

MASARYKOVA UNIVERZITA
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
ÚSTAV TEORETICKÉ FYZIKY A ASTROFYZIKY



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**KOSMICKÉ POČASÍ – VARIACE
IONOSFÉRY VLIVEM PROCESŮ
NA SLUNCI**

MARKÉTA ŠALOMOUNOVÁ

Vedoucí práce: Mgr. Zbyšek Mošna

BRNO 2011

Chtěla bych poděkovat zejména vedoucímu mé bakalářské práce, Mgr. Zbyškovi Mošnovi z Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR. Dále můj dík patří konzultantovi RNDr. Miloslavovi Zejdovi, Ph.D. a všem vyučujícím za ochotu a vstřícný přístup ke kombinované formě studia.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsala samostatně a výhradně s použitím uvedených pramenů podle pokynů vedoucího práce Mgr. Zbyška Mošny a konzultanta RNDr. Miloslava Zejdy, Ph.D. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne 20. 5. 2011

Markéta Šalomounová

Není-li to pravda, je to velmi dobře vymyšleno.

Giordano Bruno

V práci používám data získaná z ionosférické observatoře Průhonice Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR vybavené Digisondou DPS-4D. Dále používám data z NOAA's National Geophysical Data Center dostupná na webové adrese <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/home.do> a data z japonských ionosférických stanic dostupná na http://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html.

ANOTACE

Tato bakalářská práce se zabývá studiem ionosféry v závislosti na proměnlivé sluneční aktivitě. Teoretická část popisuje ionosféru, její dynamiku a variace, procesy v ní probíhající a studium stavu ionosféry pomocí pozemního ionosférického sondování. V praktické části je nejprve hodnocena korelace mezi stavem ionosféry a sluneční aktivitou v rámci jednoho slunečního cyklu. Dále je studována závislost kritické frekvence foF2 na geomagnetické šířce měřicí stanice a dále odezva na eejekci koronární hmoty Slunce na devíti stanicích pomocí parametrů foF2 a výšky hmF2.

KLÍČOVÁ SLOVA

ionosféra, sluneční cyklus, foF2, ionosférické sondování

ANNOTATION

This bachelor's thesis deals with the study of ionosphere in dependence on the variable solar activity. The theoretical part describes ionosphere, its dynamics and variations, processes running in it and the study of the state of ionosphere by means of the ground ionospheric probing. The practical part evaluates the correlation between the state of ionosphere and solar activity within one solar cycle. It also studies the dependence of the foF2 critical frequency on the geomagnetic latitude of a ionospheric station as well as a reaction to the coronal mass ejection of the sun at nine stations by means of foF2 and hmF2 parameters.

KEYWORDS

Ionosphere, solar cycle, foF2, ionospheric probing

OBSAH

1. Úvod	7
2. Atmosféra Země	9
3. Ionosféra a ionosférické procesy	10
3.1 Historie	10
3.2 Ionizační a rekombinační procesy	10
3.3 Fotoionizace v zemské atmosféře	13
3.4 Ionosférické zvrstvení	14
3.5 Pozemní ionosférické sondování	16
3.6 Dynamika ionosférického plazmatu	20
3.7 Geomagnetické indexy	21
4. Variabilita ionosféry	24
4.1 Ionosférické poruchy	24
4.2 Morfologie ionosférické bouře	25
4.3 Jevy nízkých šířek	25
4.4 Jevy středních šířek	25
4.5 Jevy vysokých šířek	26
4.6 Pravidelné variace ionosféry	27
5. Magnetosféra země a sluneční vítr	29
5.1 Magnetosféra Země	29
5.2 Sluneční vítr	31
5.3 Sluneční skvrny	32

5.4 Sluneční cykly	32
6. Vztah mezi ionosférickými parametry a sluneční aktivitou	33
6.1 Ionosférická data.....	33
6.2 Data popisující sluneční aktivitu a geomagnetickou aktivitu.....	33
6.3 Ionosféra v průběhu 11letého slunečního cyklu	34
6.4 Závislost foF2 na geomagnetické šířce	38
6.5 Ionosférická odezva v průběhu ionosférické bouře.....	43
7. Závěr.....	49
Použitá literatura.....	51
Zdroje obrázků.....	53

1. ÚVOD

Tato bakalářská práce se zaměřuje na zkoumání vztahu mezi sluneční aktivitou a stavem zemské ionosféry.

Naše nejbližší mateřská hvězda je nejen spolehlivým zdroje energie, ale také komplikovaným magnetohydrodynamickým systémem. Sluneční aktivita je spojena se změnami magnetického pole, jejichž důsledkem může být velké množství efektů ovlivňujících současná technická zařízení. Ionosféra je systém, který je se zemskou magnetosférou přímo svázán a v jejím chování hraje velmi významnou roli. Změnou magnetického pole a následnou indukci elektrického proudu může dojít zejména v zemích s vysokou geomagnetickou šířkou k závažným problémům, např. výpadkům dodávek v řádu hodin až dnů. Kromě selhání rozvodů elektřiny může silná sluneční erupce vyřadit z provozu v důsledku poškození či výpadku provozu i GPS přijímače, radary nebo mobilní telefony.

Ionosféra je důležitým prvkem ovlivňujícím šíření elektromagnetických signálů. To je zcela zásadní pro dálkové přenosy využívající ionosféru jako vrstvu odrážející signál. Velmi významným důvodem pro studium ionosférických procesů je ovšem i rozvoj globálních navigačních systémů (GNSS), jejichž funkce je ionosférickým chováním silně ovlivněna [e13]. Zpoždění signálu na dráze satelit – pozemní přijímač je dáno průběhem elektronové koncentrace na dané dráze. Pro popis ionosféry se používají standardně modely, které relativně dobře charakterizují chování ionosféry za poměrně klidných podmínek. V průběhu vysoké geomagnetické aktivity je však jejich použití omezené [e15] [e16]. Síť Galileo, u které je plánováno řádové zvýšení přesnosti oproti stávajícím GNSS, vyžaduje mimořádný ohled na ionosférickou aktivitu. Pokud chceme u tohoto a dalších navigačních systémů docílit přesnosti v řádu menším než jednotky dm, je pochopení variací ionosféry zcela nezbytné [10].

V teoretické části se zabývám ionizačními a rekombinačními procesy v ionosféře, klasifikací jednotlivých ionosférických vrstev a dále rozdělením na oblast vyšších, středních a nízkých šířek. Následuje popis běžně používaných slunečních a geomagnetických indexů, je vysvětlen princip pozemního ionosférického měření a věnuji se dynamice a variabilitě ionosféry.

V praktické části se nejprve zabývám korelací slunečního záření a ionosférického indexu f_oF2 na observatoři Průhonice v průběhu jednoho jedenáctiletého slunečního cyklu. Dále zkoumám závislost stavu ionosféry na geomagnetické šířce stanice. Závěr praktické části se týká vyhodnocení vlivu koronární ejetce sluneční hmoty ze dne 1.8.2010 na stav ionosféry na několika evropských stanicích.

Téma práce bylo zvoleno s ohledem na mé souběžné studium na Leteckém ústavu FSI VUT a diplomovou práci týkající se fúze inerciální navigace a GPS, která byla zadána firmou Honeywell. Ministerstvo dopravy ČR ve své koncepci letecké navigace předpokládá po roce 2015 využití GNSS nejen pro traťovou navigaci a navigaci na

konečné přiblížení, ale po roce 2015 i pro vedení letadel na pohybové ploše letišť. GNSS by měly postupně plně nahradit současná pozemní radionavigační zařízení [e18].

2. ATMOSFÉRA ZEMĚ

Zemskou atmosféru je možné dělit podle několika parametrů. Nejčastěji používaným kritériem je změna teploty v závislosti na výšce. Takto se atmosféra dělí na troposféru, stratosféru, mezosféru a termosféru. Pro troposféru je charakteristické ubývání teploty s výškou, naopak ve stratosféře je zpočátku teplota neměnná, poté s přibývajícím výškou roste. V mezosféře teplota s výškou opět klesá a v termosféře stoupá až na hodnoty přesahující 1000°C. Jiným kritériem dělení atmosféry je její chemické složení. Pro homosféru je typická velmi malá proměnlivost složení atmosféry v závislosti na výšce. Sahá přibližně do výšky 100 km. Na ni navazuje heterosféra, kde s přibývajícím výškou dochází k úbytku těžších plynů (molekulární plyny) a naopak nárůstu podílu atomárního kyslíku a výše helia a vodíku.

Další možné dělení je na barosféru a exosféru. Barosféra je vrstva atmosféry silně gravitačně vázaná k zemi, která sahá do výšky přibližně 420 km. Nad touto hranicí na ni navazuje exosféra, kde je hustota vzduchu už tak nízká, že dochází k úniku částic ze Země. Pro účel této práce používám zejména dělení atmosféry podle stupně ionizace (poměr mezi ionizovanou a neutrální složkou) na ionosféru a neutrosféru.

Neutrosféra sahá od zemského povrchu do výšky asi 60 km ve dne, 150 km v noci. Vzduch v této vrstvě není téměř vůbec ionizován a je tedy elektricky neutrální. Nad ní se nachází ionosféra, která je definována jako významně ionizovaná oblast atmosféry ovlivňující šíření elektromagnetických signálů [11]. Ionizace je způsobena slunečním a kosmickým zářením. Ionosféru je možné chápat i jako ionizovanou složku horní atmosféry¹ [12]. Tato oblast postupně přechází v meziplanetární prostor. Ionizovaná složka v oblasti uzavřených magnetických siločar se nazývá plazmasféra. Dosahuje do výšek tří až šesti zemských poloměrů, ve vyšších výškách je koncentrace iontů podstatně nižší. Tato oblast se nazývá plazmapauza.

¹To znamená, že kromě ionizované složky zde existuje i neutrální plynná složka. Koncentrace neutrálních částic je dokonce ve spodní a střední části ionosféry mnohem vyšší než koncentrace ionizovaných částic

3. IONOSFÉRA A IONOSFÉRICKÉ PROCESY

3.1 HISTORIE

Existence vodivé vrstvy v horní části zemské atmosféry byla předmětem spekulací Williama Thomsona, známějšího pod jménem Lord Kelvin. Vycházel mimo jiné z výzkumu Balfoura Stewarta týkajícího se variací zemského magnetického pole. Podstatnější zájem o tuto problematiku se objevil poté, co italský fyzik a vynálezce Guglielmo Marconi v prosinci 1901 předvedl první úspěšné transatlantické dlouhovlnné rádiové spojení. O rok později Arthur Kennelly a Oliver Heaviside nezávisle na sobě postulovali ionizovanou vrstvu v zemské atmosféře jako vysvětlení rádiového přenosu. První přibližné vysvětlení odrazu rádiových vln od ionizovaných vrstev podal Joseph Larmor v roce 1924. Přímý důkaz existence Kennedy-Heavisideovy vrstvy (dnes známé jako E vrstva) byl podán pomocí porovnávání signálů obdržených ze dvou typů přímých antén.

V průběhu dvacátých let 20. století byla popsána významná proměnlivost ionosféry se zeměpisnou šířkou. Ionosféra se podle tohoto hlediska dělí na tři základní regiony – ionosféru vyšších šířek, středních šířek a nízkých šířek. Relativně nejjednodušší oblastí, která se nejvíce blíží klasickému modelu ionosféry, je ionosféra středních šířek. Ionosféra vyšších šířek je protaženými aurorálními čarami magnetického pole přímo svázána s magnetosférickým ohonem. Ionosféra nízkých zeměpisných šířek je citlivá na nestability plazmatu a změny v prstencovém proudu magnetosféry.

3.2 IONIZAČNÍ A REKOMBINAČNÍ PROCESY

Ionosféra je významně ionizovaná část horní atmosféry. Je zde přítomno dostatečné množství ionizovaných částic a dochází zde k významnému ovlivňování šíření rádiových vln. K ionizaci přítomných plynů dochází zejména slunečním zářením, v menší míře pak kosmickým zářením.

V nižší oblasti atmosféry je poměr přítomných plynů konstantní díky turbulentnímu míšení (tato oblast se nazývá homosféra), ve vyšších oblastech (heterosféra) dochází ke gravitační separaci. Koncentrace těžkých plynů v heterosféře klesá s výškou rychleji než koncentrace lehkých plynů. Pro ionizační procesy (vznik iontů) je podstatným faktorem jednak intenzita slunečního záření v dané výšce a dále to, jaké plyny a v jaké koncentraci jsou v dané výšce přítomné. Zánik iontů se označuje jako rekombinace a tento proces je závislý na rychlostní konstantě² příslušných plynů a na jejich koncentraci.

² Konstanta úměrnosti v rovnici vyjadřující závislost rychlosti reakce na koncentraci látek vstupujících do reakce

V nižších výškách, kde je koncentrace plynů relativně vysoká, dochází k rychlé rekombinaci a v noci koncentrace nabitých částic rychle klesá a ionizované částice prakticky vymizí. Ve vyšších hladinách atmosféry je ale hustota plynů již nižší a doba života ionizovaných částic je proto podstatně delší. V ionosféře díky nerovnoměrnému rozložení koncentrace jednotlivých plynů a intenzity slunečního záření dochází ke tvorbě několika oblastí zvýšené koncentrace iontů. Tyto ionosférické vrstvy se z historických důvodů nazývají D, E a F. Vrstva F se přes den typicky v letních měsících rozděluje na vrstvy F1 a F2. Maximální koncentrace ionizovaných částic se obvykle nachází přibližně ve výšce 200 - 300 km nad zemským povrchem, v oblasti vrstvy F2. Převážná část ionizovaných částic v ionosféře vzniká ionizací ultrafialovým slunečním zářením. Proces ionizace je ovlivněn hodnotou zenitové vzdálenosti Slunce. S rostoucí zenitovou vzdáleností klesá ionizace a roste výška maximálně ionizované vrstvy.

Abychom o ionizovaném plynu v oblasti ionosféry mohli mluvit jako o plazmatu, musí splňovat následující definici:

Plazma je kvazineutrální plyn nabitých a neutrálních částic, který vykazuje kolektivní chování.

Zdaleka ne každý ionizovaný plyn je možné považovat za plazma³. Pro plazma jsou nutné následující předpoklady [13]:

- kvazineutralita
- kolektivní chování
- plazmová frekvence⁴ je vyšší než srážková frekvence

Při popisu procesů v plazmatu se interakce částice s látkou charakterizuje pomocí účinného průřezu. Účinným průřezem nazýváme konstantu přímé úměrnosti σ v následující rovnici:

$$dI = -N\sigma I dx, \quad (1)$$

kde dI je počet částic reagujících na rozměru dx , N koncentrace a I proud nalétávajících částic [m^2s^{-1}].

³ Jako příklad se často uvádí plamen svíčky, kde výskyt nabitých částic neznamena, že se jedná o plazma, protože částice nevykazují kolektivní chování a také kvůli vysoké srážkové frekvenci ionizovaných částic.

⁴ Vlastní frekvence kmitů elektronu – viz rov. 13

Řešením je rovnice

$$I = I_0 e^{-\sigma N x} \quad (2)$$

3.2.1. Ionizace, rekombinace a transport částic

- Ionizace



Molekula o dostatečně vysoké kinetické energii může ionizovat další molekulu. Nejpravděpodobněji k ionizaci molekulou dochází, pokud je jedna z molekul v excitovaném stavu.



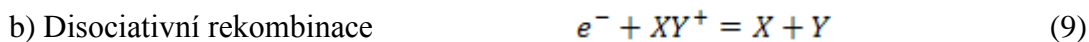
- tento typ ionizace je v ionosféře nejvýznamnější.

e) Termická ionizace

[e20]

- Rekombinace

Míra rekombinace, při níž zanikají ionizované částice, je závislá na chemickém složení atmosféry a na koncentraci částic. V nižších výškách v důsledku vyšší hustoty částic rekombinace probíhá rychleji.



[e8]

- Transport ionizovaných částic v elektromagnetickém poli

Transport ionizovaných částic je způsoben jednak interakcí s neutrálními částicemi (neutrální větry) a také driftovými pohyby (drifty způsobené elektrickým polem $E \times B$, gradientem magnetického pole, gravitačním polem atd.).

3.3 FOTOIONIZACE V ZEMSKÉ ATMOSFÉŘE

Výzkum Sydneyho Chapmana⁵ se zabýval fotoionizací v zemské atmosféře. Jeho výsledkem byl idealizovaný model distribuce ionizace s výškou. Výpočet elektronové koncentrace v závislosti na výšce byl zjednodušen několika předpoklady. Mezi ně patří např. exponenciální rozložení koncentrace plynů s konstantní škálovou výškou, neexistence gradientu koncentrace v horizontální rovině, lineární závislost absorpce slunečního záření na koncentraci plynu či to, že absorpční koeficient je konstantní.

Výsledná rovnice je odvozena např. v [16] či v [18] a má následující tvar

$$q = q_{m0} \exp(1 - z - \sec \chi \cdot e^{-z}), \quad (10)$$

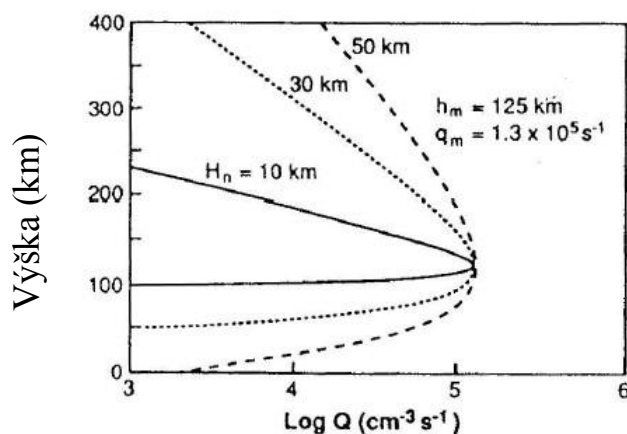
kde q je míra ionizace, z je redukovaná škálová výška pro neutrální plyn, $z = (h-h_{m0})/H$, kde H je škálová výška ($H=kT/mg$, kde k je Boltzmannova konstanta, T je teplota, m je molekulová hmotnost média a g je gravitační zrychlení). K je sluneční zenitová vzdálenost a q_{m0} je míra ionizace ve výšce maxima produkce h_{m0} , pro $\chi=0$ (slunce v zenitu).

Rovnice č. 10 se dá vyjádřit i jako

$$q/q_{m0} = e \cdot e^{-z} \cdot e^{(-\sec \chi \cdot \exp(-z))}, \quad (11)$$

kde první člen e je konstanta, druhý vyjadřuje výškovou změnu a třetí je úměrný intenzitě ionizujícího záření.

Chapmanova teorie poměrně dobře popisuje tvorbu vrstev E a F1 [3]. Na obrázku č.1 je znázorněna míra ionizace Q v závislosti na výšce. Maximum se nachází ve výšce 125 km a v tomto konkrétním případě mu odpovídá produkce 13 000 iontů v cm^3 za sekundu.

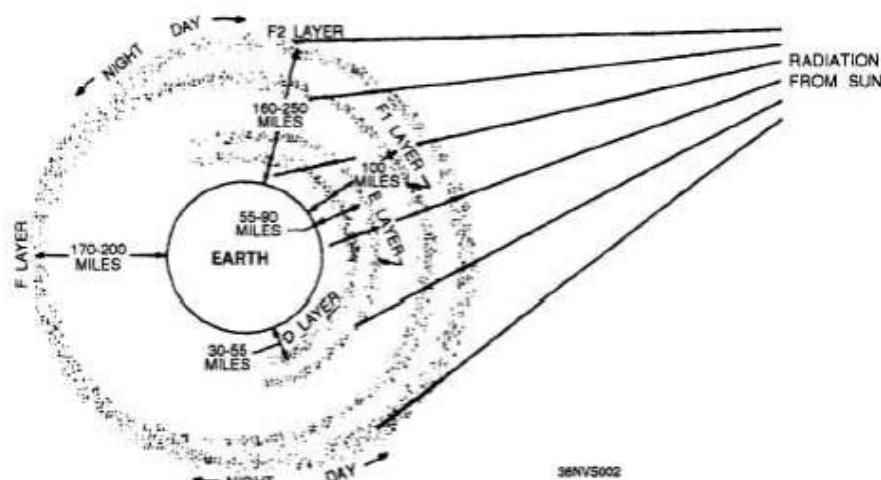


Obr. 1 Chapmanův model [o1]

⁵ Sydney Chapman(1888-1970) – britský matematik, geofyzik a výzkumník magnetických bouří

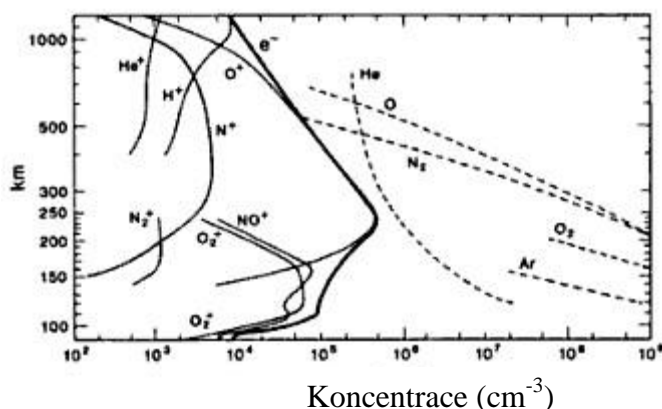
3.4 IONOSFÉRICKÉ ZVRSTVENÍ

Množství sluneční energie ve střední vzdálenosti Slunce od Země procházející plochou jednoho metru čtverečního se nazývá sluneční konstanta a činí přibližně 1370 W/m^2 . Tento tok sluneční energie se určuje fotometricky, tj. v celém rozsahu spektra. Sluneční záření



Obr. 2 Ionosférické vrstvy [o2]

o vlnových délkách odpovídajících ultrafialovému záření (10 – 400 nm) a kratších je schopné ionizovat molekuly nebo atomy přítomného plynu. Část energie slunečního záření je tedy pohlcena atomem či molekulou a dojde ke vzniku iontu a volného elektronu. V tomto procesu mohou hrát roli i kosmické záření a sluneční vítr, zásadní je ale vliv slunečního záření. Kombinace proměnlivé koncentrace jednotlivých plynů a různé intenzity slunečního záření spolu s rekombinačními procesy jsou příčinou ionosférického zvrstvení.



Obr. 3 Koncentrace jednotlivých plynů v závislosti na výšce [o3]

3.4.1 D vrstva

D vrstva je vrstvou nejbližší zemskému povrchu. Nachází se ve výškách zhruba 50 až 90 km. Je pro ni typická přítomnost záporných iontů (O_2^-) a tzv. klastrů (např. ionty H_3O^+ , H_5O_2^+ , H_7O_3^+ atd.). Vznik pozitivních iontů zde probíhá zejména díky vodíkovému záření

na vlnové délce 121,5 nm, které ionizuje oxid dusný NO (Lymanovo α záření). V případě silné sluneční aktivity tvrdé rentgenové záření (vlnová délka je kratší než 1 nm) ionizuje molekuly N_2 a O_2 . Množství ultrafialového záření pronikajícího do takových hloubek atmosféry už je poměrně nízké, což je příčinou nízké úrovně ionizace D vrstvy ($1-10^4$ iontů v cm^{-3}).

D vrstva má velký význam pro přenos rádiového záření. Vzhledem k nízké úrovni ionizace D vrstva neodráží vysokofrekvenční rádiové vlny (zejména frekvence okolo 10 MHz). Absorpce rádiových vln je nejnižší v noci a nejvyšší okolo poledne. Po soumraku D vrstva díky absenci slunečního záření téměř zaniká, zůstává jen malá část způsobená ionizací kosmickým zářením.

Stupeň ionizace (poměr nabitých a neutrálních částic) v D vrstvě výrazně narůstá během slunečních erupcí, zejména ve vyšších zeměpisných šířkách, tj. polárních oblastech. Slunce vypouští oblaka velmi rychlých protonů, které pronikají do zemské magnetosféry v oblasti zemských magnetických pólů. Sluneční protony s energiemi až 10 MeV zásadně zvyšují míru ionizace zejména ve vrstvách D a E. Tyto sluneční erupce vyvolávají jev nazývaný PCA (Polar Cap Absorption - absorpce vln v oblasti pólů).

Krátké rádiové vlny jsou pohlcovány zvýšeným počtem ionizovaných částic v nižších vrstvách ionosféry, což může způsobit krátkodobý výpadek rádiového spojení. Tyto události trvají většinou od 24 do 48 hodin.

3.4.2 E vrstva

E vrstva se nachází ve výškách přibližně 90 až 120 km nad zemským povrchem⁹. Molekuly O_2 jsou ionizovány měkkým rentgenovým zářením (vlnová délka 1 – 10 nm) a ultrafialovým zářením o kratších vlnových délkách (EUV). Dalšími ionty jsou zde NO^+ a O_2^+ . Tato vrstva obvykle odráží rádiové vlny do frekvence 10 MHz. E vrstvu je možné poměrně přesně aproximovat Chapmanovým modelem [4].

3.4.3 Sporadická E vrstva

Tato velmi tenká vrstva (jednotky km), označovaná jako Es vrstva, vzniká zejména ve středních zeměpisných šířkách. Nejčastěji se objevuje ve formě malých oblaků v letních měsících nebo v období od poloviny prosince do poloviny dubna. Její vznik je zapříčiněn dynamickými procesy v atmosféře (zejména stříhem větru), které způsobí místní zvýšení hustoty volných elektronů. Tvoří se náhle a její délka trvání se pohybuje v řádu minut až hodin.

Vznik Es vrstvy nezávisí jednoznačně na sluneční aktivitě. Malá oblaka intenzivní ionizace významně podporují odrazivost rádiových signálů o frekvencích až desítek či

9 Údaje o výšce se liší, někdy se udává 100 – 160 km.

stovek MHz. Maximální koncentrace iontů v Es vrstvě může být vyšší než ve vrstvách, které leží výše a částečně nebo úplně tak znemožňuje pozemní ionosférické sondování.

3.4.4 F vrstva

Spodní hranice F vrstvy se obvykle pohybuje mezi 120 a 400 km nad zemským povrchem. Jedná se o nejvyšší vrstvu ionosféry, kde dochází k ionizaci přítomných atomů (v oblasti jsou významně zastoupeny ionty O^+) slunečním ultrafialovým zářením o vlnových délkách 10-100 nm. Ve vyšších výškách se zvyšuje podíl lehkých plynů He a H a ionosféra přechází bez ostré hranice do plazmasféry. Koncentrace elektronů ve vrstvě F je silně závislá na fázi slunečního cyklu a na denní a roční době.

F vrstva se za přítomnosti slunečního záření v letních měsících (ve dne) rozpadá do dvou vrstev – F1 a F2.

- F1 vrstva

Během dne se F1 vrstva vytváří mezi 150 a 250 km nad zemským povrchem. Vzniká obvykle v létě. Převažujícími ionty jsou O_2^+ , NO^+ a O^+ . Maximum elektronové hustoty se pohybuje ve výšce okolo 170 km. Tato výška odpovídá hladině fotony o vlnových délkách 17-91 nm. V noci vrstva F1 mizí.

- F2 vrstva

Vrstva F2 se nachází nad vrstvou F1 a obvykle vykazuje maximální hodnoty ionizace. Projevuje se u ní anomální jev rychlého nárůstu koncentrace elektronů po východu slunce oproti velmi mírnému poklesu po západu slunce.

Hodnoty koncentrace volných elektronů dosahují hodnot $10^5 - 10^6 \text{ e}^-/\text{cm}^3$. Z důvodů maximální koncentrace volných elektronů je vrstva F velmi důležitá pro rádiový přenos.

Nad maximem vrstvy F2 se nachází topside ionosféra. Její horní hranice se nachází ve výšce, kde je koncentrace O^+ nižší než koncentrace H^+ a He^+ . Ve dne se tato hranice pohybuje okolo výšky 800 km a v noci okolo 500 km [e1].

3.5 POZEMNÍ IONOSFÉRICKÉ SONDOVÁNÍ

Informace získaná pozemním sondováním ionosféry je údaj o elektronové koncentraci v dané výšce, případně i další informace o pohybu vrstev. Tyto údaje mohou být změřeny vertikálním sondováním pomocí zařízení zvaného ionosonda, která pracuje na podobném principu jako klasický radar. Principem měření je vysílání elektromagnetického signálu směrem vzhůru a měření času návratu signálu, či v případě pokročilejšího systému i měření Dopplerova posuvu. Ionosonda je tvořena vysílací anténou a jednou nebo více přijímacími anténami.

Vyslaný elektromagnetický signál o frekvenci řádově jednotek MHz (obvykle 1-20 MHz) se pohybuje směrem vzhůru. Elektromagnetický signál se v prostředí, jehož plazmová frekvence je nižší než frekvence signálu (vztah mezi plazmovou frekvencí

a elektronovou koncentrací je popsán v rov. 13 a 14), pohybuje po své dráze rychlostí, která je funkcí frekvence signálu a plazmové frekvence prostředí. V místě, kde se obě frekvence rovnají, dochází k odrazu. Systém přijímacích antén přijme odražený pulz a z časového zpoždění návratu je určena tzv. virtuální výška, ve které došlo k odrazu. Maximální frekvence signálu, která se ještě od dané vrstvy odrazí, se nazývá kritická frekvence. Signály s vyšší frekvencí vrstvou procházejí [5]. Virtuální výška je počítána následujícím vztahem

$$h' = \frac{1}{2} t_m v_c, \quad (12)$$

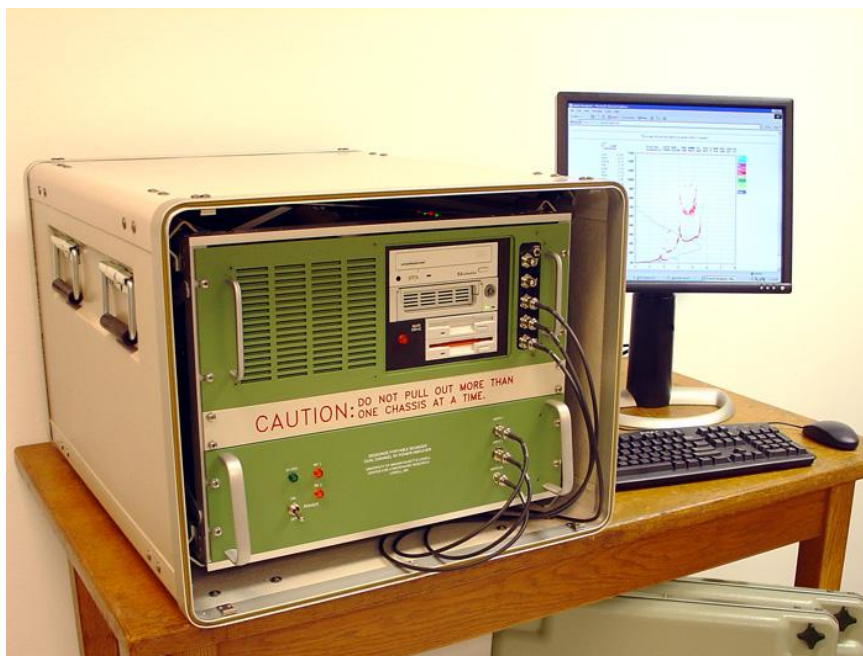
kde h' je virtuální výška, t_m je změřená doba mezi vysláním a příjmem signálu a v_c je rychlost světla ve vakuu. Pro určení skutečné výšky je nutné započítat zpomalení elektromagnetického signálu v ionizovaném prostředí. V průhonické digisondě se pro výpočet závislosti elektronové koncentrace na výšce (profil elektronové koncentrace) používá přepočítávací algoritmus NHPC [6].

Grafický výstup ionosondáže se nazývá ionogram a zachycuje závislost plazmové frekvence na výšce. Virtuální výšky jednotlivých vrstev získané z ionogramu se značí jako $h'E$, $h'Es$, $h'F1$, $h'F2$ (dle konkrétní vrstvy), hodnoty kritických frekvencí se označují foE , $foEs$, $foF1$, $foF2$. V ČR se ionosondáž provádí na observatoři Průhonice pomocí digitální ionosondy (digisonda DPS-4D, <http://147.231.47.3/>). Frekvence snímání ionosondou je zde obvykle 15 minut, ale může být pro speciální účely (například studium atmosférických gravitačních vln) zvýšena na kadenci až 20 s [17].

Tato stanice využívá dva fyzikální principy, první je měření času mezi vysláním elektromagnetického signálu a jeho návratem po odrazu od ionosférických vrstev, druhý využívá Dopplerův posuv odraženého signálu. Výsledkem metody využívající měření času návratu je ionogram (viz kapitola 3). Ten je následně zpracován softwarem ARTIST (Automatic Realtime Ionogram Scaler with True Height), což je rozšířený nástroj automatického vyhodnocení ionogramu. Zahrnuje jak vlastní rozpoznávání zobrazeného záznamu - odrazů od jednotlivých vrstev tak výpočet profilu elektronové koncentrace.

Výstupem z programu ARTIST je textový soubor obsahující informace o odrazech z vrstev a ionosférické charakteristiky (kritické frekvence, výšky vrstev, profil elektronové koncentrace atd.), který je uložen ve formátu .sao¹⁰. V případě ionosférické bouře charakterizované prudkými změnami v ionosféře je nutná manuální kontrola (ruční vyhodnocení) naměřených ionogramů a výpočet profilů provést z takto opravených ionogramů. [8].

¹⁰ Zkratka formátu sao znamená Standard Archiving Output. V současnosti jsou poslední verzi formátu verze 4.3 (SAO) a 5.0 (SAOXML) [e13].



Obr. 4 Digisonda DPS-4 [o4]

Rozdíl mezi frekvencí vyslaného a přijatého signálu v důsledku Dopplerova posunu slouží k popisu okamžité rychlosti jednotlivých vrstev. Driftové měření je schopné popsat vertikální i horizontální pohyby jednotlivých vrstev.

Vnější síla působící na plazma způsobí rozkmitání elektronů kolem podstatně těžších iontů. Frekvence tohoto kmitání je závislá především na koncentraci elektronů v plazmatu a nazývá se plazmová frekvence [e2]. Elektromagnetické vlny s nižší frekvencí se v plazmatu nemohou šířit a jsou odraženy zpět.

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e^2 n_0}{\epsilon_0 m_e}}, \quad (13)$$

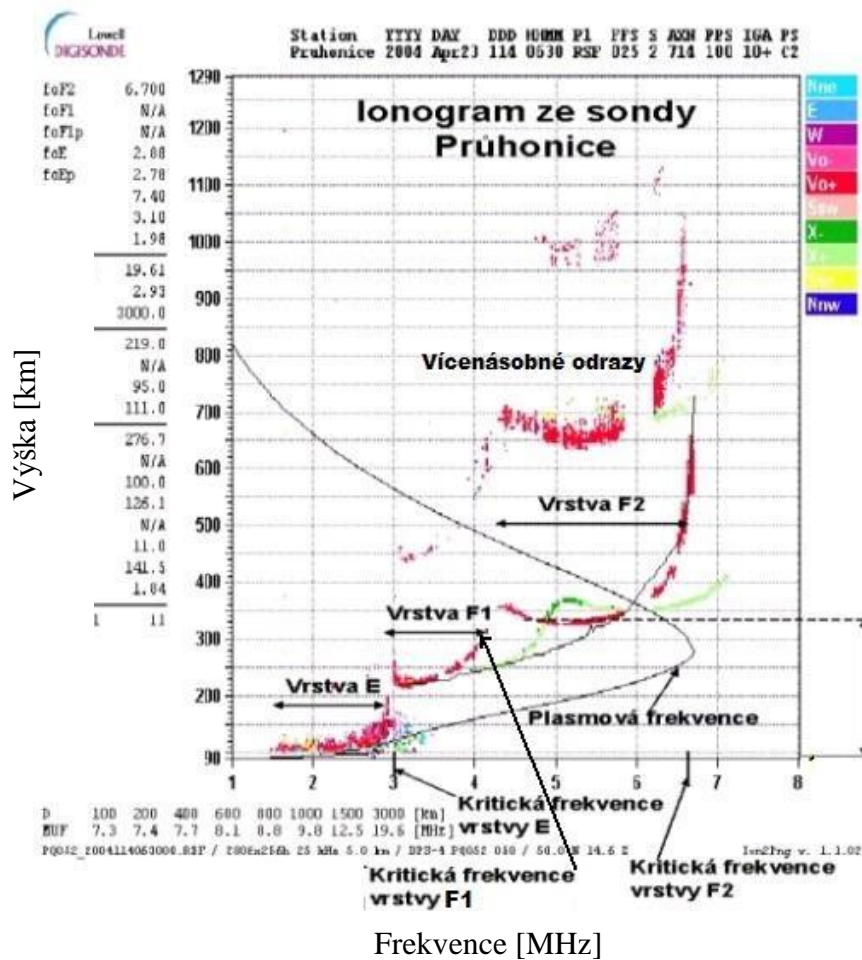
kde ω_p je plazmová frekvence, e je elementární náboj, n_0 koncentrace elektronů v m^3 , ϵ_0 je permitivita vakua a m_e je hmotnost elektronu.

Empirický vztah mezi plazmovou frekvencí f_{pe} v Hz a elektronovou hustotou n_e v cm^{-3} :

$$f_{pe} \approx 8980 \sqrt{n_e} \quad (14)$$

Kritická frekvence je maximální hodnota odražené frekvence. S určitým zjednodušením (předpokládáme, že frekvence následujících pulzů se zvyšuje o velmi malou hodnotu) se tedy jedná o maximální plazmovou frekvenci v dané vrstvě. Je to jeden ze základních parametrů pro studium chování ionosféry. Pro střední šířky jsou obvyklé hodnoty kritických frekvencí okolo 3 - 3,5 MHz v E vrstvě a v rozmezí 4-12 MHz v F2 vrstvě. Hodnoty kritických frekvencí jsou závislé na sluneční aktivitě a na denní a roční době, geomagnetické aktivitě a dalších faktorech.

3.5.1 Ionogram



Obr. 5 Ukázka ionogramu z observatoře Pruhonice [o5]

Ionogramem nazýváme frekvenčně – výškovou charakteristiku ionosféry. V ionogramu je každá ionosférická vrstva reprezentovaná přibližně hladkou křivkou, oddělenou od sousední vrstvy asymptotou na hodnotě kritické frekvence. Vzestupný zakřivený začátek křivky každé vrstvy je způsoben pomalejším šířením vlny o této frekvenci než vlny o vyšších frekvencích. Výška jednotlivých vrstev se určuje jako nejnižší hodnota na ose y v dané části grafu.

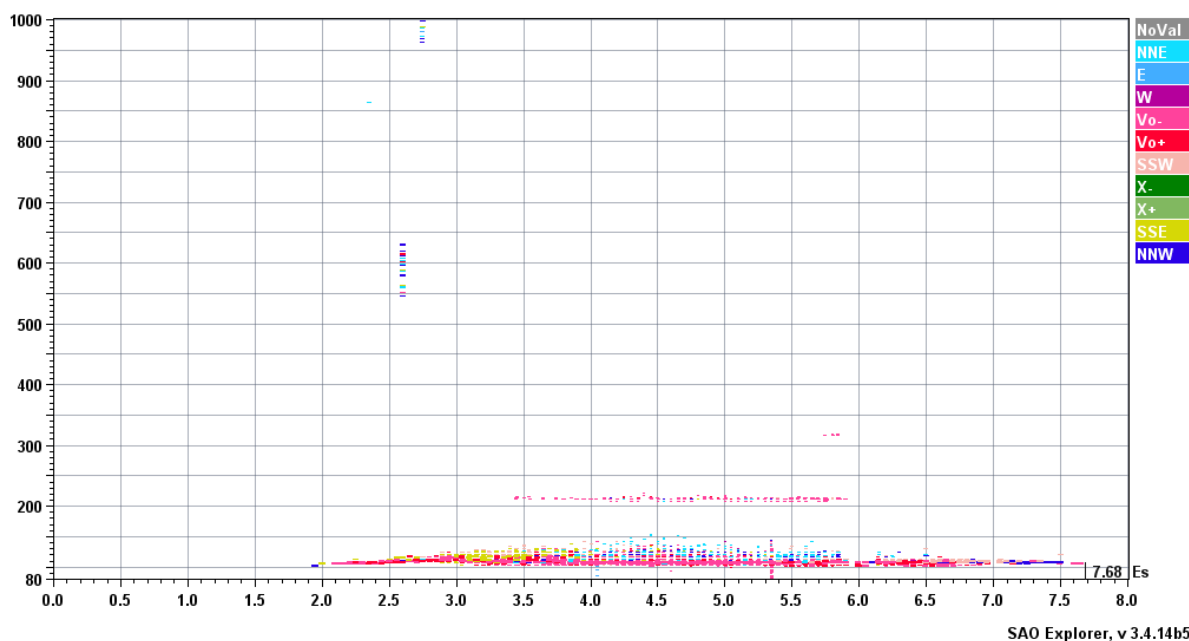
Hodnota foF2 je většinou maximem pro celou ionosféru (kromě občasného výskytu Es vrstvy s vyšší hodnotou foEs může výjimečně být vyšší hodnotou i kritická frekvence foF1). Je měřitelná v průběhu celého dne a sledovaná od samých počátků ionosondáže. Další používanou veličinou je hmF2, výška maxima elektronové koncentrace vrstvy F2 spočítaná z modelu ionosféry. Kromě hmF2 popisuje výšku vrstvy F2 také index h'F2. Tato výška se přímo odečítá z ionogramu a označuje se jako výška virtuální. Nevýhodou použití h'F2 je ovlivnění této hodnoty stavem nižší ionosféry (zpomalení elektromagnetického signálu v E či F1 vrstvě) [7].

Na obrázku č.5 jsou vidět křivky jednotlivých vrstev nacházející se ve trojnásobné šířce. Tento jev je způsoben několikanásobným odrazem vlny. Ionizace v D vrstvě někdy

způsobí jev, kdy nedojde k odrazu vyslané vlny zpět na zem. V oblasti nízkých frekvencí pak nejsou zachyceny žádné odrazy. Pokud se v ionogramu vyskytuje sporadická E vrstva (Es), je reprezentována úzkou linií ve výšce asi 90-130 km. Intenzivní vrstva Es může zabránit proniknutí vyslané vlny k vyšším vrstvám. Tento jev se nazývá blanketing.

Pruhonice, PQ052

2010.07.30 (211) 11:30:00 _IE



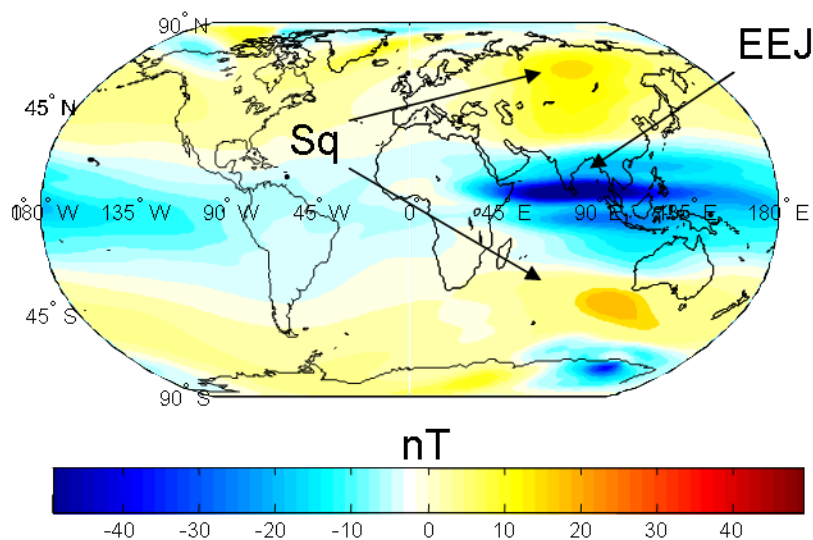
Obr. 6 Průhonice, 30.7.2010, 11:30. Blanketing. Sporadická E vrstva ve výšce 100 km kompletně zabraňuje průniku sondovacího signálu do vyšších výšek až do frekvence 7,7 MHz

3.6 DYNAMIKA IONOSFÉRICKÉHO PLAZMATU

Složení ionosférického plazmatu je dáno především složením neutrální atmosféry. Koncentrace jednotlivých plynů je silně závislá na teplotě. Např. atmosférický atomární vodík je při termosférických teplotách pouze slabě gravitačně vázán. Teplota významně zvyšuje jeho únik do kosmického prostoru. V menší míře totéž platí pro atomy helia.

Hustota plazmatu je silně proměnná v průběhu dne a noci. V nízkých a středních zeměpisných šířkách na denní straně Země neutrální vítr termosféry žene vodivé plazma z ionosféry napříč zemskými magnetickými čarami. Vzniklé atmosférické dynamo generuje tzv. klidné proudy (S_q , z anglického Solar quiet). Klidný proud je ionosférický proud vyvolaný pravidelným zvýšením teploty v ionosféře na denní straně Země a snížením teploty na straně noční. V době zvýšené sluneční aktivity se vyskytují tzv. poruchové proudy (Dst , z anglického Disturbed). Poruchové proudy přehlušují klidné proudy a jsou tvořeny nabitými částicemi pocházejícími ze slunečního větru. Tyto částice

byly zachyceny geomagnetickým polem a koncentrují se do prstencového proudu v oblasti rovníku nacházejícího se ve vzdálenosti zhruba pět zemských poloměrů od středu Země.



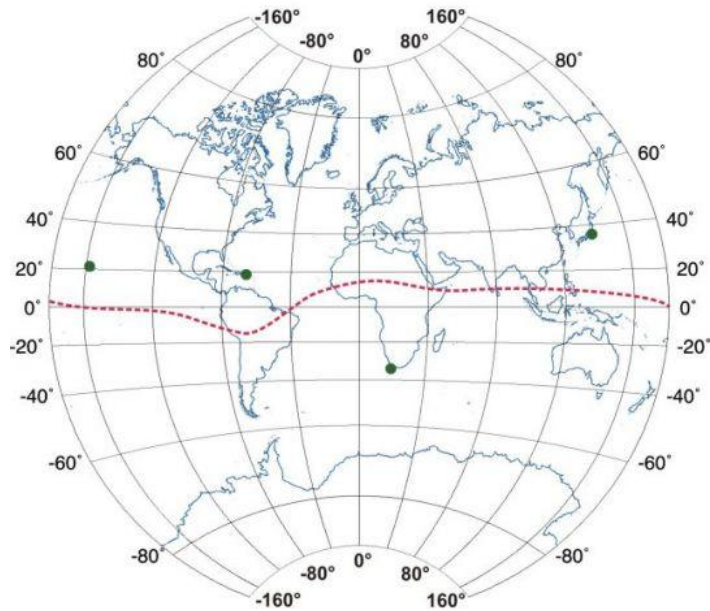
Obr. 7 Klidné proudy [o7]

V průběhu geomagnetických bouří dochází v řádu několika hodin k prudkému nárůstu tohoto prstencového proudu, což je na geomagnetických stanicích měřeno jako pokles indexu Dst.

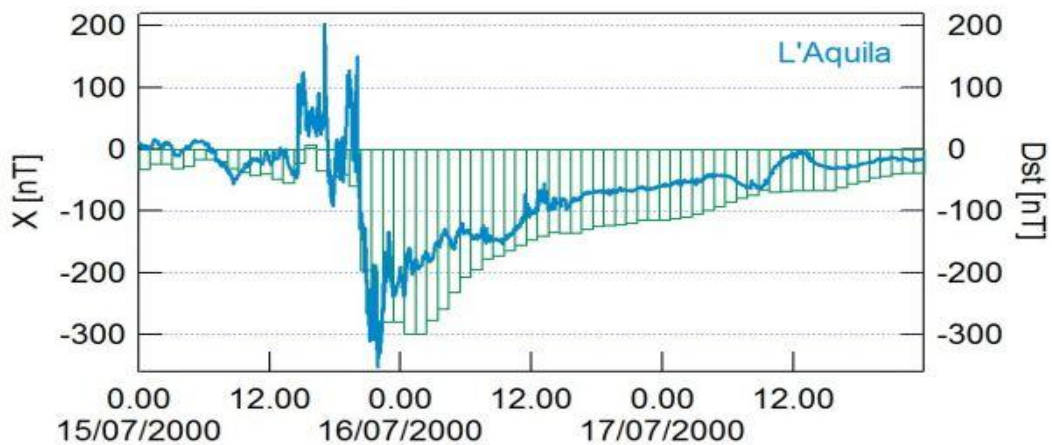
3.7 GEOMAGNETICKÉ INDEXY

Geomagnetická aktivita významně ovlivňuje stav ionosféry. Pro její popis se používá několik skupin geomagnetických indexů rozlišených podle místa, kde jsou umístěny měřící stanice. Oblast nízkých zeměpisných šířek je pokryta stanicemi, které měří Dst index, aktivita ve středních zeměpisných šířkách je monitorována stanicemi, které zaznamenávají K index a indexy z něj odvozené, aktivita v okolí aurorálního oválu se popisuje indexem AE.

Dst index je spojen s velikostí prstencového proudu, který vzniká v rovině magnetického rovníku a používá se pro určení intenzity magnetické bouře. Hodnota Dst indexu se získává jako průměrná hodnota horizontální složky geomagnetického pole na několika místech Země v blízkosti rovníku (prakticky to jsou čtyři měřící stanice s hodinovým rozlišením). Použití Dst indexu jako míry intenzity bouře umožňuje skutečnost, že intenzita magnetického pole v nízkých zeměpisných šířkách je závislá na energii prstencového proudu, která významně narůstá při magnetických bouřích. Dst index se udává v jednotkách nT a typické hodnoty se pohybují v záporných stovkách nT. V případě klasické magnetické bouře Dst index vykazuje z počátku prudký nárůst, poté prudký pokles a poté se vrací zvolna zpět k nulovým hodnotám.



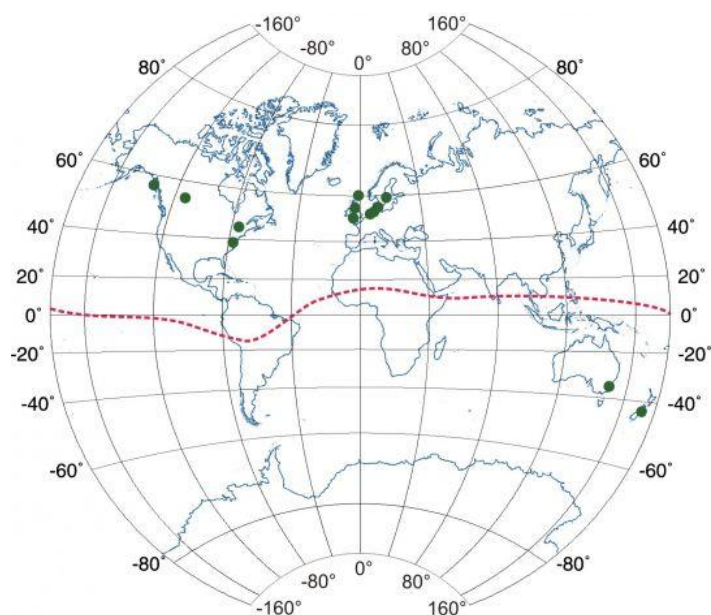
Obr. 8 Geomagnetické observatoře používané k určení Dst indexu [o8]



Obr. 9 Průběh Dst indexu (zeleně) a horizontální složky vektoru magnetického indukce na stanici L'Aquila (Itálie) (modře) [o9]

Indexy, které se používají pro popis geomagnetické aktivity středních šířek, jsou K, Kp a Ap indexy. Jedná se o bezrozměrné veličiny, které popisují odchylku aktuální hodnoty horizontální složky magnetického pole od dlouhodobé hodnoty. Třináct stanic umístěných ve středních geomagnetických šířkách zaznamenává K index, což je kvazilogaritmická škála se stupni 0-9 s rozlišením 1/3 stupně. Definice je následující: od 0–1 (klidná situace), 2 (méně klidná situace) až po 8–9 (velmi silná bouře). Použita je nejvyšší hodnota ze tříhodinového intervalu a z těchto třinácti hodnot je váženým průměrem vypočítán index Kp (z německého Planetarische Kennziffer, někdy nazývaný planetární index). Kp index je stejně jako K index kvazilogaritmický. Časové rozlišení je jeden údaj za tři hodiny. Pro lepší práci s daty se z Kp indexu odvozuje linearizovaný

parametr, tzv. Ap index. Jeho hodnotu denně zveřejňuje německý GeoForschungsZentrum Potsdam Adolf-Schmidt-Observatory for Geomagnetism.



Obr. 10 Geomagnetické observatoře používané k určení Kp indexu [o10]

Index AE (Auroral Electrojet) určuje geomagnetickou aktivitu aurorální oblasti severní hemisféry. Na každé stanici je měřena horizontální složka magnetického pole H. Po normalizaci hodnot odečtením pěti nejklidnějších dnů daného měsíce se záznamy z měřících stanic naskládají přes sebe a vypočte se rozdíl mezi horní (AU) a dolní obálkou (AL) vztahem $AE=AU-AL$. Časové rozlišení indexu AE je jedna minuta.

4. VARIABILITA IONOSFÉRY

V kapitole 3 byl popsán idealizovaný model ionosféry. Ve skutečnosti ionosféra zřídka odpovídá tomuto modelu a vykazuje nejrůznější variace. Některé z nich nastávají pravidelně a jsou dobře popsatelné. Souvisí například se střídáním dne a noci, ročních období a atmosférickými slapy¹¹. Typickým příkladem je například zánik D vrstvy a rozdílu mezi regionem F1 a F2 v noci, noční snížení maximální elektronové hustoty v regionech E a F2, vyšší úroveň ionizace E a F1 regionu v létě než v zimě a naopak nižší úroveň ionizace F2 regionu v létě (tzv. zimní anomálie). Existuje vztah mezi mírou sluneční aktivity a elektronovou hustotou. V období minima slunečních skvrn jsou například elektronové hustoty v regionu F asi dvakrát až čtyřikrát nižší než v období maxima.

4.1 IONOSFÉRICKÉ PORUCHY

Terminologie týkající se odezvy na silnou sluneční aktivitu není zcela jednotná. Podle [12] se obecným termínem geosférická porucha označuje podstatné zesílení intenzity slunečního větru v okolí Země. Podle prostředí, kde je odezva studována, se pak rozlišuje magnetická bouře, termosférická bouře, aurorální bouře či ionosférická bouře. Dále tedy používám termín ionosférická bouře.

Náhlé ionosférické poruchy (SID – Sudden Ionospheric Disturbances) se projevují prudkým zeslabením či vymizením dálkového rádiového spojení na denní straně Země. Tento výpadek v pásmu krátkých vln (Short-wave fadeout) je zapříčiněn podstatným nárůstem elektronové hustoty ve vrstvách D a spodní E. Nárůst elektronové hustoty je způsoben pronikáním slunečních rentgenových paprsků do těchto nižších vrstev. Vysokofrekvenční rádiové vlny, které normálně procházejí D vrstvou, jsou namísto toho pohlcovány. Tyto poruchy trvají většinou přibližně jednu hodinu [18].

Ionosférické bouře jsou obecně charakterizovány pozvolnějším nástupem a delší dobou trvání než SID. Mohou trvat i několik dní. Mezi obzvláště zajímavé typy ionosférických bouří patří PCA (Polar Cap Absorption) a geomagneticky indukované bouře. Jev nazývaný PCA je možno pozorovat pouze v oblastech vysokých zeměpisných šířek. Je doprovázen výpadky telekomunikačních sítí způsobených nárůstem elektronové hustoty ve výšce 55-90 km. Tento nárůst je způsoben protony o vysokých energiích (> 10 MeV) ze slunečních vzplanutí¹².

11 Periodické kolísání tlaku způsobené zejména gravitačními účinky Měsíce a Slunce.

12 Solar flare – náhle rozšíření projasnění, které se běžně nachází okolo slunečních skvrn, i na desítky tisíc km

Druhým typem ionosférické bouře je geomagneticky indukovaná bouře. Je také spojena se vzrůstající hodnotou elektronové hustoty v nižší ionosféře. Bouře začínají asi 20 hodin po slunečním vzplanutí a mohou trvat stejně dlouhou dobu po ukončení geomagnetické poruchy. Na rozdíl od PCA jsou intenzivnější v noci [18].

4.2 MORFOLOGIE IONOSFÉRICKÉ BOUŘE

Během geosférické poruchy proniká do oblasti aurorálního oválu významné množství energie. Přibližně třetina této energie je tvořena srážkami částic. Zbytek tvoří tepelná energie způsobená proudy spojenému s bouří. Tato energie pronikající do oblasti přechodu mezi homosférou a heterosférou ve výšce asi 105 km ovlivňuje chemické složení termosféry. Bubliny molekulárního dusíku a kyslíku pronikají vzhůru do oblasti F vrstvy a snižují dostupné množství atomárního kyslíku, který je hlavním zdrojem fotoelektronů. Molekulární dusík a kyslík dále urychlují rekombinační procesy a dochází ke snížení elektronové hustoty. Působením neutrálního větru se tyto jevy přenášejí do nižších zeměpisných šířek (v letním období a v noci) nebo do vyšších zeměpisných šířek (v zimním období a ve dne) [18].

Rozlišují se tři fáze – počáteční, hlavní a fáze zotavení. Ionosférické bouře se jedna od druhé výrazně liší – počátek bouře může být velmi prudký nebo naopak pozvolný.

4.3 JEVY NÍZKÝCH ŠÍŘEK

V rovníkové oblasti existuje výrazná horizontální složka zemského magnetického pole. Tato geometrie vede ke vzniku proudu známého pod názvem „equatorial electrojet“. Jedná se o úzký pás východního proudění na denní straně zemské ionosféry. Existuje i západní proudění na noční straně, vzhledem k nízkým elektronovým koncentracím je ale téměř nedetekovatelné. Elektrické pole spojené s tímto prouděním způsobuje přenos plazmatu [18].

Plazma se dostává přes den do vyšších výšek a západním směrem a přes noc do nižších výšek a východním směrem. Denní pohyb přesouvá plazma do vyšších výšek, kde je rekombinace pomalá. Následná difuze způsobená gravitací a tvarem magnetického pole přidává toto plazma k plazmatu, které vzniká ve vyšších zeměpisných šířkách. Výsledkem tohoto pohybu plazmatu jsou maximální hodnoty ionizace v subtropických oblastech na obou stranách od magnetického rovníku¹³. Tento jev se nazývá fontánový efekt [13].

4.4 JEVY STŘEDNÍCH ŠÍŘEK

Oblast středních zeměpisných šířek se nachází mimo přímý vliv horizontálního magnetického pole spojeného s rovníkovou oblastí. Zároveň ji přímo neovlivňují energetické částice ani silná elektrická pole spojená s polárními oblastmi.

13 Poloha maxima ionizace často není symetrická okolo magnetického rovníku z důvodu interakce s neutrálním větrem

F vrstva středních zeměpisných šířek je všeobecně považována za nejvíce prozkoumanou část ionosféry [15]. Maximální elektronové koncentrace se vyskytují ve výšce, kde sestupná difuze a zánik elektronů rekombinací mají srovnatelnou intenzitu. V této výšce je elektronová koncentrace blízká hodnotě fotochemické rovnováhy, s rovnováhou mezi fotoionizací atomárního kyslíku a rekombinací elektronů molekulárními ionty.

V ideálním případě by elektronová hustota v F2 vrstvě měla v noci rovnoměrně klesat až do východu slunce, kdy se začne zvyšovat. Reálně se vyskytují období, kdy nenastává žádný noční pokles. V některém z těchto případů dochází k pohybu plazmatu směrem k rovníku podél magnetických siločar. Protože se siločary směrem od pólů vzdalují od povrchu země, dochází i ke stoupání plazmatu. To zvyšuje maximum výšky F2 v okamžiku západu slunce na úroveň, kde molekulové koncentrace a tím i rekombinace jsou o řád nižší než v průběhu dne. Všeobecně se dá říci, že atmosférický vítr vyskytující v F regionu má tendenci vát ve směru od horkého denního solárního k chladnému nočnímu antisolárnímu bodu [18].

F vrstva také vykazuje významné změny závislé na slunečním cyklu. Plazmová frekvence stabilně stoupá až do hodnoty počtu slunečních skvrn okolo 150. Při vyšší úrovni sluneční aktivity se již dále nezvyšuje. Počet slunečních skvrn nemá přímou souvislost s elektronovou hustotou F vrstvy. Hodnota počtu slunečních skvrn se používá jako vhodný index reprezentující míru sluneční aktivity. Nejčastěji používaný index F10.7 (vyjadřující intenzitu slunečního radiového záření o vlnové délce 10,7 cm) neodpovídá vždy úrovni ionizace v daný čas, proto je interpretace korelace vztahu F10.7 indexu či počtu slunečních skvrn a ionosférické odezvy vždy obtížná [4].

4.5 JEVY VYSOKÝCH ŠÍŘEK

V oblastech nízkých a středních zeměpisných šířek je hlavním zdrojem ionizace E a F vrstvy sluneční EUV¹⁴ záření. Denní variace ionosféry v podstatě odrážejí změny v neutrální atmosféře, zejména v její hustotě a rychlosti proudění. V oblastech vyšších zeměpisných šířek je naopak dominantní silou ionosférických změn magnetosféricko – ionosférická interakce. Ionosféra vyšších zeměpisných šířek se nedá popsat jako jednoduchý příjemce zdrojů energie [18].

Změny v tepelné vodivosti ionosféry mohou poskytovat aktivní zpětnou proudovou vazbu podél středu magnetického ohonu [4].

Silná elektrická pole, která jsou důsledkem interakce interplanetárního magnetického pole a zemského magnetického pole, vedou k dvojitému pohybu iontů – proud iontů směrem od Slunce a zpětný proud podél aurorálního oválu. Ve výškách příslušejících E vrstvě je iontová konvekce zmírněna kolizemi s neutrálními atomy.

¹⁴ Extrémní ultrafialové záření má vlnovou délku 1-31 nm

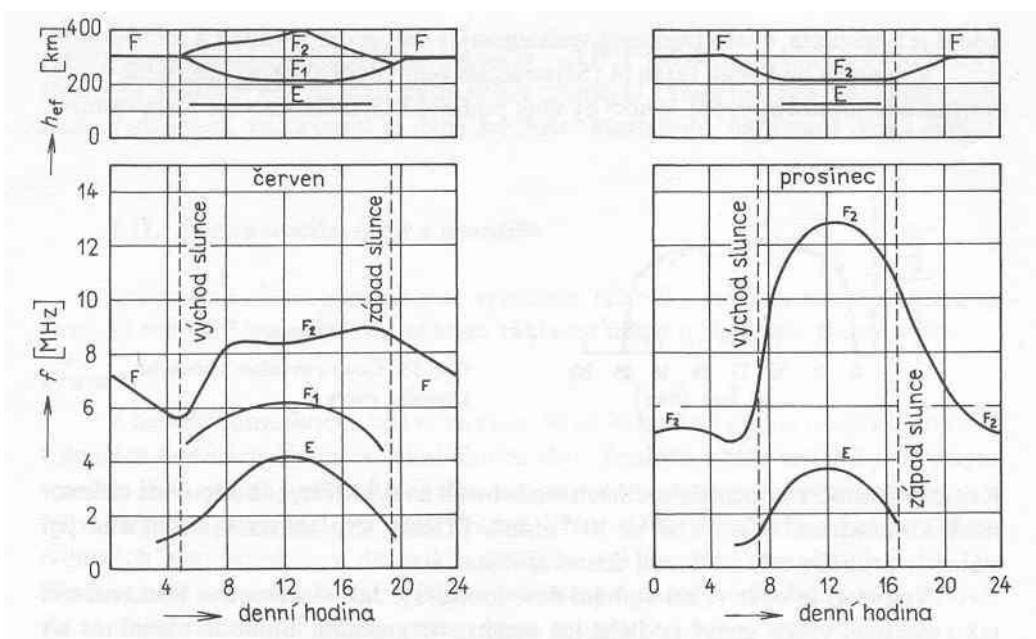
4.6 PRAVIDELNÉ VARIACE IONOSFÉRY

Ionosféra vykazuje tři základní typy pravidelných variací. Jde o změny způsobené střídáním dne a noci, ročních období a slunečním cyklem.

- Denní a sezónní variace

Nejjednodušší typ variací vykazuje vrstva E. Od úsvitu hodnota její kritické frekvence vzrůstá od nízkých nočních hodnot k polednímu maximu, poté rovnoměrně klesá až do soumraku. Po západu slunce elektronová koncentrace opět prudce poklesá. Chování vrstvy F1 je podobně, jako je tomu u vrstvy E, přímo závislé na výšce Slunce nad obzorem.

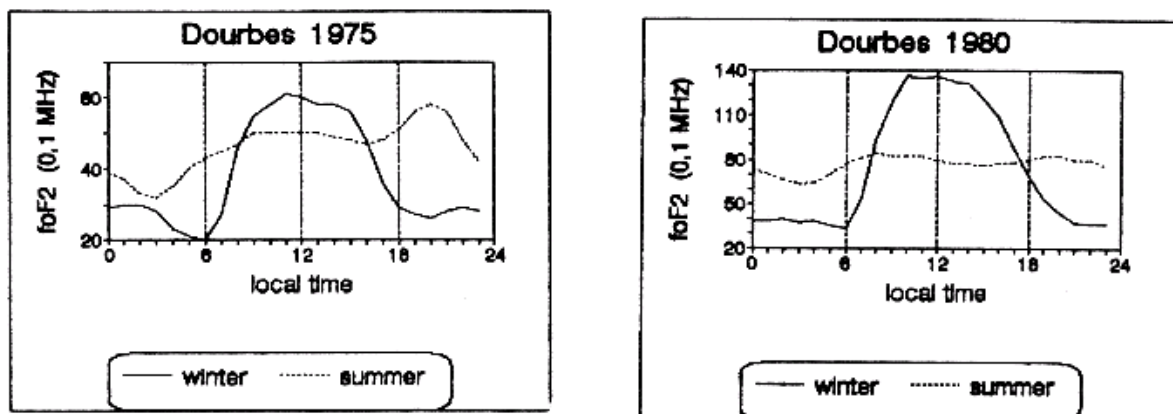
Vrstva F2 vykazuje rozdílné chování. Maximum kritické frekvence nemusí nastávat přímo v místní poledne, často se také objevují dvě denní maxima, případně kritická frekvence pozvolna narůstá v průběhu celého dne až do okamžiku západu slunce a poté kritická frekvence klesá. Obrázek 11 ilustruje chování vrstev E, F1 a F2 v letním (vlevo) a v zimním období (vpravo).



Obr. 11 Denní variace ve výškách a kritických frekvencích E, F1 a F2 ve středních šířkách. Vlevo: červen, vpravo: prosinec. Nahoře je znázorněn průběh výšky jednotlivých vrstev, dole je průběh kritických frekvencí [o11]

Na levé části obrázku (letní období) se objevují dvě lokální maxima kritické frekvence vrstvy F2 (f_oF_2), na pravé části (zimní období) je vidět jedno maximum f_oF_2 kolem poledne. Na tomto místě je ovšem nutné zdůraznit, že tyto průběhy nejsou jediné možné a jsou silně závislé na dalších faktorech, například zeměpisné (geomagnetické) poloze dané oblasti. Dalším jevem je tzv. zimní anomálie (obr. 12), která spočívá v nižších hodnotách kritických frekvencí v letních dnech než v zimních, přestože výška Slunce nad obzorem a doba svitu jsou v létě vyšší. Relativní zastoupení molekul a iontů v neutrální atmosféře se rovněž mění podle ročních období a způsobuje větší míru rekombinace

v letních měsících. Tento jev je intenzivnější než zvýšená produkce iontů způsobená zenitovou vzdáleností a dobou svitu Slunce.



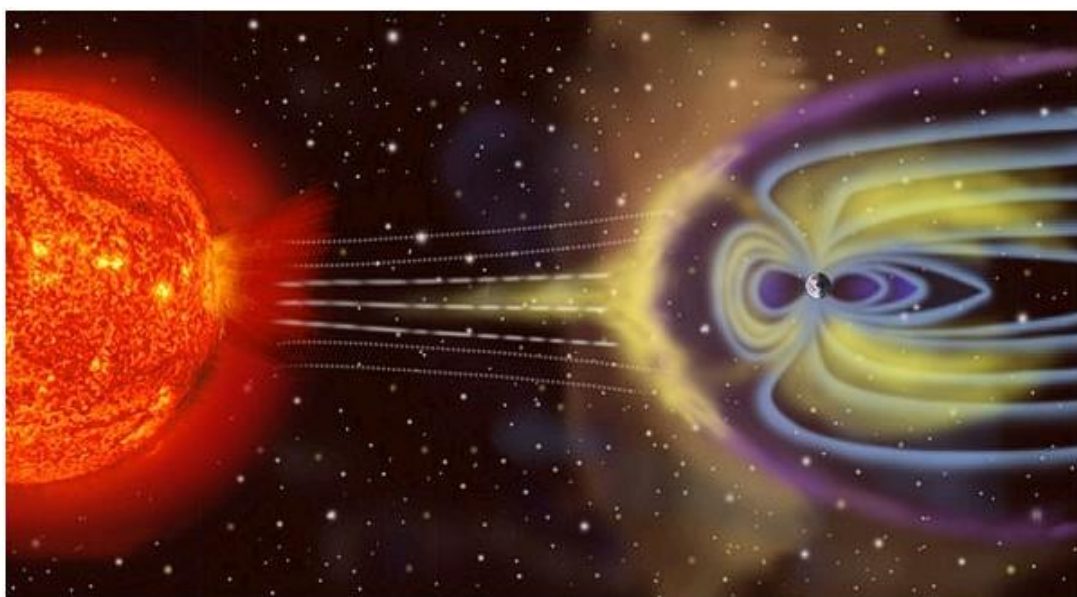
Obr. 12 Zimní anomálie. Polední hodnota foF2 je pro období nízké sluneční aktivity (vlevo) i vysoké sluneční aktivity (vpravo) zřetelně vyšší v zimě (plná čára) než v létě (tečkovaná čára) [o12].

5. MAGNETOSFÉRA ZEMĚ A SLUNEČNÍ VÍTR

5.1 MAGNETOSFÉRA ZEMĚ

Magnetosféra Země je oblast s převládajícím vlivem zemského magnetického pole nad slunečním. Existence zemské magnetosféry je důsledkem existence elektrických proudů tekoucích v jádru Země. Tyto proudy mají velikost přibližně 10^9 A. Magnetická indukce na povrchu Země dosahuje hodnot od $0,25 \times 10^{-4}$ T na rovníku do $0,6 \times 10^{-4}$ T na pólech.

Magnetické pole v blízkosti zemského povrchu (tzv. vnitřní magnetosféra) má přibližně dipólový charakter s osou, která svírá s rotační osou Země úhel asi $11,5^\circ$ (sklon osy dipólu se mění nepravidelně s časem). Ve větší vzdálenosti od Země je tvar magnetického pole deformován slunečním větrem – proudem částic ze Slunce, který s sebou unáší tzv. „zamrzlé“ siločáry slunečního magnetického pole.

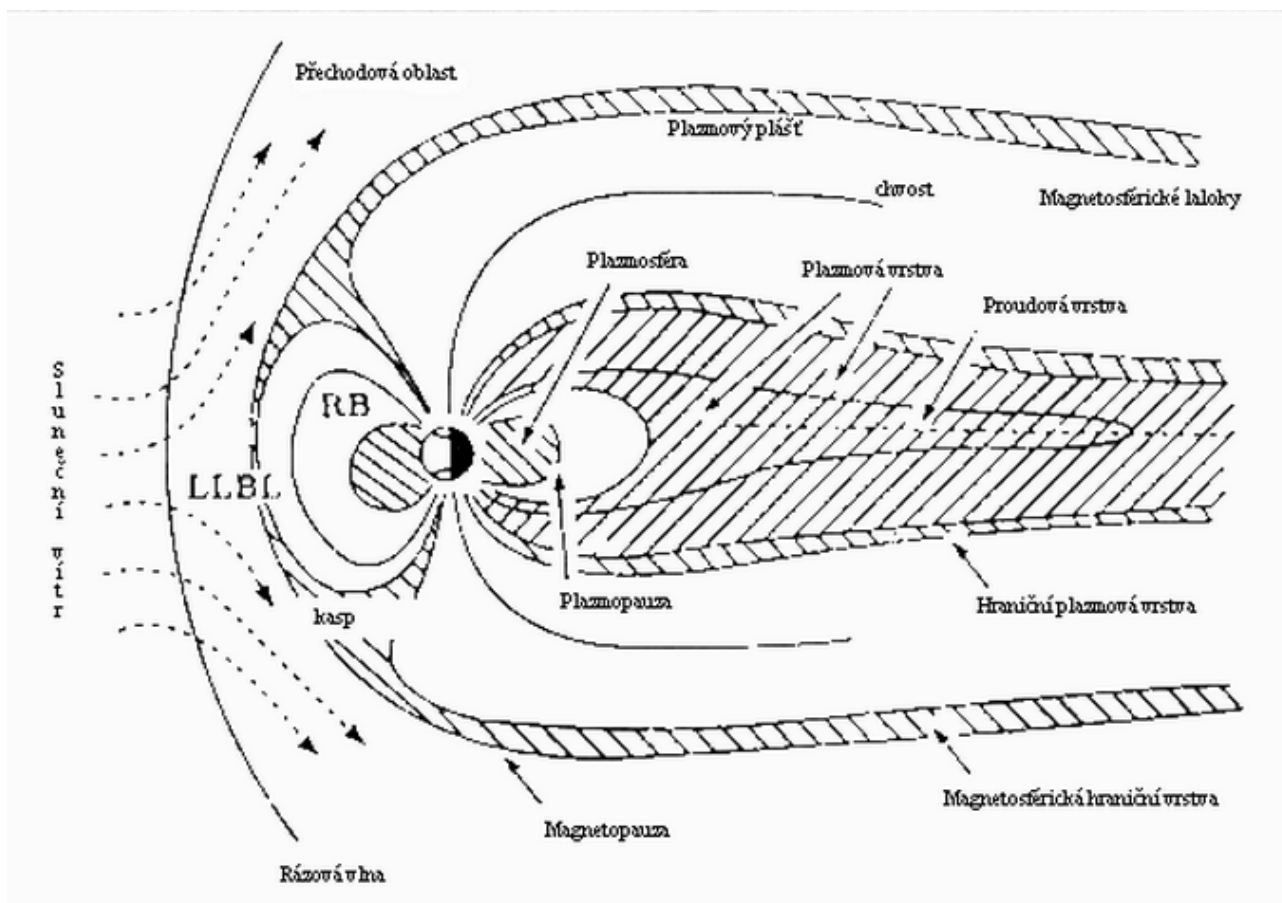


Obr.13 Magnetosféra Země [o13]

Magnetosféra Země má na straně přivrácené Slunci rozměr asi deset zemských poloměrů, na straně odvrácené od Slunce sahá do vzdálenosti několika stovek zemských poloměrů. Hranice magnetosféry je nazývána magnetopausou. Na straně přivrácené Slunci se tato hranice charakterizuje rovností magnetického tlaku zemského pole a změny hybnosti slunečního větru za jednotku času [e10].

Poloha tohoto místa tedy závisí na charakteristikách slunečního větru (hustota, rychlost a složení) a magnetického pole Slunce (velikost a orientace). Na čele magnetopausy se objevuje rázová vlna, která vzniká nárazem nadzvukového slunečního větru na zemskou magnetosféru. Změny tlaku slunečního větru mají za následek proměnlivou geomagnetickou aktivitu Země (kolísání charakteristik magnetického pole).

Sluneční vítr naráží na návětrné straně na magnetosféru, zvyšuje se jeho hustota a teplota, a obtéká Zemi podél magnetopauzy. Zemská magnetosféra způsobuje, že sluneční vítr nevniká rovnoměrně do horních vrstev atmosféry. Silné magnetické pole Země tvoří překážku elektricky nabitým částicím slunečního větru a brání jejich průniku do atmosféry. V oblasti aurorálních oválů soustředěných okolo zemských pólů tyto částice pronikají až do ionosféry, která tvoří vnitřní hranici zemské magnetosféry a tam posléze rekombinují. Energie vzniklá tímto procesem se projevuje jevem známým jako polární záře.



Obr.14 Magnetosféra [o14]

Vnitřní magnetosféra se nachází ve směru od Slunce a zasahuje až za oběžnou dráhu Měsíce. Vnitřní magnetosféra se skládá z několika částí. Její střední část tvoří slabá vrstva velmi horkého plazmatu nazývaná plazmová vrstva. Tato vrstva je charakteristická svou velkou proměnlivostí. Koncentrace iontů je zde zhruba $0,5 \text{ cm}^{-3}$.

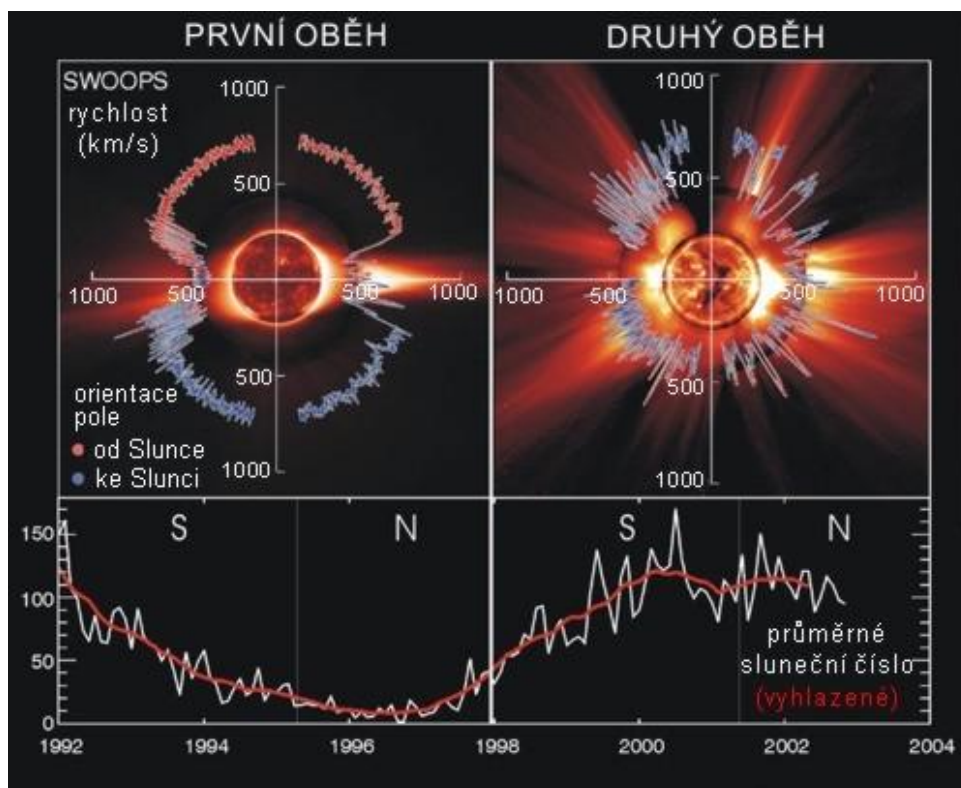
Další částí vnitřní magnetosféry jsou dva chvostové laloky. Obsahují velmi malé množství plazmatu. Hustota je zde zhruba $0,01$ částic v cm^{-3} . Nachází se zde silné magnetické pole, jehož magnetické siločáry mají konstantní směr (směřují k Zemi v polárních oblastech a na druhém konci jsou otevřené a spojené se siločarami meziplanetárního magnetického pole). Mezi magnetopausou a magnetosférou se nachází přechodová vrstva. Plazma této oblasti je tvořeno ionty jak ze zemské atmosféry tak ze slunečního větru.

5.2 SLUNEČNÍ VÍTR

V září roku 1859 pozoroval britský astronom Richard Carrington velmi silnou sluneční erupci. Následujícího dne bylo možné sledovat polární záři velmi blízko zemského rovníku – například na Kubě a na Jamajce. Richardu Carringtonovi je tak připisován objev slunečního větru.

V polovině 20. století se poprvé spekovalo o „slunečním částicovém záření“ jako příčině geomagnetických bouří [e14]. Z nárůstu magnetické indukce meziplanetárního magnetického pole většinou dva dny po sluneční erupci se usuzovalo na nutnost existence elektrického spojení mezi Sluncem a Zemí. V roce 1950 Ludwig Biermann zjistil, že plazmové ohony komet mají vždy směr od Slunce. Z toho usoudil, že musí existovat stálý tok částic ze Slunce. Eugene Parker poté odvodil model dynamické, rozpínající se sluneční koróny. Teplota ve sluneční koróně je dostatečně vysoká, takže množství částic má rychlost překračující únikovou rychlost ze Slunce (asi 620 km/s).

Parametry slunečního větru – hustota a rychlost částic – závisejí na sluneční aktivitě. Hustota přibližně v rozmezí 1-100 částic/cm³, typická průměrná hodnota v oblasti oběžné dráhy je zhruba 6 iontů na cm³[e7] [e10]. Z Parkerovy rovnice vyplývá, že rychlost slunečního větru má dvě řešení – pomalou složku (300-400 km/s) a rychlou (700 km/s). Podle míry sluneční aktivity a podle směru větru se mění jejich poměr.



Obr. 15 Rychlost slunečního větru (km/s) změřená družicí Odysseus v závislosti na heliografické poloze družice a sluneční aktivitě. Vlevo měření z let 1994-1995 (nízká sluneční aktivita), vpravo roky 2000-2001 (vysoká sluneční aktivita)[o15]

Na obrázku č. 15 je zaznamenána rychlost slunečního větru, jak ji změřila sonda Odysseus při svých dvou průletech v letech 1994-1995 a 2000-2001. Při prvním oběhu bylo Slunce minimálně aktivní a jeho magnetické pole bylo dipólové. V oblasti pólů převažuje rychlá složka slunečního větru a v oblasti rovníku pomalá. Při druhém oběhu mělo magnetické pole Slunce neuspořádaný charakter a nebylo možné rozlišit složky slunečního větru [e3].

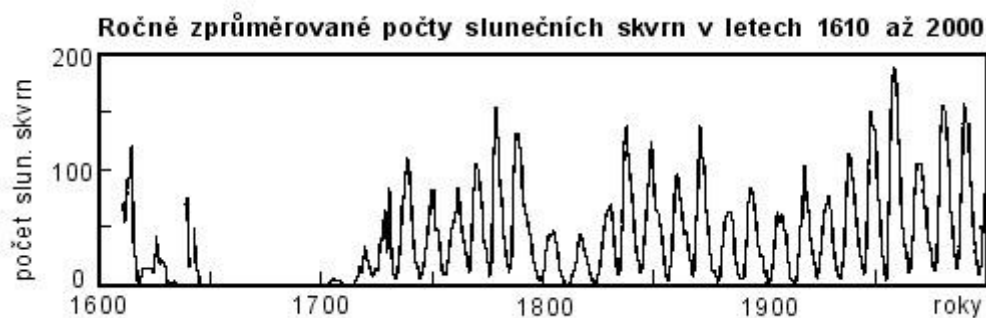
5.3 SLUNEČNÍ SKVRNY

Sluneční skvrny byly popsány již ve starověké Číně, teleskopicky pak byly pozorovány začátkem 17. století. Jedná se o oblasti plazmatu, které mají o něco nižší teplotu než okolí. Tento jev lze vysvětlit silným magnetickým polem, které potlačí přenos energie (konvekci) směrem k povrchu Slunce. Plyn chladne a je oproti okolním oblastem relativně tmavší. Podél okrajů skvrny se naopak vyskytuje žhavější plazma, kudy se vyzáří zadržovaná energie. Výskyt slunečních skvrn proto neznamena pokles celkového množství vyzářené energie [e9].

5.4 SLUNEČNÍ CYKLY

Základním slunečním cyklem se nazývá 11letý cyklus, objevený v roce 1834 Heinrichem Schwabem. Cyklus je spojen s obrácením polarity magnetického pole Slunce, ke kterému dochází v průměru jednou za 11 let – fyzikálně správnější je tedy mluvit o celém, tzn. 22letém slunečním cyklu. Poloviční cyklus netrvá vždy přesně 11 let – tato hodnota je spíše průměrná a délka cyklu kolísá zhruba mezi 9 a 14 lety [e9].

V obdobích nejvyšší sluneční aktivity se na Slunci objevuje velké množství slunečních skvrn, v obdobích minima aktivity se sluneční skvrny nevyskytují a magnetické pole Slunce je téměř dipólového charakteru. V maximu sluneční aktivity se objevuje více a mohutnějších slunečních erupcí, častěji dochází ke koronálním výronům hmoty. Další pozorované periody sluneční aktivity jsou Gleissbergův cyklus (87 let – amplitudová modulace základního cyklu), De Vriesův (205 let), Hallstattův (2300 let) a tzv. erupční perioda (140 – 170 dní). Fyzikální základ těchto period se prokazuje obtížně, často se objevují „falešné“ periody spojené s orientací Slunce v prostoru nebo s diferenciální sluneční rotací [e4].



Obr. 16 Počty slunečních skvrn [o16]

6. VZTAH MEZI IONOSFÉRICKÝMI PARAMETRY A SLUNEČNÍ AKTIVITOU

6.1 IONOSFÉRICKÁ DATA

Pro studium korelace sluneční aktivity a stavu ionosféry byla použita data z observatoře Průhonice z období let 1973-1984. Pro studium závislosti stavu ionosféry na geomagnetické šířce stanice a pro studium ionosférické odezvy na událost CME byla ionosférická, sluneční a geomagnetická data vybrána z období 30. 6. 2010 – 7. 8. 2010.

V práci používám data z několika ionosférických stanic získaná zejména z databáze SPIDR (Space Physics Interactive Data Resource) National Geophysical Data Center, která je dostupná na adrese <http://spidr.ngdc.noaa.gov/spidr/> a z databáze dat japonských stanic dostupných na http://wdc.nict.go.jp/IONO/index_E.html. Data z observatoře Průhonice Ústavu fyziky atmosféry Akademie věd ČR mám k dispozici přímo z této stanice. Manuálně vyhodnocená data mi poskytl školitel Z. Mošna. Všechna použitá data jsou dostupná na přiloženém cd ve formátu, v jakém jsem je získala (txt, xls, xml).

Observatoř Průhonice má geografické souřadnice 49°59'N, 14°33'E a od roku 2010 je vybavena Digisondou DPS-4D [7]. Ionogramy, soubory sao i výstupy z měření driftů jsou zveřejňovány na adrese <http://147.231.47.3/>.

Jako jedna z hlavních charakteristik popisující chování ionosféry v této práci byla zvolena veličina kritické frekvence vrsvy F2 (foF2) a výšky maxima elektronové koncentrace ve vrstvě F2 (hmF2).

6.2 DATA POPISUJÍCÍ SLUNEČNÍ AKTIVITU A GEOMAGNETICKOU AKTIVITU

Jako ukazatel sluneční aktivity používám hodnoty slunečního rádiového toku (solar flux) a Wolfova čísla vyjadřujícího počet slunečních skvrn. Pro intenzitu slunečního rádiového toku na vlnové délce 10,7 cm se také používá výraz F10.7 index. Záznamy o této hodnotě jsou k dispozici kontinuálně od roku 1947.

V současnosti se oficiálně používají dvě hodnoty indexu slunečních skvrn. Prvním z nich a mnou používané je Wolfovo číslo udávající počet slunečních skvrn. Toto číslo je každodenně počítáno v NOAA Space Environment Center pomocí následujícího vzorce

$$R = k(10g + s), \quad (15)$$

kde R je Wolfovo číslo, k je korekční faktor, g počet skupin skvrn na slunečním disku a s je celkový počet skvrn ve všech skupinách.

Druhé používané číslo, označované jako počet skupin slunečních skvrn, se počítá podle následujícího vzorce:

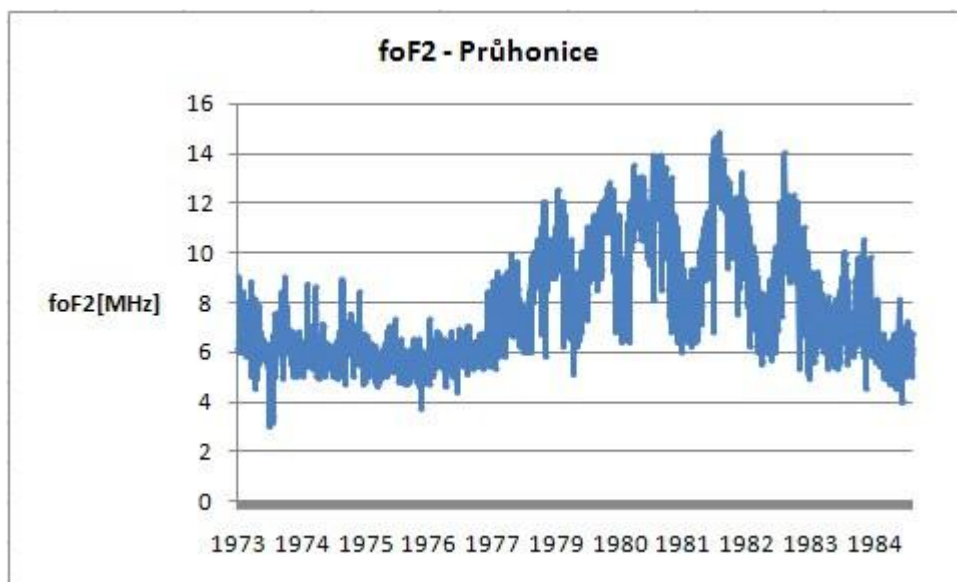
$$R_g = \frac{12,08}{g} \sum K_i G_i \quad (16)$$

kde R_g je počet skupin slunečních skvrn, G_i je počet skupin slunečních skvrn zaznamenaných i -tým pozorovatelem, K_i individuální korekční faktor a N počet pozorovatelů v daném dni. Pro popis geomagnetické aktivity používám indexy K_p a Dst .

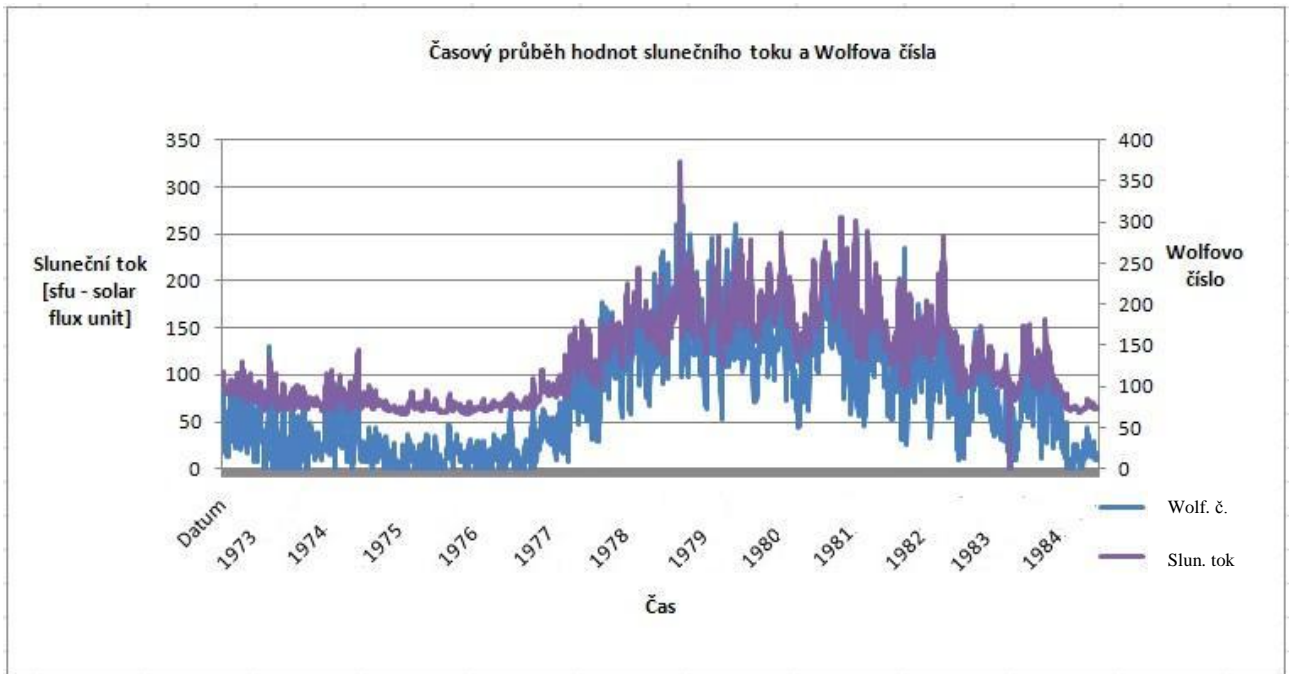
6.3 IONOSFÉRA V PRŮBĚHU 11LETÉHO SLUNEČNÍHO CYKLU

V následující části práce zkoumám závislost hodnoty $foF2$ na sluneční aktivitě v průběhu let 1973 - 1984. Ionosféra je jako vysoce variabilní systém silně ovlivňována mírou sluneční aktivity. V průběhu dostatečně dlouhého časového úseku je korelace zřetelná na první pohled.

Hodnoty kritické frekvence vrstvy F2, kterými ilustruji výše zmíněné chování ionosféry, pochází z Průhonic z let 1973-1984 (Obr. 17). Zvolila jsem polední hodnotu kritické hodnoty $foF2$ pro každý den. Obr. 18 znázorňuje průběh hodnot slunečního toku a koeficientu počtu slunečních skvrn. Z grafu je dobře patrná proměnná sluneční aktivita v průběhu 11 let.

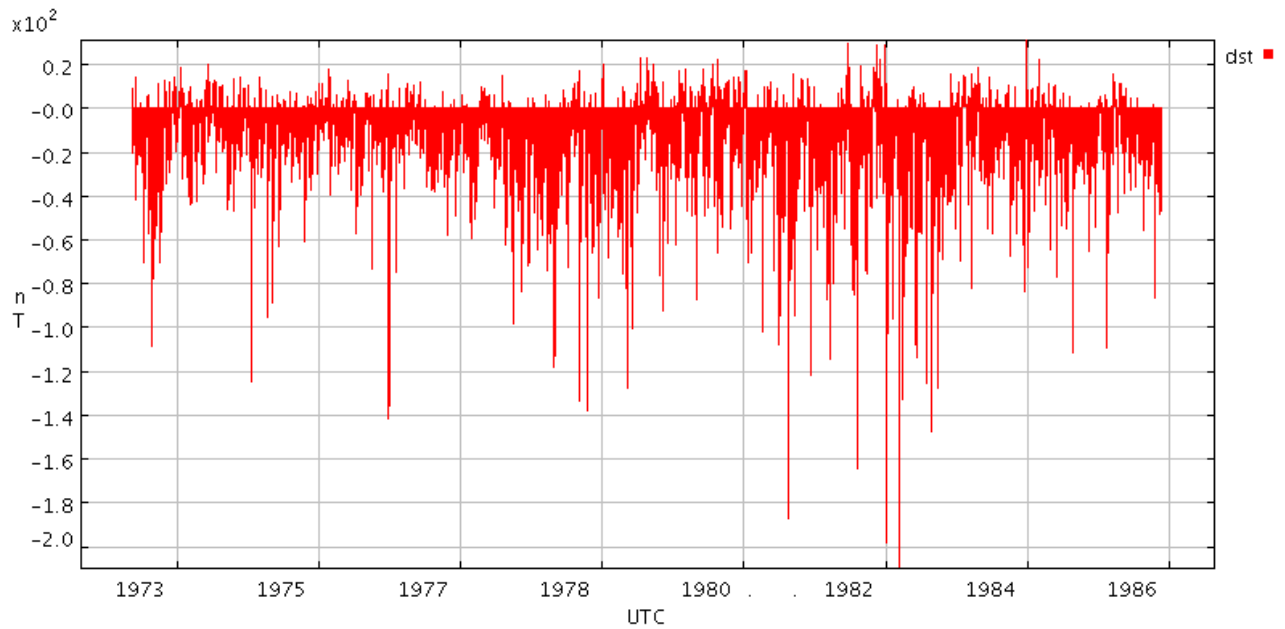


Obr. 17 Průběh $foF2$ v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu

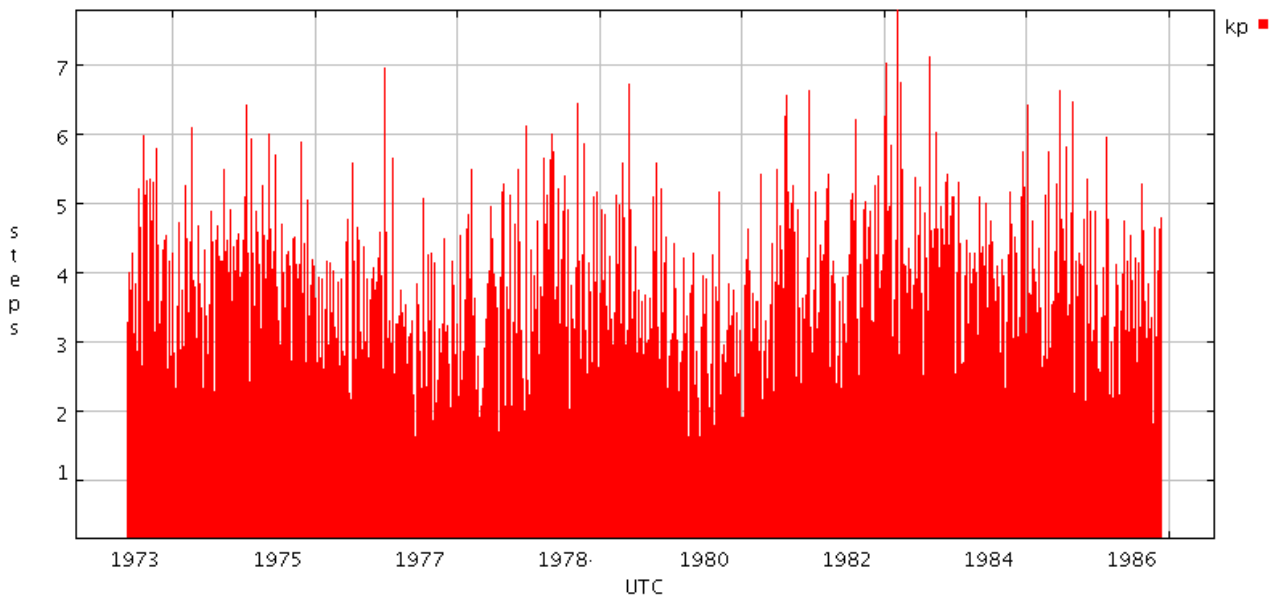


Obr. 18 Průběh slunečního toku a Wolfova čísla v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu

Na obr. 19 a 20 jsou ukázány průběhy Dst a Kp indexu v letech 1973-1984:



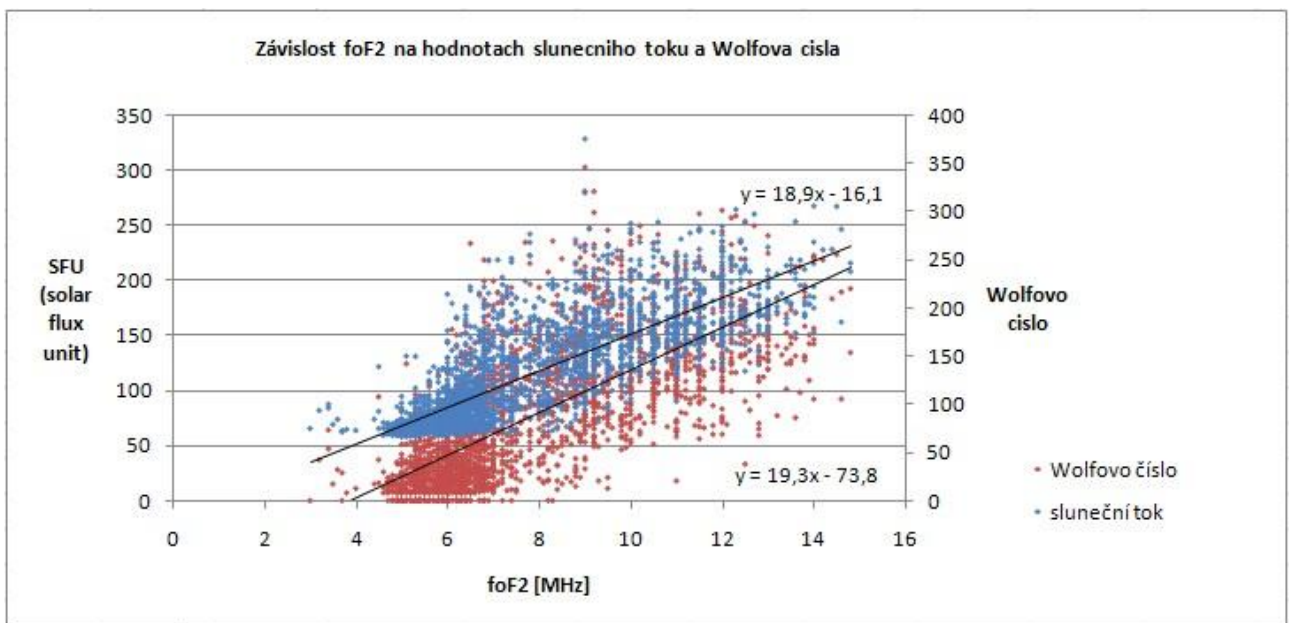
Obr. 19 Průběh Dst indexu v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu



Obr. 20 Průběh Kp indexu v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu

Hodnoty Kp a Dst indexu v průběhu 11letého cyklu ukazují, že ačkoliv nejintenzivnější události nastávají v době slunečního maxima, silné bouře se objevují i v době slunečního minima.

Obr. č. 21 zobrazuje závislost hodnot kritické frekvence vrstvy F2 na hodnotách slunečního toku a koeficientu počtu slunečních skvrn – Wolfově čísla.



Obr. 21 Závislost foF2 na hodnotách slunečního toku a Wolfova čísla

Pro zjištění závislosti hodnoty foF2 v Průhonicích na slunečního toku a počtu slunečních skvrn byl použit Pearsonův korelační koeficient r (Rov. 17):

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (17)$$

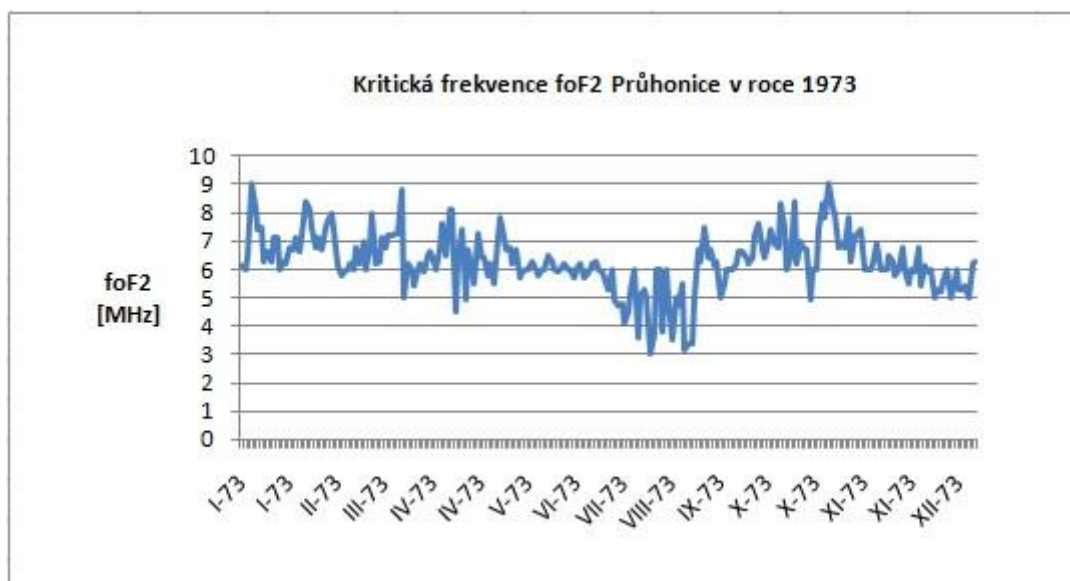
Pro hodnotu foF2 byly použity polední hodnoty, sluneční tok a Wolfovo číslo jsou průměrné denní hodnoty.

Tab. 1 Korelační koeficienty pro sluneční tok a Wolfovo číslo vs. foF2

	Korelační koeficient
Sluneční tok	0,733
Wolfovo číslo	0,802

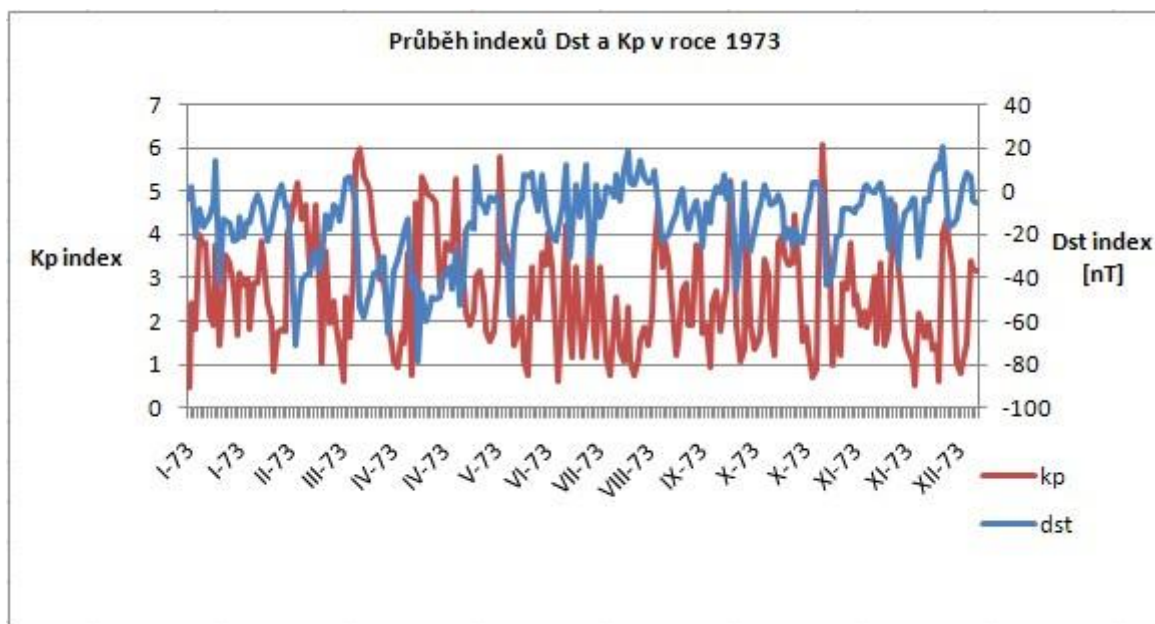
Výsledky ukazují na významnou korelaci sluneční aktivity a kritické frekvence vrstvy F2. Wolfovo číslo se ukazuje jako lépe korelovaná veličina než hodnota slunečního toku.

Na použitých datech ilustrují vývoj ionosférických charakteristik v průběhu roku:



Obr. 22 Průběh foF2 v roce 1973

Roční průběh kritické frekvence vrstvy F2 odpovídá výše popsanému teoretickému modelu, kdy nejnižších hodnot je dosaženo v průběhu letních měsíců.



Obr. 23 Průběh Dst a Kp indexu v roce 1973

Průběh indexů Dst a Kp ukazuje na jejich vzájemnou antikorelaci (vyšší kladné hodnoty Kp a záporné hodnoty Dst jsou spojeny s vyšší geomagnetickou aktivitou). Zde je ovšem nutné upozornit na fakt, že Dst index má jednotky nT, Kp index je bezrozměrný a kvazilogaritmický.

6.4 ZÁVISLOST FO F2 NA GEOMAGNETICKÉ ŠÍŘCE

V následující části je popsána závislost hodnoty foF2 na geomagnetické šířce stanice. Hodinové hodnoty pocházejí z období 30. 6. – 7. 8. 2010 a jsou z následujících stanic:

Tab. 2 Charakteristiky stanic

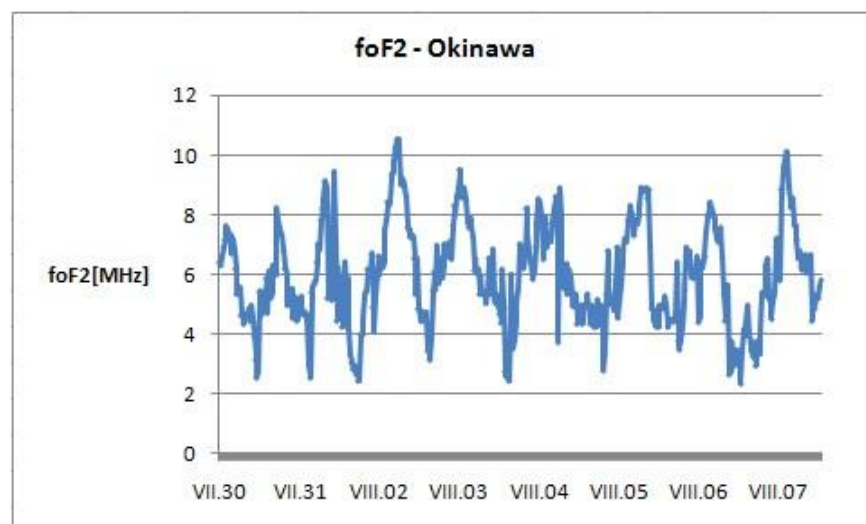
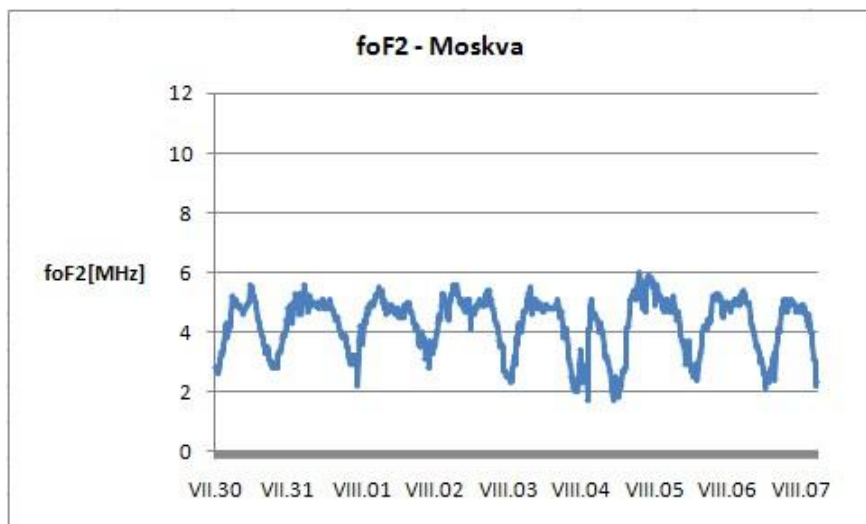
Stanice	Zeměpisná šířka	Geomagnetická šířka ¹⁶
Moskva (Rusko)	55°48'N	65°42'N
Okinawa (Japonsko)	26°30'N	19°47'N
Průhonice (ČR)	49°59'N	60°7'N
Řím (Itálie)	41°54'N	52°16'N

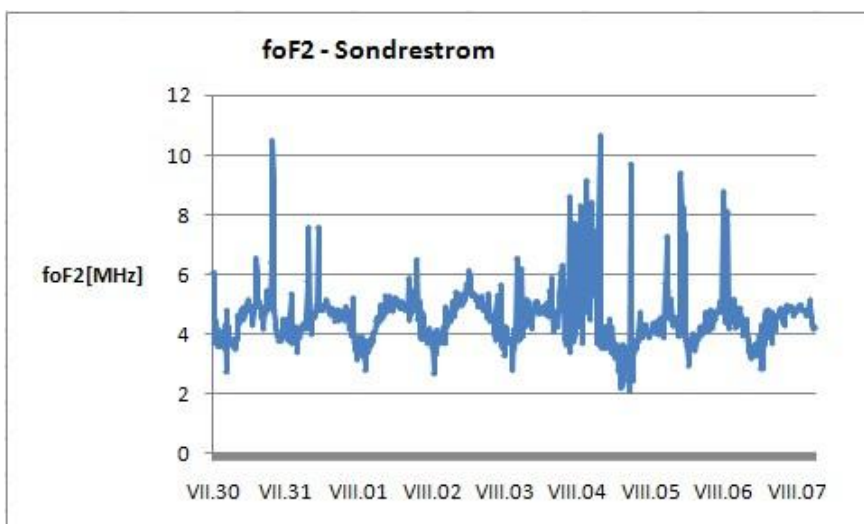
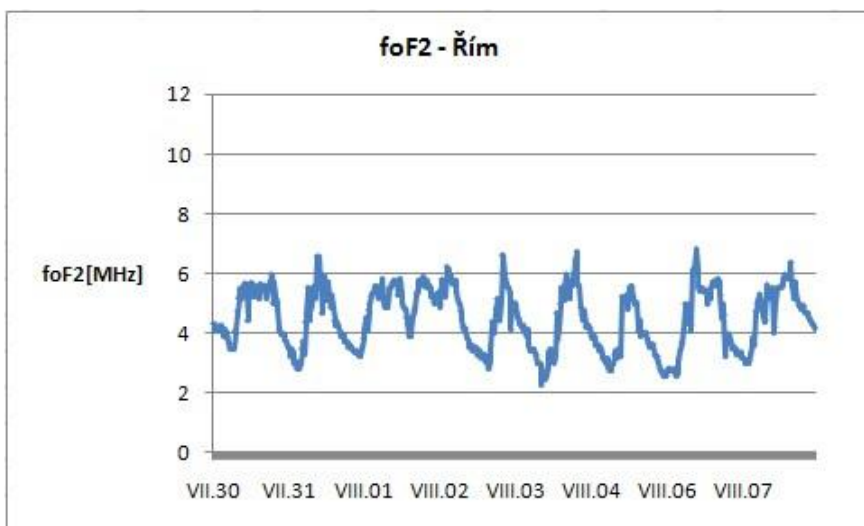
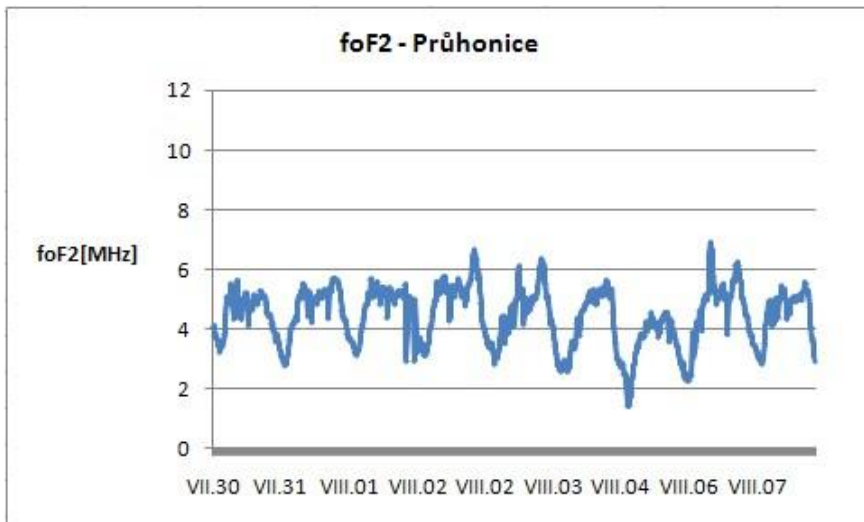
¹⁶ Geomagnetická šířka je souřadnice analogická k zeměpisné šířce. Namísto zeměpisných pólů se poloha určuje vzhledem k magnetickým pólům.

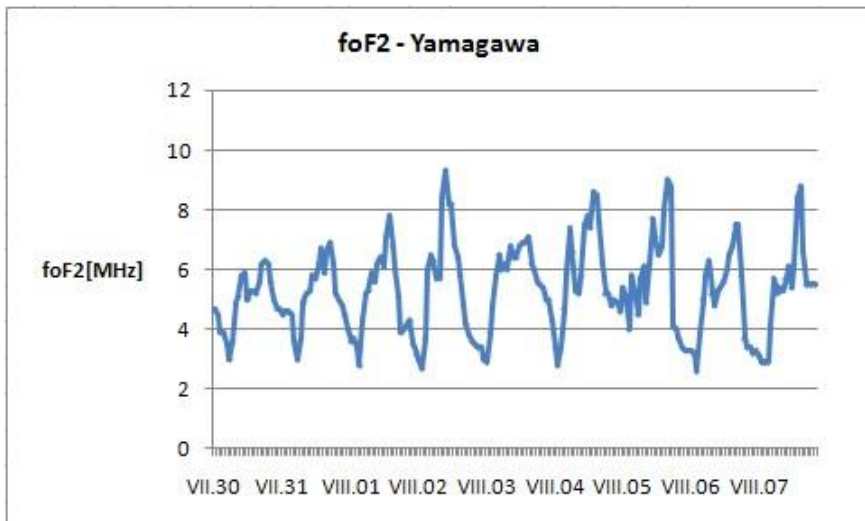
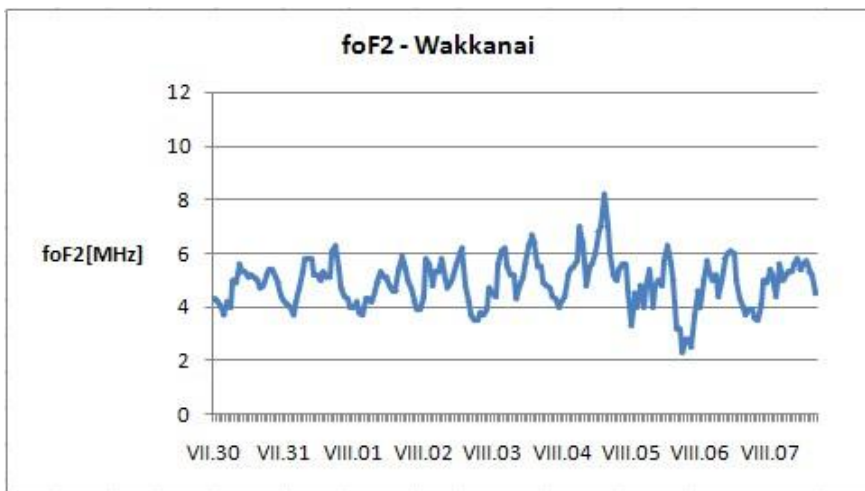
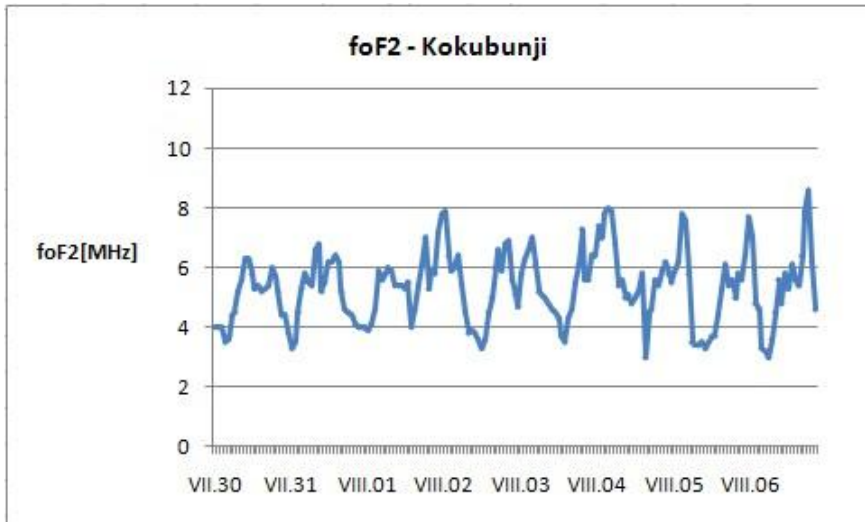
Sondrestrom (Švédsko)	66°59'N	76°5'N
Miedzeszyn (Polsko)	52°10'N	62°25'N
Wakkanai (Japonsko)	36°24'N	45°10'N
Yamagawa (Japonsko)	21°42'N	31°26'N
Kokubunji (Japonsko)	26°48'N	37°43'N

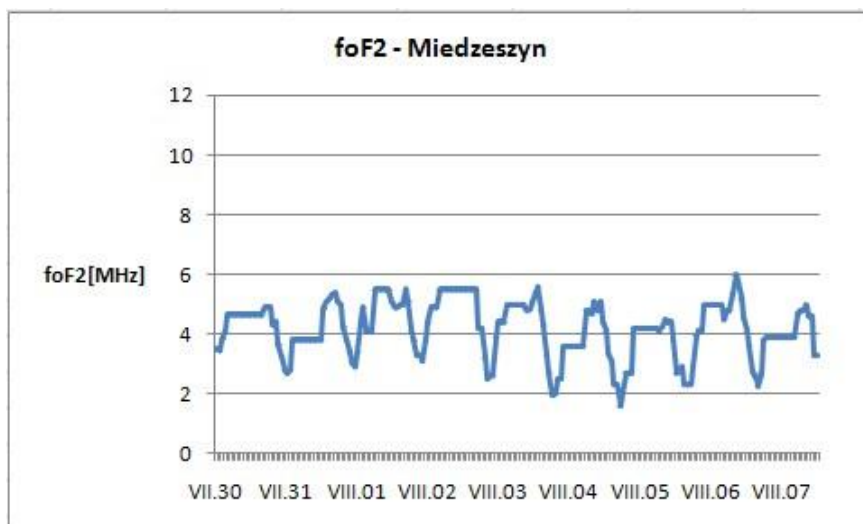
Hodnoty geomagnetické šířky byly vypočítány pomocí [e5] .

Průběh hodnoty foF2 na jednotlivých stanicích ve sledovaném období :





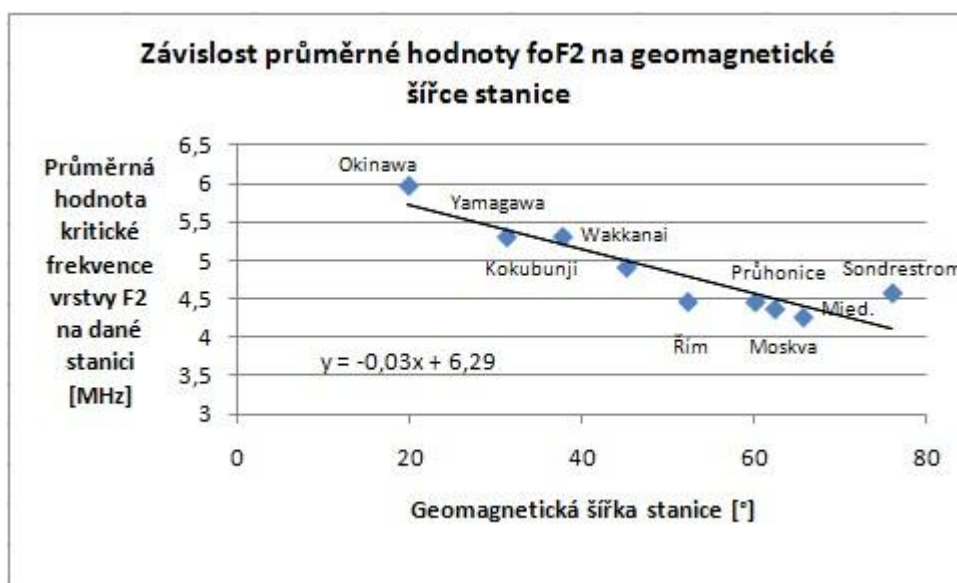




Obr. 24 a)-i) Průběh foF2 na jednotlivých stanicích

Pearsonův korelační koeficient (Rov. 17) pro hodinová data mezi průměrnou hodnotou foF2 v daném období a geomagnetickou šířkou je -0,91, což ukazuje na silnou závislost. Čím větší je tedy hodnota geomagnetické šířky místa, tím nižších hodnot dosahuje foF2. Pro test odlišnosti dat ze dvou geomagneticky nejvzdálenějších stanic byl aplikován Studentův t-test, který prokázal rozdílnost středních hodnot na hladině 5 %. Na obr. 24 a)-i) jsou vidět průběhy hodnoty foF2. Tvary grafů není možné jednoznačně vysvětlit geomagnetickou šířkou. Roli zde hrají např. poloha stanice z hlediska blízkosti oceánu (japonské stanice), inklinace magnetického pole či příslušnost k polární ionosféře (Sondrestrom).

Na obr. 25 je vykreslena závislost průměrné hodnoty kritické frekvence vrstvy F2 za celé devítidenní období na geomagnetické šířce stanice.

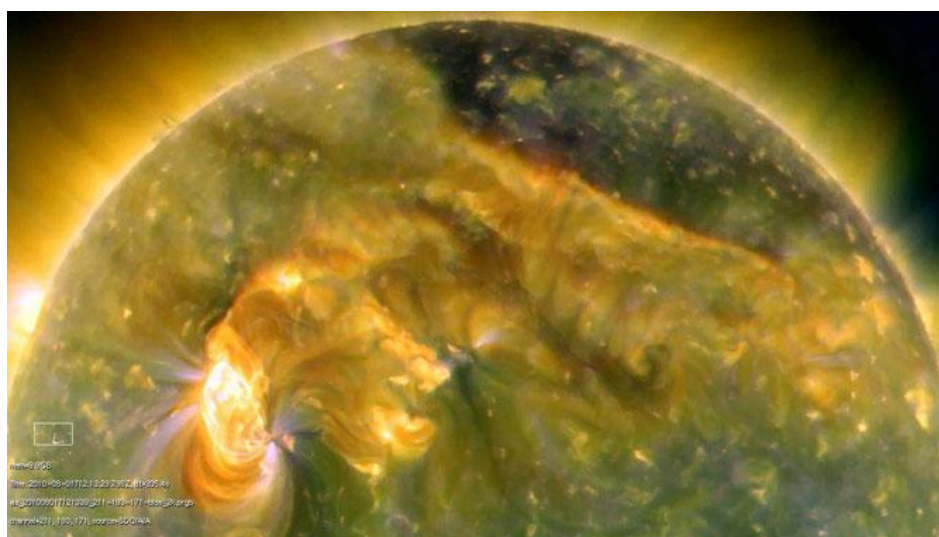


Obr. 25 Závislost foF2 na geomagnetické šířce

6.5 IONOSFÉRICKÁ ODEZVA V PRŮBĚHU IONOSFÉRICKÉ BOUŘE

Výrony koronární hmoty ze Slunce jsou charakteristické prstencovým magnetickým polem. V případě silných opačně orientovaných magnetických polí v blízkosti slunečního povrchu může dojít k přepojení jejich silokřivek a vzniku velkého množství tepelné energie. Pokud dojde k oddělení tohoto horkého oblaku od Slunce a jeho průniku do magnetosféry Země, dochází ke komplikovaným změnám v zemské magnetosféře a ionosféře. Na obrázcích č. 28 – 29 je zobrazen průběh foF2 a hmF2 na vybraných ionosférických stanicích. Tyto tři stanice byly zvoleny z důvodu podobného chování ionosféry jako na observatoři Průhonice.

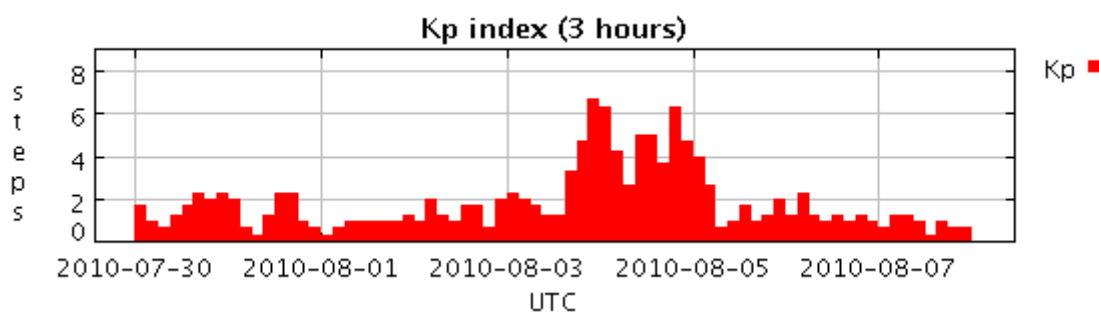
Zkoumaná eejekce koronární hmoty nastala 1. 8. 2010. Nabité částice slunečního plazmatu dorazily k Zemi o dva dny později, 3. srpna 2010 v 17:40 UT a vyvolaly ionosférickou bouři.



Obr. 26 Slunce 1.8.2010 [o26]

Na obrázku č. 26 je možné vidět vysokou sluneční aktivitu 1. 8. 2010. Snímek pořízený v ultrafialové oblasti zachycuje severní hemisféru Slunce. Barvy reprezentují teploty pohybující se zhruba mezi jedním a dvěma milióny kelvinů.

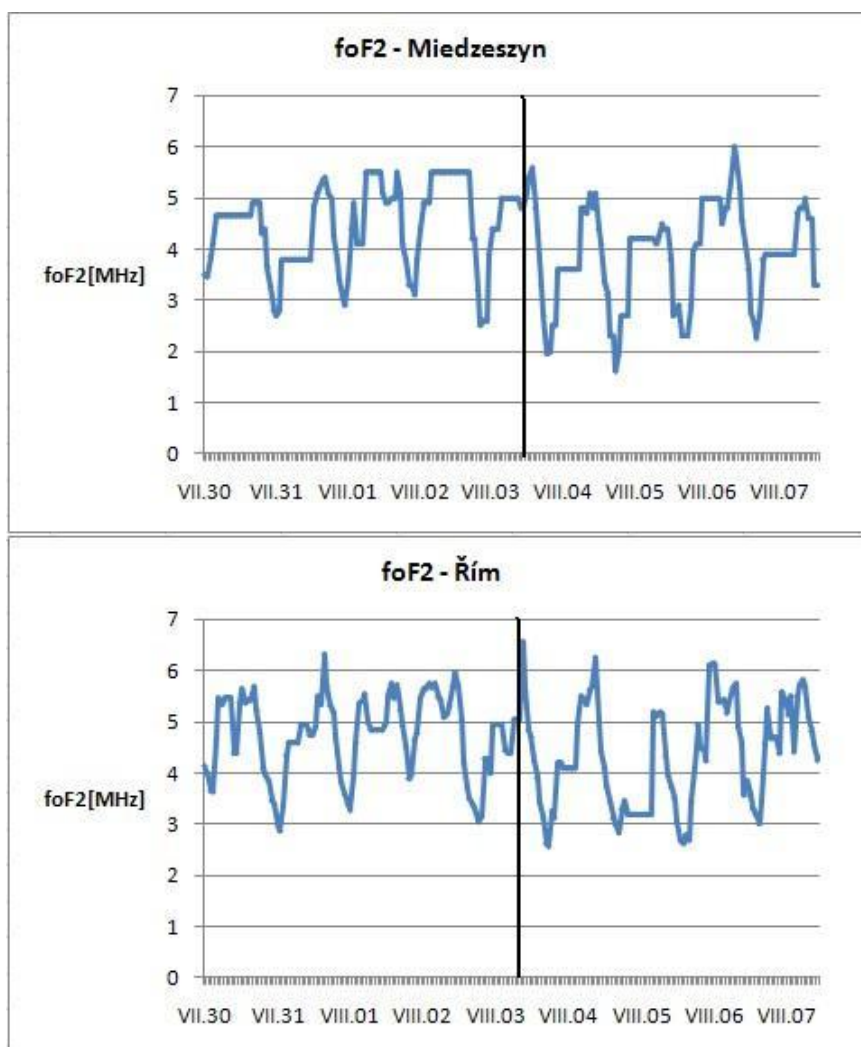
Geomagnetickou bouří charakterizuje průběh Kp indexu:

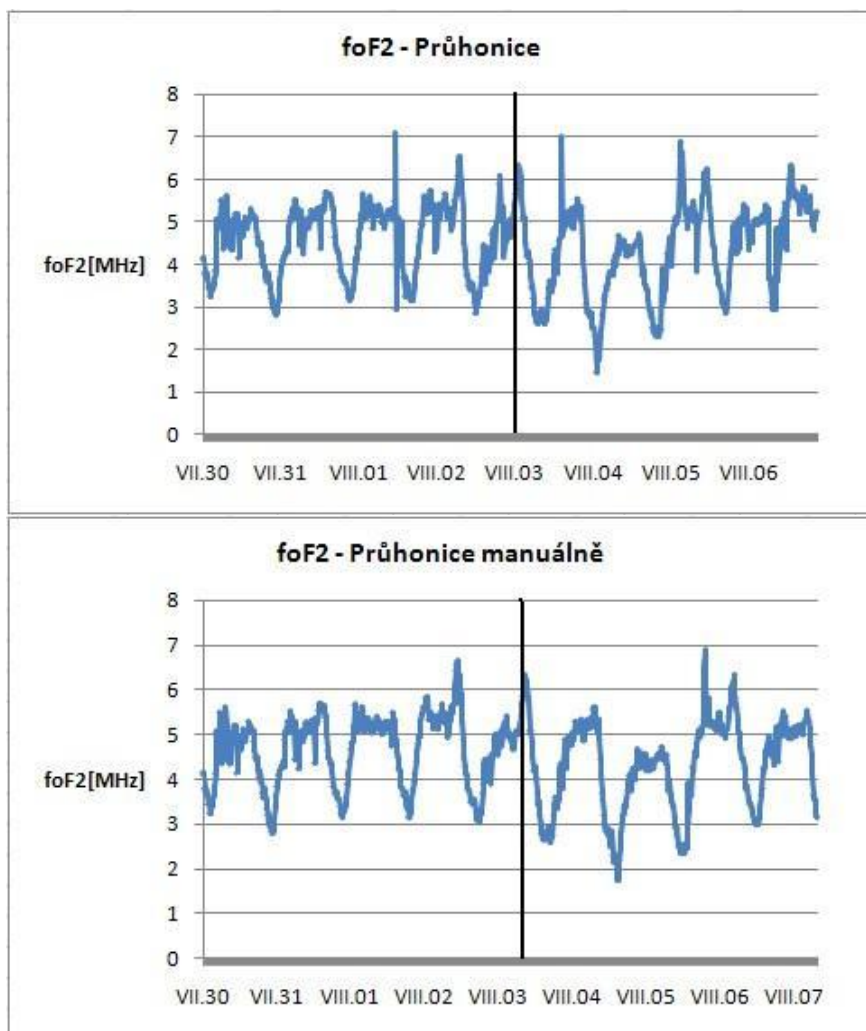


Obr. 27 Kp index v průběhu ionosférické bouře

Reakce ionosféry byla studována na třech observatořích – v Průhonicích, polské stanici Miedzeszyn a italské stanici Řím. Pro všechny tři stanice mám k dispozici automaticky vyhodnocená data, pro stanici Průhonice navíc data zpracovaná ručně [9]. Na datech ze stanice Průhonice demonstrují odlišnost ručního a automatického vyhodnocování dat v případě silných geomagnetických událostí.

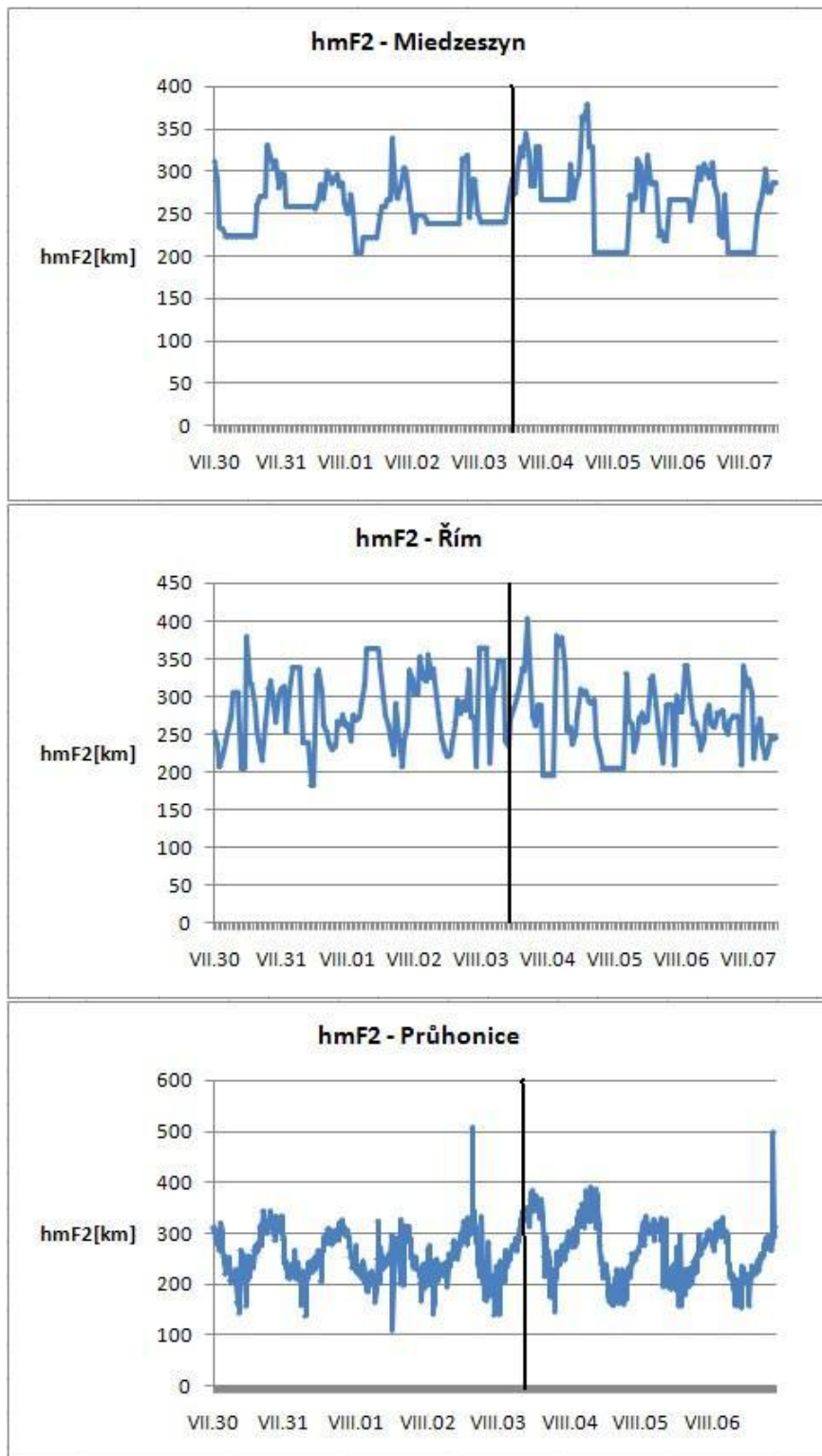
Na následujících grafech je ukázán průběh kritické frekvence vrstvy F2 a výšky maximální elektronové koncentrace vrstvy F2 na třech observatořích v průběhu týdne po ekepci koronární hmoty. Počátek ionosférické bouře je vyznačen svislou čarou.

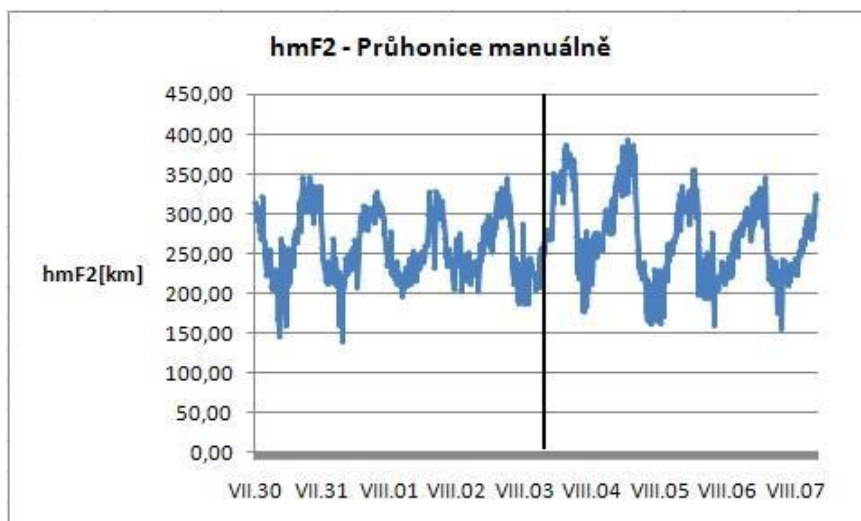




Obr. 28 a)-d) Průběh foF2 s vyznačeným počátkem bouře¹⁷

¹⁷ Data pocházejí z automatického zpracování, s výjimkou grafu 28d





Obr. 29 a)-d) Průběh hmF2 s vyznačených počátkem bouře¹⁸

Odezva nastává třetí den po výronu koronární hmoty a zhruba deset hodin po počátku ionosférické bouře na Zemi (tento počátek definuji jako prudkou změnu magnetického pole a rychlosti slunečního větru na satelitech v blízkosti Země). Na všech sledovaných stanicích dochází k poklesu nočních hodnot kritické frekvence vrstvy F2. Nejnižších hodnot dosahuje v nocích 4. /5. 8 a 5. /6. 8., tedy první a druhou noc po počátku bouře. Výška maximální elektronové koncentrace vrstvy F2 v těchto dnech vzrůstá. Ionosférická bouře je zároveň charakteristická větším kolísáním hodnot kritické frekvence. Změny v charakteristikách vrstvy F2 jsou vzhledem k průběhu Kp indexu (obr. 27) relativně nízké.

Automatické vyhodnocování ionogramů je poměrně spolehlivé v klidných obdobích. V případě zvýšené geomagnetické aktivity se objevují chybné extrémní hodnoty, které je vhodné vyloučit manuálním zpracováním (viz obrázky č.28d a 29d). Manuální zpracování dat vyloučilo extrémní hodnoty hmF2 vyhodnocené softwarem ARTIST ve dnech 1., 3. a 6. 8. 2010 a chybné hodnoty foF2 z 1. a 4.8.2010.

Tab. 3 Přehled nočních minim foF2 před a po začátku bouře

Stanice	Min foF2 3. 8. 2010	Min foF2 4 .8. 2010	Min foF2 5 .8. 2010
Miedzeszyn	2,6 MHz	1,95 MHz	1,6 MHz
Řím	2,8 MHz	2,25 MHz	2,75 MHz
Průhonice	3,05 MHz	2,6 MHz	1,75 MHz

¹⁸ Data pocházejí z automatického zpracování, s výjimkou grafu 30d

Tab. 4 Přehled denních maxim hmF2 před a po začátku bouře

Stanice	Max hmF2 2. /3. 8. 2010	Max hmF2 3. /4. 8. 2010	Max hmF2 4. /5. 8. 2010
Miedzeszyn	320 km	346 km	380 km
Řím	295 km	403 km	309 km
Průhonice	332 km	386 km	392 km

Výron koronární hmoty ze Slunce ovlivnil stav ionosféry zejména výrazným poklesem nočních hodnot foF2 první a druhou noc po počátku ionosférické bouře. Tento jev byl ze sledovaných stanic relativně nejvýznamnější na stanici Průhonice (pokles o 43 %). Nejmenší odezvu zaznamenala stanice Řím (pokles o 20 %). Změna denních hodnot foF2 byla méně výrazná.

Dalším projevem vrstvy F2 byl vzestup výšky maxima elektronové koncentrace hmF2. Největší relativní vzestup nastal na stanici Řím (o 37 %), nejmenší odezva byla na stanici Průhonice (o 18 %). Průběh odezvy v Římě byl specifický tím, že na rozdíl od ostatních dvou sledovaných stanic vrchol nastal již první noc po počátku ionosférické bouře. Všechny hodnocené stanice zaznamenaly popisovanou událost a ionosférická odezva je na těchto stanicích poměrně výrazná.

7. ZÁVĚR

V práci jsem se zabývala studiem vztahu mezi sluneční aktivitou a charakteristikami zemské ionosféry. Sluneční aktivitu jsem vyhodnocovala pomocí Wolfova čísla charakterizujícího počet slunečních skvrn a pomocí hodnoty toku záření o vlnové délce 10,7 cm. Stav ionosféry jsem charakterizovala kritickou frekvencí vrstvy F2 a výškou maxima elektronové koncentrace této vrstvy, geomagnetickou aktivitu indexy Kp a Dst.

Procesy probíhající v ionosférou jsou velice složité a komplexní. Do ionosférických procesů zasahují velice významně další děje, jako je například geomagnetická aktivita či stav neutrální atmosféry. V teoretické části jsem popsala základní ionosférické ionizační a rekombinační procesy a charakteristiky jednotlivých ionosférických vrstev. Uvedla jsem i nejdůležitější rovnici popisující rozložení hustoty elektronové koncentrace v závislosti na výšce a možnost jejího použití pro vrstvy E a F1. Šíření elektromagnetických signálů je významně ovlivněno existencí vrstvy D (denní útlum), Es (odraz v nízké výšce) a E a F1 a F2. Vrstva F2 je vrstvou s nejvyššími hodnotami elektronové koncentrace a je proto naprosto zásadní pro rádiový přenos, použití GNSS a další technické aplikace.

V kapitole 3.6 jsem podala přehled geomagnetických indexů AE, Kp a Dst a možnost jejich využití. V kapitole 4 jsem se zaměřila na variabilitu ionosféry z hlediska ionosférických poruch, ionosférických bouří a dalších komplikovaných jevů. Věnovala jsem se dělení ionosféry podle geomagnetické polohy na ionosféru vysokých, středních a nízkých šířek. Vzhledem k úzké vazbě ionosféry na magnetosféru i sluneční vítr jsem v kapitole 5 popsala základní fakta o magnetosféře a slunečním větru. Parametry slunečního větru (jeho rychlost či hustota částic) jsou přímo závislé na sluneční aktivitě. Této závislosti jsem se v této kapitole rovněž věnovala.

Pro popis vazby mezi slunečními procesy a ionosférickými charakteristikami v středně až dlouhodobém měřítku jednoho slunečního cyklu jsem studovala korelaci mezi poledními hodnotami foF2 ze stanice Průhonice z let 1973-1984 a hodnotami Wolfova čísla a slunečního toku F10.7. Přestože sluneční aktivita není jediným procesem ovlivňujícím stav ionosféry, silná vazba mezi ionosférickými daty foF2 a solárními indexy byla prokázána vysokým korelačním koeficientem o hodnotách 0,73 (F10.7) a 0,80 (Wolfovo číslo) a naznačuje významný vliv slunečních procesů v středně a dlouhodobém měřítku. Dále jsem zjišťovala korelaci mezi hodnotami kritické frekvence vrstvy F2 na devíti různých stanicích a geomagnetickou šířkou dané stanice. Výsledný korelační koeficient se rovná -0,91 a jedná se o silnou závislost. Závislost hodnot kritické frekvence foF2 na geomagnetické šířce je v tomto případě výraznější než další charakteristiky stanic (nebo alespoň s nimi není v rozporu), jako jsou vzdálenost od moře, orografické, klimatické a další podmínky. Tyto vlivy rozhodně není možné zanedbávat, ba naopak, ovšem jejich studium přesahuje možnosti této práce.

V posledním oddíle praktické části práce jsem se zabývala odezvou ionosféry na ejekeci koronární hmoty Slunce, která nastala 1. 8. 2010, z hlediska průběhu kritické frekvence a výšky vrstvy F2. Koronární vyvržení hmoty bylo změřeno na satelitech pomocí změny magnetického pole, rychlosti větru atd. a dále se projevilo v hodnotách

geomagnetických indexů K_p a Dst . Ionosférická odpověď trvala přibližně dva dny a projevila se snížením maximální elektronové koncentrace ve vrstvě F2 v nočních hodinách a vzrůstem výšky $hmF2$ v nočních hodinách. Denní hodnoty $foF2$ byly oproti přechozím kontrolním klidným dnům sníženy. Tato reakce je oproti nočním datům o něco méně výrazná.

Rychlost odezvy činila několik hodin pro noční data, byla tedy poměrně vysoká. Rychlost odezvy denních dat nemá smysl vzhledem k času začátku události (17:40 UT) interpretovat, ale odezva byla následující den výrazná. Intenzita odezvy je na různých stanicích rovněž odlišná, přičemž čím větší odezva nastala ve snížení noční maximální elektronové koncentrace, tím menší se projevila ve vzrůstu výšky maximální elektronové koncentrace. Vzhledem k nízkému počtu studovaných stanic se z tohoto faktu nedá vyvozovat jednoznačný obecný závěr. Hodnoty $foF2$ a $hmF2$ ukázaly na silnou ionosférickou reakci nad všemi popsanými stanicemi. Snížení hodnot $foF2$ a zvýšení $hmF2$ potvrzuje teoretické předpoklady i ostatní pozorování, v tomto konkrétním případě se dá událost kategorizovat jako negativní ionosférická bouře.

Stav ionosféry je jedním z nejvýznamnějších faktorů, které ovlivňují šíření signálů z globálních satelitních navigačních systémů. Omezený rozsah bakalářské práce nedovolil věnovat se dalším charakteristikám ionosféry plně popisujícím zpoždění signálu na dráze satelit-přijímač. Modely používané pro ionosférické korekce ovšem vycházejí z charakteristik a dějů, které jsou v práci uvedené, dokonce se dá v budoucnosti očekávat jejich výraznější použití pro navigační systémy s vysokým rozlišením. Vzhledem k předpokládanému rozšíření použití GNSS v letecké navigaci bylo mým cílem porozumění chování v této části atmosféry. Rozšíření znalostí o ionosféře bude velmi přínosné v mém souběžném studiu.

POUŽITÁ LITERATURA

- [1] Margaret G.Kivelson, Christopher T.Russell: Introduction to Space Physics, 1995, Cambridge Atmospheric & Space Science Series
- [2] Michael C.Kelley: The Earth's Ionosphere: Plasma Physics and Electrodynamics, 2009, Academic Press
- [3] K.Scherer, H.Fichtner, B.Heber, U.Mall: Space Weather: The Physics Behind a Slogan, 2005, Springer
- [4] Margaret G.Kivelson, Christopher T.Russell: Introduction to Space Physics, 1995, Cambridge Atmospheric & Space Science Series
- [6] Reinish B.W., Huang X., Galkin I.A., Paznukhov V. and Kozlov A.: Recent advances in realtime analysis of ionograms and ionosond drift measurements with digisondes, 2005, J. Atmos. Sol.-Terr. Phys.,
- [7] Mošna Z., Šauli P.,Georgieva K.: Ionospheric Response to the Particular Solar Event as Seen in the Ionosphere Vertical Sounding. In WDS'09 - Proceedings of Contributed Papers. Part II: Physics of Plasmas and Ionized Media. (eds. J. Safrankova and J. Pavlu), Prague : MATFYZPRESS,
- [8] Buonsanto, M.J.: Ionospheric Storms – A Review. In Space Science Reviews, 1999. Kluwer Academic Publishers. Netherlands
- [9] Mosna, Z., Koucka Knizova, P., Georgieva, K., Kirov, B. The effects of different solar drivers on the ionosphere, Conference on Physics of the Sun “Solar and Solar-Terrestrial Physics – 2010“ 3-9 October 2010, Pulkovo, Saint Petersburg
- [10] B. Bidaine, R. Warnant: Ionosphere modelling for Galileo single frequency users: Illustration of the combination of the NeQuick model and GNSS data ingestion, Advances in Space Research 47 (2011) 312–322
- [11] Davies K., 1990. Ionospheric Radio. Peter Peregrinus Ltd., London, U.K.
- [12] Prölls G.W., Physics of the Earth's Space Environment, Springer, 2004;
- [13] Chen F.F., Úvod do fyziky plazmatu, Academia, Praha, 1984
- [14] Šauli, P., Mošna, Z., Kouba, D., Laštovička, J., Altadill, D. Comparison of true-height electron density profiles derived by POLAN and NHPC methods. Studia geophysica et geodaetica, 51, 3, 2007.
- [15] Šauli, P., Abry, P., Altadill, D., Boška, J., Detection of the wave-like structures in the F-region electron density: Two station measurements, Studia Geophysica et Geodetica, 50, 2006

[16] Hargreaves, J.K.: The Solar – Terrestrial Environment, Cambridge University Press, 1992

[17] Ústní sdělení Dan Kouba, ÚFA AV ČR

[18] Tascione, T.F., Introduction to the Space Environment, Krieger Publishing Company, Malabar, Florida, 1994

ELEKTRONICKÉ ZDROJE:

[e1] Šindelářová, Tereza: Horní atmosféra a ionosféra.

<http://www.ufa.cas.cz/html/meteo/lide/prezentace/sindelarova.ppt>

[e2] Fyzika inosféry

<http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/cionosphere.html>

[e3] Kulhánek, Petr: Sluneční vítr. http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_19_swi.php

[e4] Švanda, Michal: Sluneční fyzika - koróna, sluneční vítr
sirrah.troja.mff.cuni.cz/~svanda/AST001/lekce12.pdf

[e5] IGRF/DGRF Model Parameters and Corrected Geomagnetic Coordinates.

<http://omniweb.gsfc.nasa.gov/vitmo/cgm.html>

[e6] Hofman, Jiří: Nové maximum sluneční aktivity?

http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_07_sun.html

[e7] David P.Stern, Mauricio Peredo: The Exploration of Earth's magnetosphere

<http://www-spf.gsfc.nasa.gov/Education/wmap.html>

[e8] http://theory.physics.helsinki.fi/~plasma/ex10/Ionosphere_10.pdf

[e9] Mikulášek, Zdeněk, Krtička, Jiří: Základy fyziky hvězd

<http://astro.physics.muni.cz/download/documents/skripta/F4190.pdf>

[e10] http://www.ufa.cas.cz/html/upperatm/chum/disertace/kapitola1_obr_opr.pdf

[e11] <http://ulcar.uml.edu/digisonde.html>

[e12] <http://www.spaceweather.ac.cn/publication/jgrs/chinese/50/04/dzh.pdf> citace
5.10.2010

[e13] The ionosphere, radio navigation, and global navigation satellite systems Paul M.

Kintner, Brent M. Ledvina, Advances in Space Research 35 (2005) 788–811;

<http://gauss.gge.unb.ca/gpsworld/EarlyInnovationColumns/Innov.1991.04.pdf>

[e14] <http://sirrah.troja.mff.cuni.cz/~svanda/AST001/lekce12.pdf>

[e15] <http://www.ursi.org/Proceedings/ProcGA02/papers/p1480.pdf>

[e16] <http://rp.iszf.irk.ru/hawk/URSI2002/rsreview/28.pdf>

- [e17] <http://www.hao.ucar.edu/education/TimelineC.php>
- [e18] <http://www.letiste-cr.cz/aktuality/koncepce-letecke-navigace-ceske-republiky-v-obdobi-do-roku-2020.aspx>
- [e19] www.wikipedia.org
- [e20] <http://atrey.karlin.mff.cuni.cz/~marble/d/?p=1#t1>

ZDROJE OBRÁZKŮ

- Obrázek [o1] http://theory.physics.helsinki.fi/~plasma/ex10/Ionosphere_10.pdf
- Obrázek [o2] http://www.tpub.com/content/et/14092/css/14092_13.htm.
- Obrázek [o3] Johnson, C.Y., Ionospheric composition and density from 90 to 1200 kilometers at solar minimum, Journal of Geophysical Research, 71, 330, 1966
- Obrázek [o4] <http://ulcar.uml.edu/DPS.htm>
- Obrázek [o5] <http://www.ufa.cas.cz/html/climaero/topics/ionosphere.html>
- Obrázek [o7] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Eej_cm4.png
- Obrázek [o8] http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/dst_index
- Obrázek [o9] http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/dst_index
- Obrázek [o10] http://roma2.rm.ingv.it/en/themes/23/geomagnetic_indices/27/kp_index
- Obrázek [o11] Doluchanov, M.P., Šíření radiových vln, SNTL, Praha, 1955
- Obrázek [o12] <http://www.geofisica.unam.mx/divulgacion/geofinternacional/iframes/anteriores/1997/02/martnez.html>
- Obrázek [o13] <http://rosettaster.files.wordpress.com/2008/12/magnetosphere.jpg>
- Obrázek [o14] <http://oberon.troja.mff.cuni.cz/vp/index1.htm>
- Obrázek [o15] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_19_swi.php
- Obrázek [o16] http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_07_sun.html
- Obrázek [o26] <http://www.nasa.gov/topics/solarsystem/sunearthsystem/main/News080210cme.html>

