнати стойности на MUF3000 (синя линия; десен панел) от TEC и измерените такива (червена линия; десен панел) за периода 21-31 октомври 2003 г.



Фиг. V.3.2 Аналогична на Фиг V.3.1, но за периода 11-22 март 2013г.

Фиг.V.3.2 е аналогична на предходната фигура, но избрания период 11-22 март 2013г. Избран е този времеви интервал за да се покаже сравнение между получените

стойности за двете йоносферни характеристики по данни на ТЕС и съответните измерени стойности на същите величини в условията на геомагнитната буря от 17 март 2013г. При този пример, както и на Фиг.V.3.1 имаме задоволително съвпадение между измерените и реконструирани стойности на критичните честоти на йоносферата. За показания интервал време на Фиг. V.3.2 средната грешка за f_oF_2 е 0.19 MHz, докато тази за MUF3000 е 0.30MHz, а съответните RMS на f_oF_2 е 0.52MHz, а RMS на MUF3000 е 1.81MHz. И в този пример имаме добро съвпадение между средните и средноквадратичните грешки за интервала 11-22 март 2013г. и намерените такива за целия разглеждан 15-годишен период.

Направеният анализ на зависимостите между ТЕС и критичните честоти на йоносферата показва, че е възможно да се използват данните от наземните GNSS приемници за определяне на f_oF_2 и MUF3000. Необходимо условие за това е наличието на достатъчно дълъг период (най-малко един слънчев цикъл, около 11 г.) в който да се разполага с едновременни данни от вертикалното сондиране на йоносферата и данни за ТЕС. Предлагащата сравнително проста регресионна зависимост между ТЕС и критичните честоти на йоносферата осигурява минимизиране на средноквадратичната грешка и практическо анулиране на систематичното отклонение. Получените от ТЕС оценъчни стойности на f_oF_2 и MUF3000 могат да се използват за изчисление на радиотрасета в дадения регион с достатъчна за практически цели точност не само в спокойни, но и в смутени от геомагнитни бури условия.

Глава VI Изчисление на радиотрасета

Осъществяването на радиовръзки на далечни разстояние датира още в началото на XX век (1901 или 1902г.) с експериментите на Маркони за осъществяване на радиосвързка през Атлантическия океан. По същото време Хевисайд и Кенели изказват предположението за съществуване на йонизиран слой в атмосферата, който позволява на радиовълните да се отразяват от него. През първата половина на XX век работите на Еплтон, Хартри и Гинзбург основават теорията за разпространение и отражение на радиовълните от йонизирана среда.

Задачата за изчислението на радиотрасе съдържа определяне на диапазона от честоти, на които може да се осъществи радиовръзка при зададено разстояние между двата пункта на радиовръзката. Диапазонът честоти се ограничава от минимално и максимално приложимите честоти (НПЧ и МПЧ), който зависи от разстоянието на радиовръзката и състоянието на йоносферата в съответния момент време.

За решаването на тази задача е необходимо да е известен височинният профил на електронната концентрация на йоносферата до максимума в областта на отражение на радиовълните (тя е средата на радиотрасето). В настоящата глава се разглеждат радиотрасета, разположени примерно в границите на България, при разстояния до 500 км, при които радиовръзката се осъществява с еднократно отражение от йоносферата. Методиката на изчисление се основава на теорията за разпространение на радиовълните без отчитане влиянието на земното магнитно поле. Но това опростяване не понижава точността на изчислението. При навлизане в йоносферата радиовълните претърпяват т.нар. магнитно- йонно разцепване, т.е. се разпадат на две отделни вълни, които се разпространяват с различни скорости. По традиция данните от йонограмите се отчитат йоносферни характеристики (например критични честоти) по отраженията на обикновената вълна. Разпространението на обикновената вълна не се влияе от наличието на земно магнитно поле.

За изчислението на МПЧ и НПЧ се оказват достатъчни следните теореми на вертикалното разпространение на обикновената вълна в йонизиран слой (Долуханов, 1965, Черный, 1972).

$$h'_{vert}(f) = \int_0^{z_0} \frac{dz}{\sqrt{1 - 80.8 \frac{N(z)}{f^2}}} \quad (VI.1)$$

$$80.8 \frac{N(z_0)}{f^2} = 1$$

Формула VI.1 представя зависимостта на виртуалната височина на отражение от височинния профил на електронната концентрация $N(z)$ в $1/\text{cm}^2$, където z е височина над Земята в km, и честотата на радиосигнала f в MHz.

Височината на отражение z_0 се определя от условието за равенство на работната и плазмена честота. Интегралът е несобствен, защото на височината на отражение знаменателят на подинтегралната функция се анулира.

Съотношенията позволяват да се изчисли йонограмата при вертикално разпространение, ако е известен профилът на електронната концентрация.

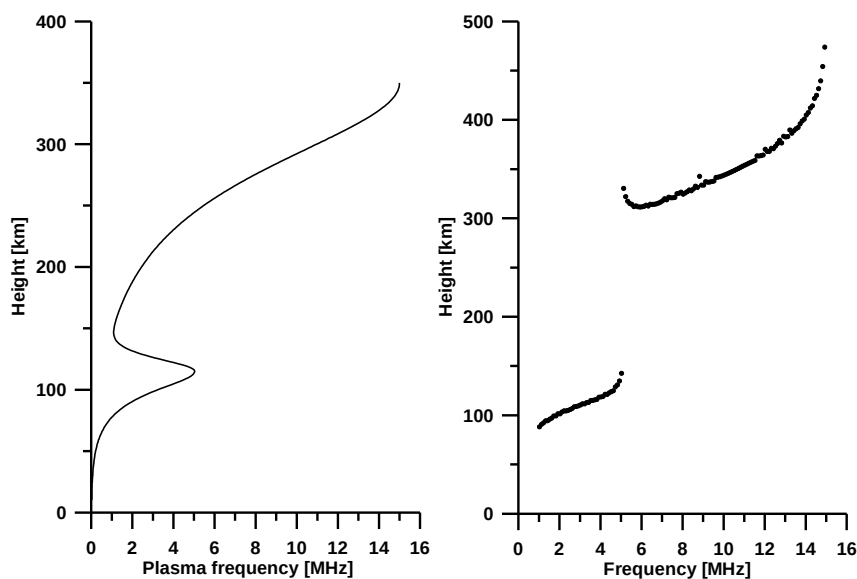
Процедурата за изчислението на радиотрасето започва със синтезиране на моделен профил на електронната концентрация на базата на прогнозираните критични честоти foF2, MUF3000 и foE. Използван е моделът, наречен по имената на неговите създатели профил на Ди Джовани- Радичела (Di Giovanni and Radicella, 1990).

Този модел се базира на представянето на електронния профил с функции секанс хиперболически. Достатъчни са стойностите на трите критични честоти за да се изчисли моделният височинен профил за височини до височината на максимума на областта F, който се изчислява по горните формули. Максималните електронни концентрации на областите E и F се определят директно от критичните честоти. Височината на максимума на областта E се приема фиксирана 120 km. В модела е използвана емпирически определената от (Dudeney and Kressman, 1986). зависимост на височината на максимума на електронната концентрация hmF2 от параметъра $M3000F2 = MUF3000F2/foF2$ и от отношението $foF2/foE$ чрез корекционната величина Dm съгласно приведените формули.

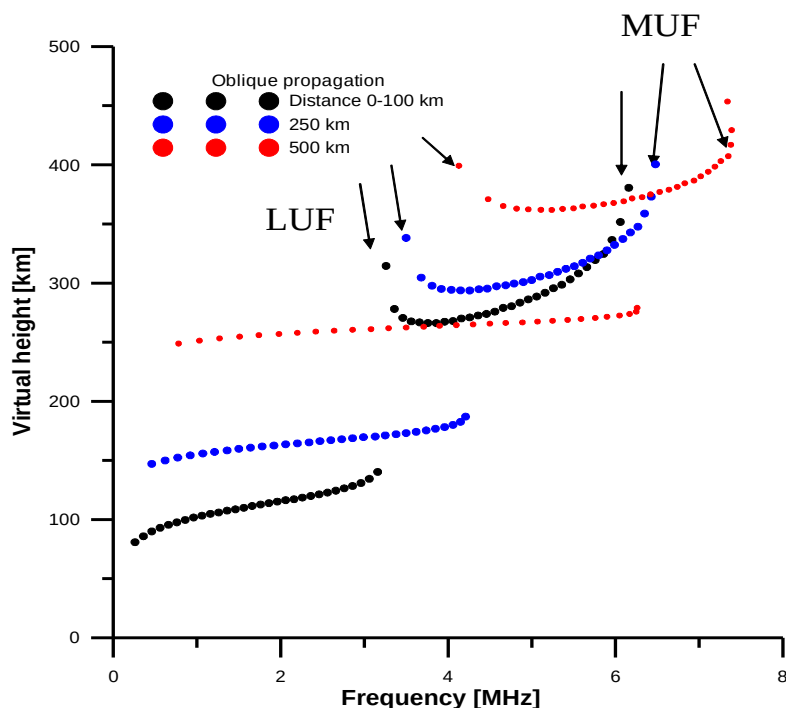
За целите на изчисление на радиотрасета стойности за foE могат да се получат от модела IRI, които се предоставят в зависимост от слънчевата активност, сезона и денонощното време за определена географска ширина и дължина. Йоносферната област E практически не се влияе от геомагнитната активност и е достатъчно да се използват фоновы стойности (Pancheva and Mukhtarov, 1997).

След изчисление на електронния профил със стъпка примерно 1 km, се пристъпва към изчисление на моделната йонограма по формула 1 посредством числено интегриране. На Фиг. VI.1 е показан примерен моделен профил и съответната му моделна йонограма.

След изчисление на моделната йонограма, която представлява функцията $h'_{vert}(f_{vert})$ при вертикално разпространение се пристъпва към изчислението на моделните наклонени йонограми при зададена дистанция на радиосвързката (или координати на двете крайни точки на радиотрасето) съгласно формули VI.2, VI.3, VI.4. Резултатите от това са показани на Фиг. VI.2 за разстояние съответно 0-100 km, 250km и 500km.



Фиг. VI.1 Примерен моделен профил на електронната концентрация в дневни условия (ляв панел) и съответната на него моделна йонограма (десен панел).



Фиг. VI.2 Наклонени йонограми на базата на моделния профил от Фиг. при дистанции на радиовръзката 0-100 km, 250km и 500km.

При дистанции на радиовръзката до 100 km с достатъчна за практиката точност може да се приеме, че отражението на радиовълните е близко до вертикалното. При по-големи разстояния се получава възможност на някои честоти да се осъществи отражение от областта E и областта F. По традиция стабилни радиосвързки се осъществяват при отражения от областта F, отражения от областта E са съпроводени с голямо поглъщане на енергията на радиовълните поради отражението им в област с висока концентрация на неутралния въздух. От получените наклонени йонограми за даденото разстояние могат да се отчетат границите на диапазона честоти, които се отразяват от областта F при зададеното разстояние, както това е показано на Фиг. VI.2.

Заклучение

В настоящия дисертационен труд е представено решение на задачата за създаване на едноточков емпиричен модел за краткосрочно (до три дни напред) прогнозиране на основните характеристики на йоносферата над България - критичните честоти при вертикално разпространение и наклонено разпространение на дистанция 3000 km. Моделът е предназначен за работа в реално време, като в него се използват часови данни за Total Electron Content (TEC) и за нивото на слънчевата и геомагнитна активност. Изчислените прогнозни стойности могат да служат за прогнозиране на разпространението на радиовълни на дистанции, зададени от потребителя в границите на Република България.

Работата по изпълнението на тази задача включва първоначално изследване на статистическите закономерности на реакцията на критичните честоти на йоносферата при късопериодични аномалии в слънчевата и геомагнитна активност. Направеният анализ се базира на данните на йоносферна станция София за периода от 1995- 2014 година. Получени са корелационните и регресионни зависимости на реакцията в зависимост от сезона (от календарния месец). Особено внимание е обърнато на определяне на сезонната зависимост на инертността на реакцията на йоносферата над България от геомагнитните аномалии. Изследването е проведено отделно за дневни и нощни условия, което е нов момент в емпиричното моделиране. Резултатите от анализа са използвани за обосновка на емпиричните функционални зависимости, които са използвани при синтеза на модела.

Предлаганият емпиричен модел включва прогнозиране на стационарното (спокойно) състояние на критичните честоти и отклонението им под въздействие на вариациите на слънчевата и геомагнитна активност. Стационарното състояние се прогнозира на базата на стойностите, получени в изминал период време от 15 денонощия. Изборът на 15-дневен период време е обоснован статистически. Вариациите на критичните честоти се представят от релативното отклонение, което се прогнозира на базата на модифицирани индекси на слънчевата и геомагнитна активност при отчитане на денонощното време и сезонната зависимост. Модификацията на индексите е обоснована в дисертацията и включва въвеждане на инертност на реакцията на средноширинната йоносфера, като параметрите на инертността са определени статистически за конкретната йоносферна станция. Емпиричната функция на предлагания модел съдържа 193 константи, различни за всеки календарен месец и за всяка критична честота. Константите са определени по критерия на най-добро приближение- минимална средноквадратична грешка.

В дисертацията е представена подробна статистика на отклоненията на модела от данните. Представени са моделните стойности, получени при някои избрани геомагнитни бури през изследвания период. Изчислението на моделните стойности е извършено при напълно реална симулация- всяка прогнозна стойност е получена чрез използване на данни преди текущия момент време.

В дисертационния труд е разработен и емпиричен модел, позволяващ изчисление на критичните честоти на йоносферата при липса на данни от вертикален сондаж на базата на стойности на TEC, които са със свободен достъп. Представени са статистики на точността на предлаганото преобразуване, които се оказват напълно задоволителни за практическо приложение. В дисертацията е описан метод за изчисление на конкретно радиотрасе със зададена дистанция на радиосвързката по данни, получени от настоящия прогностичен модел, което доказва практическата приложимост на модела за изчисление на диапазона честоти, подходящи за осъществяване на радиосвързка.

Основни приноси на дисертационния труд

1. Извършено е подробно изследване на денонощните и сезонни закономерности на реакцията на йоносферните критични честоти за България в периода от 1995 до 2014г. Разгледаният времеви интервал включва почти два слънчеви цикъла, което е достатъчно дълъг период за получаване на статистически достоверни резултати. Определена е сезонната зависимост на инертността на йоносферните реакции отделно за дневни и за нощни условия.
2. Създаден е едноточков емпиричен функционален модел, позволяващ изчислението на критичните честоти на йоносферата над България за всеки конкретен час от дадено денонощие при наличие на измерени стойности през изминалите 15 денонощия и данни за индексите на слънчева и геомагнитна активност. Новите моменти в този емпиричен модел са въвеждане на отделни параметри за дневни и нощни условия, както и въвеждане на допълнителни времезакъснения на реакцията на йоносферата, моделиращи закъснението на реакцията ѝ над България от геомагнитната активност поради явленията на пренос от полярни към средни ширини.
3. Предложен е отделен емпиричен модел за изчисление на критичните честоти на йоносферата над България от тоталното електронно съдържание. Това дава възможност да се изготвят прогнози на критичните честоти при отсъствие на данни от вертикалния сондаж на йоносферата.
4. Описан е метод за изчисление на конкретни радиотрасета (диапазон на допустими честоти на радиосвързка) на базата на прогнозните стойности на критичните честоти, включващ използването на известен модел на профила на електронната концентрация и основните закономерности на отражението на радиовълните от йоносферата. Предлаганият метод позволява да се осъществи напълно автоматизирано изготвяне на прогнозиране на радиотрасета за йонсферна радиосвързка.

Литература

- Andonov, B., Mukhtarov, P., & Pancheva, D. (2011). Empirical model of the TEC response to the geomagnetic activity over the North American region. *Advances in Space Research*, 48(6), 1041-1048.
- Bojilova, R., & Mukhtarov, P. (2019a). Response of the electron density profiles to geomagnetic disturbances in January 2005. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 63(3), 436-454.
- Bojilova, R., & Mukhtarov, P. (2019b). Response of Total Electron Content to the Three G4–Severe Geomagnetic Storms in January 2005 Associated with Cosmic Ray Events GLE 68 and GLE 69. *COMPTEs RENDUS DE L ACADEMIE BULGARE DES SCIENCES*, 72(9), 1244-1250.
- Di Giovanni, G., & Radicella, S. M. (1990). An analytical model of the electron density profile in the ionosphere. *Advances in Space Research*, 10(11), 27-30.
- Dudeney, J. R., & Kressman, R. I. (1986). Empirical models of the electron concentration of the ionosphere and their value for radio communications purposes. *Radio Science*, 21(3), 319-330.
- Korn, G., & Korn, T. (1974). *Handbook of mathematics*. Moscow: Nauka. [Russian translation].
- Kutiev, I., & Muhtarov, P. (2001). Modeling of midlatitude F region response to geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 106(A8), 15501-15509.
- Kutiev, I., Muhtarov, P., Andonov, B., & Warnant, R. (2009). Hybrid model for nowcasting and forecasting the K index. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 71(5), 589-596.
- Mendillo, M. (2006). Storms in the ionosphere: Patterns and processes for total electron content. *Reviews of Geophysics*, 44(4).
- Muhtarov, P., Kutiev, I., Cander, L. R., Zolesi, B., de Franceschi, G., Levy, M., & Dick, M. (2001). European ionospheric forecast and mapping. *Physics and Chemistry of the Earth, Part C: Solar, Terrestrial & Planetary Science*, 26(5), 347-351.
- Mukhtarov, P., & Pancheva, D. (2012). Thermosphere–ionosphere coupling in response to recurrent geomagnetic activity. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 90, 132-145.
- Mukhtarov, P., Andonov, B., & Pancheva, D. (2013). Global empirical model of TEC response to geomagnetic activity. *Journal of Geophysical Research: Space Physics*, 118(10), 6666-6685.
- Mukhtarov, P., Pancheva, D., & Andonov, B. (2014). Hybrid model for long-term prediction of the ionospheric global TEC. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 119, 1-10.
- Mukhtarov, P., & Bojilova, R. (2017). Influence of solar and geomagnetic activity on the ionosphere over Bulgaria. *Comptes rendus de l'Académie bulgare des Sciences*, 70(9), 1289-1297.
- Penov, N., Pancheva, D., Mukhtarov, P., & Guerova, G. (2015). Ionospheric response to sudden stratospheric warming in January 2009 recorded by ionosonde measurements. *Compt. rend. Acad. bulg. Sci*, 68(2), 241-250.
- Pancheva, D. V., & Mukhtarov, P. Y. (1996). A single-station spectral model of the monthly median F-region critical frequency. *Annals of Geophysics*, 39(4).
- Pancheva, D., & Mukhtarov, P. (1997). A single-station model for the monthly median E-region critical frequency. *Bulgarian Geophysical Journal*, 23(3), 24-32.
- Pancheva, D., & Mukhtarov, P. (1998). Observed Response of the Ionospheric F2–

Layer and Lower Thermosphere to Geomagnetic Storms during High Solar Activity. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 42(2), 119-136.

Pancheva, D., Mukhtarov, P., & Andonov, B. (2016). Global structure of ionospheric TEC anomalies driven by geomagnetic storms. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 145, 170-182.

Rishbeth, H. (1991). F-region storms and thermospheric dynamics. *Journal of geomagnetism and geoelectricity*, 43(Supplement1), 513-524.

Rishbeth, H., & Garriott, O. K. (1969). *Introduction to ionospheric physics* (Vol. 14). New York: Academic press.

Ssessanga, N., Mckinnell, L. A., & Habarulema, J. B. (2014). Estimation of foF2 from GPS TEC over the South African region. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 112, 20-30.

Списък на публикациите по темата на дисертацията

1. Румяна Божилова, Пламен Мухтаров „Приложение на метода най-малки квадрати при анализ на времеви редове геофизични данни. Изследване на спектрални характеристики“, 45-та НАЦИОНАЛНА КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ВЪПРОСИТЕ НА ОБУЧЕНИЕТО ПО ФИЗИКА „Експериментът – основа на образованието по физика“, 2017, 60-63, ISBN 978-954-580-367-3

2. Bojilova R., Mukhtarov P. „Functional dependence of the critical frequency of the ionospheric F2-layer on geomagnetic activity“, Proceedings of Twelfth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, 2020, ISSN:2367-7570, DOI:10.31401/WS.2020.proc, 44-48

3. Bojilova R., Mukhtarov P. “Relationship between short-term variations in solar activity and critical frequency of the ionospheric F2 layer“, Proceedings of Twelfth Workshop “Solar Influences on the Magnetosphere, Ionosphere and Atmosphere”, 2020, ISSN:2367-7570, DOI:10.31401/WS.2020.proc, 49-52