

# Promjene u Zemljinoj termosferi tijekom geomagnetskih poremećaja u završnoj fazi 23. Sunčevog ciklusa

---

**Martinić, Karmen**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2020**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:534939>

*Rights / Prava:* [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

*Download date / Datum preuzimanja:* **2025-03-14**



*Repository / Repozitorij:*

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Karmen Martinić

**PROMJENE U ZEMLJINOJ TERMOSFERI  
TIJEKOM GEOMAGNETSKIH  
POREMEĆAJA U ZAVRŠNOJ FAZI 23.  
SUNČEVOG CIKLUSA**

Diplomski rad

Zagreb, 2020.

Sveučilište u Zagrebu  
Prirodoslovno-matematički fakultet  
Geofizički odsjek

Diplomski sveučilišni studij Fizika – Geofizika  
Smjer: Seizmologija i fizika čvrste Zemlje

**Karmen Martinić**

Diplomski rad

**Promjene u Zemljinjnoj termosferi tijekom  
geomagnetskih poremećaja u završnoj fazi  
23. Sunčevog ciklusa**

Voditeljica diplomskog rada: izv. prof. dr. sc. Giuliana Verbanac

Povjerenstvo: 1. \_\_\_\_\_  
2. \_\_\_\_\_  
3. \_\_\_\_\_

Ocjena diplomskog rada: \_\_\_\_\_

Zagreb, 2020.

Zahvaljujem mentorici izv. prof. dr. sc. Giuliani Verbanac na pomoći i stručnim savjetima prilikom izrade ovog rada.

Fola Matera-i, Čali, Nini i Nikoli ća su me trpili kad san bila nemoguća. Bez njihovega razumijevoŋjo i podrške jo bin bila bez rada i dipluome.

## Sažetak

Kako bismo ispitali odgovor termosfere na pojačanu geomagnetsku aktivnost koja je posljedica brzih struja Sunčevog vjetra (engl. high-speed streams, HSS) i dodatno ga proučili, primijenjena je metoda poprečne korelacije. Promatrani vremenski period obuhvaća 100 dana u završnoj fazi 23. Sunčevog ciklusa; preciznije od 25. siječnja do 5. svibnja 2005. godine. Poremećaji u geomagnetskom polju su iskazani trima geomagnetskim indeksima AE, ap i Dst. Korišteni su podaci neutralne gustoće termosfere duž putanje GRACE satelita normalizirani na visinu od 490 km. U cilju proučavanja odgovora dnevne i noćne strane termosfere na pojačanu geomagnetsku aktivnost, podaci su podijeljeni s obzirom na lokalno vrijeme (engl. skraćenica LT) u dvije skupine:  $LT=8-16$  h i  $LT=20-4$  h. Kako bismo eventualno uočili i kvantitativno opisali globalnu preraspodjelu energije podaci su podijeljeni s obzirom na latitudu, na tri pojasa: pojas visokih, srednjih i niskih latituda. Neovisno o LT-u i promatranom latitudinalnom pojasu najveća korelacija je izračunata za indeks Dst, a najmanja za indeks ap. Također, veće su korelacije dobivene za noćnu nego za dnevnu situaciju. Svi izračunati vremenski posmaci su pozitivni što ukazuje na to da ekspanzija termosfere nastaje kao posljedica povećane konvekcije plazme te povećanja Jouleove topline u polarnim predjelima za vrijeme pojačane geomagnetske aktivnosti. Za dnevnu situaciju vremenski posmaci su najmanji za korelaciju geomagnetskih indeksa i gustoće visokog latitudinalnog pojasa, a najveći za korelaciju geomagnetskih indeksa i gustoće niskog latitudinalnog pojasa što ukazuje na postojanje mehanizma globalne preraspodjele energije. S druge strane, vremenski posmaci za noćnu situaciju za srednji latitudinalni pojas su veći nego za niski pa ne možemo donositi zaključke o fenomenu premještanja poremećaja od polova prema ekvatoru. U skladu s time, zabilježeni putujući atmosferski poremećaji (engl. skraćenica TADs) su znatno vidljiviji na dnevnoj strani, a procijenjena brzina propagacije iznosi 700 m/s. Ovaj rad doprinosi boljem razumijevanju odaziva Zemljine termosfere na promjene u interplanetarnom prostoru, predikciji svemirskog vremena te poboljšanju postojećih modela termosfere i ionosfere.

Ključne riječi: geomagnetska aktivnost, metoda poprečne korelacije, Jouleova toplina, termosfera, putujući atmosferski poremećaji

# Changes in the Earth's Thermosphere during geomagnetic disturbances in the declining phase of Solar cycle No. 23

## Abstract

In order to confirm and further examine the correlation between increased geomagnetic activity induced by Solar wind high-speed stream events (HSS), the cross-correlation method was performed. The focus was on the period between 25th of January 2005. and 5th of May 2005., which is a declining phase of the solar cycle No 23. Magnetic field disturbances were represented by three geomagnetic indices AE, ap and Dst. Furthermore, to represent the response of the thermosphere we used densities derived from the accelerometer measurements on the GRACE satellite, normalised to an average altitude of 490 km. To distinguish the differences in response to the increased geomagnetic activity between day-side and night-side thermosphere, the data was divided into two groups depending on their local time (LT): LT=8-16 h and LT=20-4 h. Moreover, the data was divided into three groups according to their geodetic latitudes: high, medium and low latitude range to eventually detect and quantitatively describe global energy redistribution, from a source in the polar region to the near equator region. The analysis showed the greatest correlation for Dst geomagnetic index and smallest correlation for ap geomagnetic index, regardless the LT and latitudinal range. Also, the greater correlation was calculated between the indices and the densities for night-side thermosphere then for the day-side thermosphere. Time lags calculated from cross-correlation analysis are positive for all correlation taken into consideration, which confirms our expectations. The thermospheric expansion is a result of enhanced plasma convection and great energy input of the Joule heating near the polar latitudes in times of increased geomagnetic activity. Furthermore, time lags for the day-side situation are the smallest for high latitude range and the greatest for the low latitude range, which suggests the existence of equatorward transport of density disturbances. Diversely, greater time lags are calculated for medium latitude range then for low latitude range for the night-side. Therefore, observed travelling atmospheric disturbances (TADs) are more distinct on the day-side, with the average propagation speed of 700 m/s. This study contributes to the better understanding of Earth's thermospheric response to changes in the interplanetary space, aims towards improved space weather predictions and more accurate thermospheric-ionospheric models.

Keywords: increased geomagnetic activity, cross-correlation method, Joule heating, thermosphere, travelling atmospheric disturbances

# Sadržaj

<b>1. Uvod</b>	<b>1</b>
<b>2. Teorijska pozadina</b>	<b>4</b>
2.1 Sunce . . . . .	4
2.1.1 Koronine šupljine i brze struje Sunčevog vjetra . . . . .	4
2.2 Termosfera . . . . .	5
2.2.1 Zagrijavanje termosfere . . . . .	7
2.2.2 Putujući atmosferski poremećaji . . . . .	8
2.3 Magnetsko polje Zemlje . . . . .	8
2.3.1 Geomagnetski indeksi . . . . .	9
2.4 Geosferske oluje . . . . .	10
<b>3. Analiza podataka i metoda</b>	<b>12</b>
3.1 Podaci . . . . .	12
3.2 Metoda . . . . .	13
3.2.1 Identifikacija poremećaja . . . . .	13
3.2.2 Analiza odaziva . . . . .	16
3.2.3 Poprečna korelacija . . . . .	17
<b>4. Rezultati</b>	<b>20</b>
<b>5. Diskusija</b>	<b>35</b>
<b>6. Zaključak</b>	<b>39</b>
<b>Literatura</b>	<b>41</b>
<b>Dodatci</b>	<b>43</b>
<b>A Popis kratica</b>	<b>43</b>
<b>B Krivulje poprečne korelacije</b>	<b>44</b>
<b>C Programi i podaci priloženi na CD-u</b>	<b>47</b>

# 1. Uvod

Svemirsko vrijeme (engl. *space weather*) je relativno mlada znanstvena disciplina koja svoje početke duguje lansiranju Sputnika 1957. godine, a i danas privlači veliki interes znanstvene zajednice. Glavni predmet istraživanja je sustav Sunce-Zemlja čije međudjelovanje ima veliki utjecaj na ljude i tehnologiju. Jedan od primjera takve interakcije je solarni vjetar – konstantni tok nabijenih čestica koji sa Sunca dolazi do Zemljine okoline i mijenja je. Osim Sunčevog vjetra, dinamiku Sunca pa tako i svemirsko vrijeme uvjetuju i mnoge druge pojave s površine Sunca kao što su solarne baklje, koronini izbačaji mase (engl. coronal mass ejection, CME) i brze struje Sunčevog vjetra (engl. high-speed streams, HSS). Pojavnost i intenzitet ovih događaja ovise o fazi Sunčevog magnetskog ciklusa koji traje otprilike dvadeset dvije godine, a prilikom kojeg dolazi do obrtanja magnetskih polova na Suncu. Početak svakog ciklusa karakterizira minimalna aktivnost tijekom koje je magnetsko polje Sunca najslabije dipolnoj konfiguraciji polja sa središtem dipola u središtu Sunca. Maksimum Sunčeve aktivnosti se postiže tri do četiri godine nakon početka ciklusa i tada se javlja najveći broj CME-ova. U minimumu aktivnosti i opadajućoj fazi Sunčeva ciklusa, dinamiku sustava Sunce-Zemlja uvelike određuju upravo HSS. Izvor HSS-a su koronine šupljine (engl. coronal holes, CH) - tamna i hladna područja male gustoće plazme (u odnosu na okolinu). Budući da su CH, pa tako i HSS, stabilne i dugotrajne pojave, upravo su one često predmet istraživanja u kontekstu svemirskog vremena (Verbanac i sur., 2011a,b; Temmer i sur., 2007; Vršnak i sur., 2007).

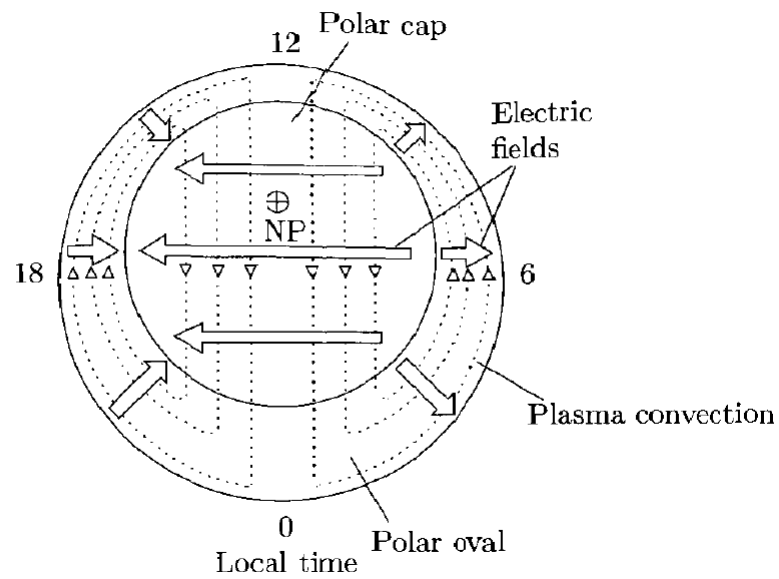
Kada postoji negativna  $B_z$  komponenta interplanetarnog magnetskog polja (engl. interplanetary magnetic field, IMF) koji zbog principa zamrznutosti polja u plazmi dolazi s nabijenim česticama sa Sunca do Zemljine magnetosfere, javlja se magnetska rekonekcija. Ona omogućava ulazak plazme sa Sunca u Zemljinu magnetosferu, a potom i u sustav ionosfera-termosfera (IT). Općenito, u polarnim predjelima razlikujemo područje polarne kape na najvišim širinama i područje polarnog ovala koji zapravo okružuje polarnu kapu i nalazi se na nižim širinama, slika 1.1. Ova se područja razlikuju s obzirom na električna polja i pripadna driftna gibanja, s obzirom na količinu upada nabijenih čestica i najvažnije, s obzirom na dominantnu populaciju precipitirajućih nabijenih čestica. Kao posljedica prodora različitih čestica u pojedine dijelove promatranog sustava polarne kape i polarnog ovala, javlja se razlika električnog potencijala, a sukladno tome dolazi do pojave tzv. polarnog električnog polja, smjerovi naznačeni punim strelicama na slici 1.1. Treba naglasiti da je smjer ovog polja uvijek okomit na smjer magnetskog polja, a kao posljedica postojanja ova dva, međusobno okomita polja nastaje driftno gibanje plazme. Uvriježeni naziv za driftno gibanje plazme u prisustvu električnog i magnetskog polja, tzv.  $\vec{E} \times \vec{B}$  drift u polarnim širinama je *konvekcija plazme*. Smjerovi gibanja plazme su naznačeni isprekidanim li-



nijama na slici 1.1. U polarnoj kapi konvekcija plazme kreće od one strane Zemlje koja je okrenuta prema Suncu, dakle od  $LT=12$  h prema  $LT=0$  h (slika 1.1), dok se plazma u polarnom ovalu kreće u suprotnom smjeru, od  $LT=0$  h prema  $LT=12$  h. Pritom, nastaju dvije zatvorene konvektivne ćelije, jedna u području zore (desni dio slike 1.1.), a druga u području sumraka (lijevi dio slike 1.1).

Zbog sudaranja nabijenih čestica koje se gibaju driftnom brzinom i neutrala dolazi do povećanja vodljivosti ionosfere. Ova povećana vodljivost olakšava tok struje između magnetosfere i ionosfere što u konačnici rezultira povećanom disipacijom energije u vidu Jouleove topline. Osim povećane vodljivosti, povećanju energije područja visokih latituda doprinosi i sam prodor visokoenergetskih čestica Sunčeva vjetra (engl. *particle heating*). Ova dva procesa značajno utječu na globalnu dinamiku IT sustava. Tako na primjer kao odgovor na ovakav nagli unos velike količine energije u IT sustav, dolazi do pobude širokog spektra težinskih valova od kojih se oni velikih valnih duljina dalje propagiraju prema ekvatoru. Ovakvi valni poremećaji se nazivaju *putujući atmosferski poremećaji* (engl. *travelling atmospheric disturbances*, skraćenica TADs) i glavni su mehanizam preraspodjele energije u termosferi vezane uz magnetske oluje i podoluje na globalnoj skali.

Budući da izravna veza HSS-ova i gustoće termosfere nije bila predmet velikog broja do sada objavljenih istraživanja, cilj ovog diplomskog rada je ispitati kakav je utjecaj magnetskih oluja i podoluja uzrokovanih upravo HSS-ovima na poremećaje u termosferi. Utvrđena je pojavnost TAD-ova kao glavnog mehanizma prijenosa energije od polarnih k ekvatorijalnim širinama i ispitan je njihov transport na dnevnoj i noćnoj strani Zemlje. Također, procijenjena je brzina propagacije TAD-ova na temelju izračunatog perioda vremenskog odaziva atmosfere za različite latitudinalne pojaseve. Kako se povećanje gustoće neutrala dovodi u vezu s povećanjem otpora (engl. *drag force*) letjelica u Zemljinoj okolini, dolazi do pada letjelica u orbiti (Oliveira i Zesta, 2019; Krauss i sur., 2018; Krauss i sur., 2015). U okviru svemirskog vremena konstantno se radi na poboljšanju razumijevanja i unaprijeđenju mogućnosti predikcije (prognoze) upravo sile otpora na letjelice u Zemljinoj orbiti (npr. sateliti za navigaciju, međunarodna svemirska postaja...) za vrijeme geomagnetskih poremećaja. Dobiveni rezultati i iz njih izvedeni zaključci mogu doprinijeti točnijoj prognozi sile otpora što na koncu dovodi do mogućnosti preciznijeg povratka letjelica nakon isteka njihova trajanja, sprječavanja sudara letjelica i u konačnici produženje trajanja misija (Oliveira i Zesta, 2019 i tamo navedene reference).



Slika 1.1. Električna polja i konvekcija plazme u polarnom području na visokim širinama. NP označava sjeverni magnetski pol. Preuzeto iz Prölss i Bird (2004)

## 2. Teorijska pozadina

### 2.1 *Sunce*

U kontekstu Hertzsprung-Russellovog dijagrama koji povezuje boju, sjaj i temperaturu zvijezda, Sunce je tipična zvijezda glavnog niza. Masa Sunca iznosi  $1.989 \times 10^{30}$  kg, površinska temperatura je 5 785 K dok je radijus  $6.690 \times 10^8$  m (Karttunen i sur., 2006). Kao i ostali žuti patuljci, Sunce energiju stvara u jezgri izgaranjem vodika u helij. Energija stvorena ovim fuzijskim procesom se prenosi prema površini zračenjem i konvekcijom.

Sunčeva aktivnost uvelike je određena dvadesetdvo godišnjim magnetskim ciklusom tijekom kojeg dolazi do obrtaja magnetskih polova na Suncu, odnosno do promjene polariteta. Pravilne varijacije broja Sunčevih pjega i njihova položaja prvi put su uočene početkom 18. stoljeća. Maksimum Sunčeve aktivnosti, tri do četiri godine nakon početka ciklusa, karakterizira veliki broj Sunčevih pjega tipičnog radijusa oko 10 000 km i vremenskog trajanja par dana do par mjeseci. One se najčešće javljaju u skupinama na otprilike  $30^\circ - 40^\circ$  heliografske širine i s napredovanjem ciklusa kreću prema ekvatoru. S druge strane, minimum Sunčeve aktivnosti je povezan s minimalnim brojem Sunčevih pjega. Osim u vidu Sunčevih pjega aktivnost se manifestira i drugim pojavama pa se tako oko maksimuma aktivnosti tipično javljaju CME-ovi. To je naglo oslobađanje ili erupcija velike količine plazme vezane uz magnetske silnice s površine Sunca u interplanetarni prostor. Tipičan primjer Sunčeve aktivnosti su također i HSS-ovi koji se javljaju oko minimuma Sunčeve aktivnosti.

#### 2.1.1 Koronine šupljine i brze struje Sunčevog vjetra

Koronine šupljine su tamna područja Sunčeve atmosfere jako niske gustoće plazme iz kojih izlaze magnetske silnice usmjerene okomito prema van u interplanetarni prostor. Promatranjem korone u vidljivom dijelu spektra ne možemo uočiti CH. Razlog leži u temperaturi korone koja iznosi oko  $10^6$  K što je puno više od tipične površinske temperature fotosfere, a plazma na ovako visokim temperaturama emitira zračenje pretežno u UV i X dijelu elektromagnetskog spektra (Cranmer, 2001). Jako je važno proučavati koronine šupljine budući da su one izvor brzog Sunčevog vjetra. Nabijene čestice i elektroni stalno "bježe" iz korone zbog razlike tlakova između nje i interplanetarnog prostora, a ovaj stalni tok čestica nazivamo Sunčev vjetar. Prosječna brzina Sunčevog vjetra je 450 km/s, dok je prosječna brzina HSS-a koji izvor ima upravo u koroninim šupljinama oko 750 km/s. Iako se brzi Sunčev vjetar povezuje s CH na visokim heliografskim širinama, one se ponekad javljaju i na nižim heliografskim širinama koje su inače karakterizirane sporim Sunčevim vjetrom. HSS uzrokuje srednje jaku i ponavljajuću geomagnetsku aktivnost koja relativno dugo traje (Vršnak i sur., 2007). Ovakvu

aktivnost, pogotovo u opadajućoj fazi Sunčevog ciklusa uvjetuju i korotirajuća područja interakcije (engl. *co-rotating interacting regions*, skraćeno CIR) koja se stvaraju ispred HSS-ova - brzi vjetar dostiže sporiji, a kao posljedica njihove interakcije dolazi do kompresije plazme, odnosno povećanja gustoće i pojačanja magnetskog toka predvođenog sporog vjetra (Richardson, 2004).

## 2.2 Termosfera

Najopćenitija podjela atmosfere s obzirom na temperaturni profil je na donju, srednju i gornju (visoku) atmosferu. Donja obuhvaća troposferu, srednju čine stratosfera i mezosfera, dok gornja obuhvaća termosferu. Termosfera počinje na otprilike 100 km visine i karakterizira je povećanje temperature do visine od otprilike 200 km. Povećanje temperature je posljedica apsorpcije Sunčeva zračenja valnih duljina manjih od 242 nm u kombinaciji s izostankom efektivnog gubitka topline. U atmosferi, u cilju održavanja toplinske ravnoteže, postoje načini gubitka i preraspodjele topline. U nižim predjelima (do  $\sim 150$  km) dominira radijacijsko hlađenje - gubitak topline u obliku vibracijskih i rotacijskih modova sastojaka atmosfere. U višim predjelima dominira proces molekularnog vođenja topline. Nakon otprilike 200 km temperatura se asimptotski približava konstantnoj vrijednosti, najčešće oko 1 000 K, ali može varirati između 600 K i 2 500 K. Ova konstantna temperatura se naziva temperatura termopauze i nerijetko se u literaturi označava s  $T_\infty$ . Potrebno je naglasiti kako se temperature iona i elektrona razlikuju od temperature neutralnih čestica na koje se odnosi profil prikazan na slici 2.1. Temperatura elektrona se značajnije povećava u odnosu na temperaturu neutrala već nakon otprilike 150 km. Slično, temperatura iona pokazuje značajniji rast u odnosu na neutrals nakon otprilike 350 km. Ovo sugerira da je izvor topline za ione i elektrone u višim dijelovima (plazmasferi) i da su glavni izvor topline za neutrals nakon 350 km upravo ioni i elektroni atmosfere (Prölss i Bird, 2004).

Vertikalni profil temperature  $T$ , gustoće  $\rho$  i tlaka  $p$  se nalazi na slici 2.1. Broj čestica  $N$  pa tako i brojna gustoća  $n$  (engl. *particle number density*) koja je definirana jednadžbom

$$n = \lim_{\Delta V \rightarrow dV} \frac{\Delta N}{\Delta V}, \quad (2.1.)$$

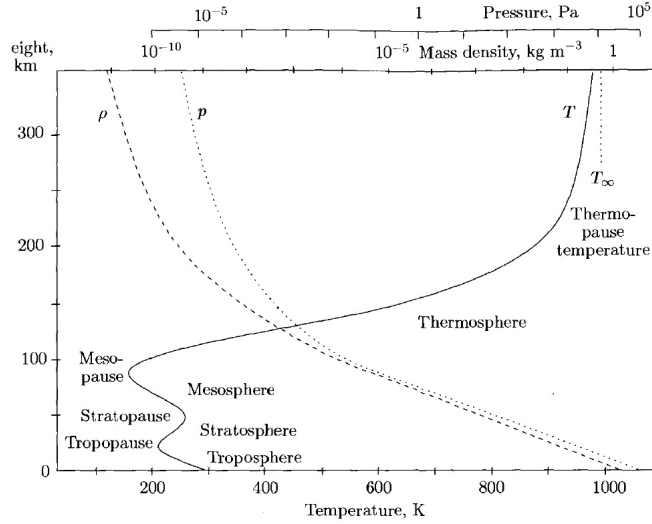
gdje je  $\Delta V$  djelić promatranog volumena, opadaju s porastom visine. U termosferi je dominantni sastojak atomski kisik, a slijede ga molekularni dušik, kisik, helij i argon. Na slici 2.2. prikazan je vertikalni profil gustoće pojedinih sastojaka atmosfere na visini između 100 i 500 km.

Dinamika termosfere je u najvećoj mjeri određena Zemljinom rotacijom, međutim, njoj su superponirana i mnoga druga gibanja od kojih su najvažniji globalna cirkulacija i atmosferski valovi. Postoji razlika u temperaturi i gustoći između dnevne i noćne

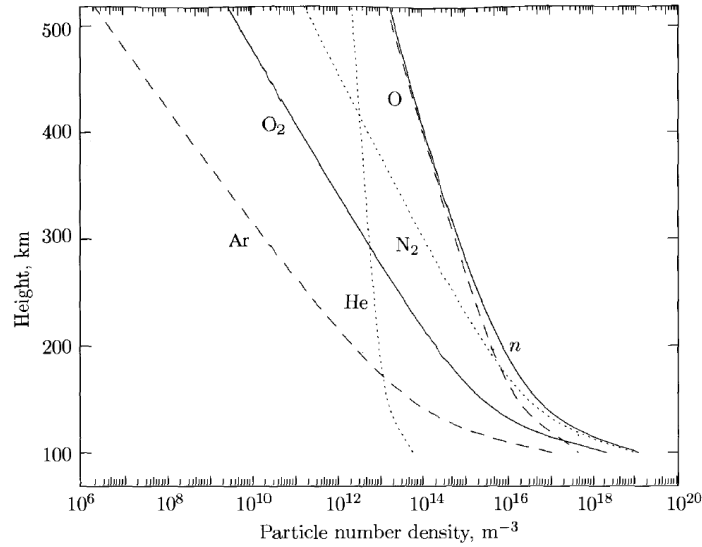
strane termosfere, a kao posljedica nastaje razlika tlakova koja podržava dnevno-noćne vjetrove koji se zbog svoje 24-satne periodičnosti često nazivaju plimni vjetrovi (engl. *tidal winds*). Na visokim geografskim širinama od velike su važnosti vjetrovi koji su uzrokovani sudaranjem sastojaka neutralne atmosfere s nabijenim česticama koje pokazuju driftno gibanje. Takav horizontalni vjetar nazivamo *drift-induced wind* i on je superponiran na dnevno-noćnu cirkulaciju visoke atmosfere. Jednadžba gibanja 2.2. obuhvaća sve relevantne doprinose gibanju u termosferi. Vektorom  $\vec{u}$  označena je resultantna brzina toka, dakle  $\vec{u} = u_x\hat{x} + u_y\hat{y} + u_z\hat{z}$ , x-os pokazuje smjer istoka, y-os pokazuje smjer sjevera, a z-os gleda vertikalno prema gore.  $\vec{u}_h$  predstavlja horizontalnu komponentu brzine i vrijedi  $\vec{u}_h = u_x\hat{x} + u_y\hat{y}$ . S lijeve strane jednadžbe se nalazi totalni ili Lagrangeovski diferencijal koji se može rastaviti prema relaciji 2.3. S desne strane prvi član predstavlja silu gradijenta tlaka, drugi viskoznost, treći gravitaciju, četvrti silu otpora (engl. ion drag force) i posljednji član predstavlja doprinos Coriolisove sile.

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \eta \frac{\partial^2 \vec{u}_h}{\partial z^2} + \rho g + \rho \nu_{n,i} (\vec{u}_i - \vec{u}) + 2\rho \vec{u} \times \Omega_E \quad (2.2.)$$

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + (\vec{u}\nabla) \quad (2.3.)$$



Slika 2.1. Vertikalni profil temperature  $T$ , tlaka  $p$  i gustoće  $\rho$  u Zemljinoj atmosferi. Slika je preuzeta iz Prölss i Bird (2004)



Slika 2.2. Vertikalni profil brojne gustoće pojedinih sastojaka atmosfere i ukupne brojne gustoće označene s  $n$ . Slika je preuzeta iz Prölss i Bird (2004)

### 2.2.1 Zagrijavanje termosfere

U sudarima neutralnog plina i nabijenih čestica u driftnom gibanju, dolazi do akceleracije neutrala u svim smjerovima. Na ovaj način se povećava nasumično ili termičko gibanje molekula i atoma što je ekvivalent unosu topline u promatrani sistem. Efektivni prijenos topline ovisi o kvadratu relativne brzine čestica koje sudjeluju u sudarima, pa tako što je brzina iona u odnosu na neutrale veća, to je unos topline veći. Ovaj proces možemo kvantizirati u kontekstu Jouleove topline. Zbog protoka struje vodičem dolazi do povećanja topline po jedinici volumena i vremena koje je dano relacijom

$$q_J = \vec{j} \cdot \vec{E} = \sigma_P E^2. \quad (2.4.)$$

$\vec{j}$  je jakost struje,  $\vec{E}$  je električno polje, a  $\sigma_P$  je električna vodljivost. Indeks P u električnoj vodljivosti označava Pedersonovu struju. U prisustvu vanjskog magnetskog polja, u plazmi dolazi do pojave dviju međusobno okomitih struja: Hallove struje koja je okomita na električno i magnetsko polje i Pedersonove struje koja je okomita samo na magnetsko polje. Zbog skalarnog umnoška u gornjoj relaciji možemo zaključiti da samo Pedersonova struja doprinosi stvaranju Jouleove topline.

### 2.2.2 Putujući atmosferski poremećaji

U termosferi osim zvučnih (engl. *acoustic*) nalazimo i uzgonske (težinske) (engl. *gravity*) valovi. Ulogu povratne sile kod težinskih valova preuzimaju sila gradijenta tlaka i gravitacija. Treba razlikovati posebnu vrstu težinskih valova- *internal gravity waves* (engl. skraćena IGW) frekvencije  $\omega < \omega_g$ , gdje je  $\omega_g$  Brunt–Väisälä frekvencija. IGW, uzrokovani naglom ekspanzijom termosfere u polarnim područjima koja je pak posljedica naglog unosa energije u vidu Jouleove topline u vrijeme pojačane geomagnetske aktivnost, su već spomenuti TAD-ovi. S obzirom na horizontalnu skalu pobuđenih valova razlikujemo male (engl. *small to medium scale*),  $\lambda < 1000$  km i velike (engl. *large scale*),  $\lambda > 1000$  km TAD-ove. Veliki TAD-ovi imaju periode reda veličine jedan sat, dok im brzina propagacije prema ekvatoru može iznositi i do 800 m/s (Prölss i Bird, 2004). Kao takvi, prema Bruinsma i Forbes (2008) predstavljaju ključni mehanizam za globalnu preraspodjelu energije koja za vrijeme geomagnetskih oluja i podoluja ulazi u Zemljinu atmosferu u auroralnim područjima.

## 2.3 Magnetsko polje Zemlje

Geomagnetsko polje ima ulogu štita koji sprječava ulazak nabijenih čestica u Zemljinu atmosferu i omogućuje njezino postojanje. Područje u kojem dominira utjecaj geomagnetskog polja nazivamo magnetosfera. Za generiranje vlastitog magnetskog polja planeta, nužno je postojanje tekućeg vodljivog medija koji se nalazi u početnom magnetskom polju. Brzina rotacije planeta mora biti dovoljna da bi gibanje tog tekućeg, vodljivog medija i usmjerila. Održavanje magnetskog polja objašnjeno je teorijom *geomagnetskog dinama*. To je koncept kojeg su sredinom 20. stoljeća predložili Walter M. Elsasser i Edward Bullard, a danas je najprihvatljivija teorija o samoodržavanju magnetskog polja Zemlje. Gibanja u Zemljinoj vanjskoj jezgri su podržana termičkom konvekcijom koja je posljedica dizanja lakših komponenti prema granici jezgre i plašta (engl. *core-mantle boundary*, skraćena CMB) i kristalizacijom ohlađenih komponenti na granici unutarne i vanjske jezgre.

U prvoj aproksimaciji geomagnetsko polje možemo poistovjetiti s magnetskim poljem dipola koji je smješten u središtu Zemlje, a os mu je nagnuta za  $11^\circ$  u odnosu na Zemljinu os rotacije. Osim glavnog (unutarnjeg) polja, razlikujemo još dva doprinosa

ukupnom geomagnetskom polju, a to su vanjsko polje kojemu doprinose struje ionosfere i magnetosfere te polje kore tj. polje magnetskih stijena i minerala u Zemljinoj kori. Jakost magnetskog polja najveća je na polovima i iznosi oko 60 000 nT, a na ekvatoru je najmanja i iznosi oko 30 000 nT. Jačina magnetskog polja je vektorska veličina, a vektor geomagnetskog polja se u literaturi najčešće označava s vektorom  $\vec{F}$ . Za kompletni prikaz se često koriste tri komponente, najčešće u kartezijском sustavu s komponentama X (smjer sjevera), Y (smjer istoka) i Z (vertikalno dolje) ili pak cilindričnom sustavu s komponentama (H, D, Z). H komponenta je horizontalna komponenta polja i računa se kao  $\sqrt{X^2 + Y^2}$ , dok je deklinacija D kut koji zatvaraju X i H komponenta geomagnetskog polja. Treći sustav koji se u praksi često koristi je sustav komponenti (F, D, I) gdje je I inklinacija - kut koji zatvara vektor magnetskog polja  $\vec{F}$  s horizontalnom komponentom H.

### 2.3.1 Geomagnetski indeksi

Geomagnetski indeksi kvantiziraju geomagnetske poremećaje. Svaki od njih je određen na temelju podataka s određenog broja geomagnetskih opservatorija. Iako su svi mjera jačine geomagnetskih poremećaja, svaki je svojstven s obzirom na karakteristiku aktivnosti koju najbolje odražava tj. svaki od indeksa najbolje opisuje geomagnetsko stanje pojedinog latitudinalnog pojasa (npr. polarni, ekvatorijalni...).

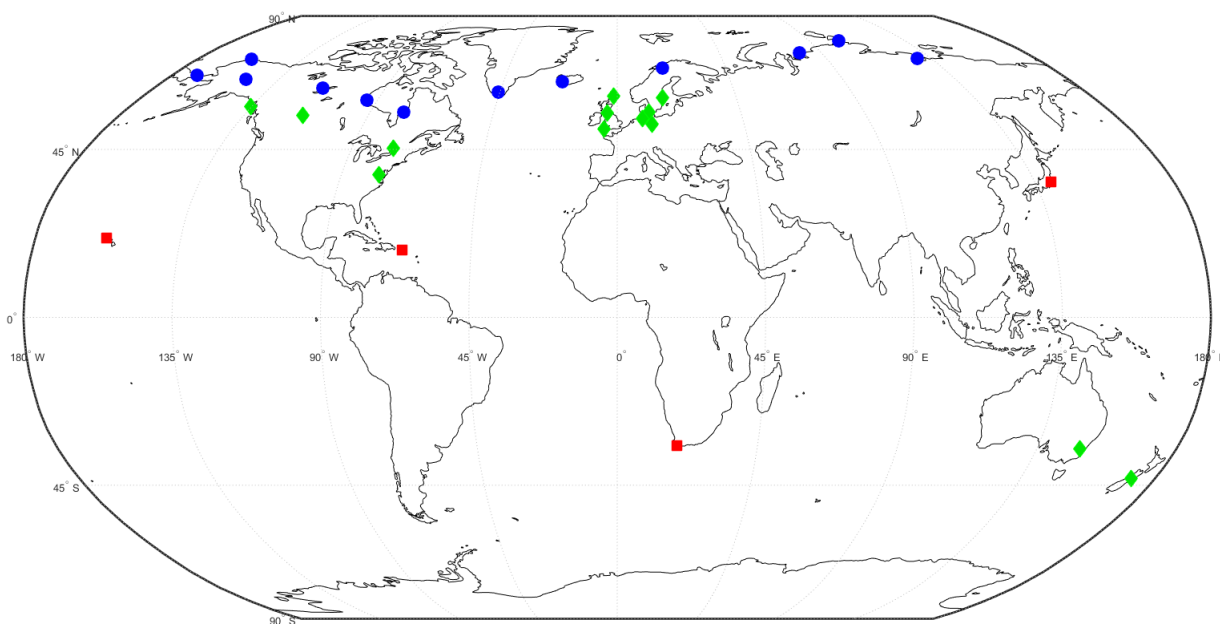
Tako na primjer indeks Dst najbolje odražava stanje prstenaste struje magnetosfere. Nagli pad koji bilježi horizontalna komponenta H za vrijeme geomagnetskih oluja sugerira pojačanje prstenaste struje (engl. *ring current*). Drugi naziv za indeks Dst je *storm index*, a sam naziv upućuje da ovaj indeks opisuje razvoj magnetske oluje. Najprije dolazi do porasta indeksa Dst uslijed kompresije na magnetosferi koja je uzrokovana porastom tlaka zbog naleta Sunčevog vjetra, zatim slijedi nagli pad indeksa kao posljedica pada horizontalne komponente H, a u konačnici slijedi faza oporavka gdje indeks Dst pokazuje polagani rast (Campbell, 2003). Indeks Dst se računa pomoću mjerenja na četiri opservatorija (slika 2.3) kao jednosatna srednja vrijednost devijacije horizontalne komponente H u odnosu na referentnu vrijednost mirnog vremena (engl. *quiet time*) uz uvažavanje relativnog položaja opservatorija s obzirom na geomagnetski ekvator (Pröls i Bird, 2004).

Indeks ap je trosatni geomagnetski indeks koji se izračunava direktno iz vrijednosti indeksa Kp. Indeks Kp je uveo J. Bartels 1949. godine, a dobiva se kao srednja vrijednost poremećaja dviju horizontalnih komponenti zabilježenog na 13 geomagnetskih opservatorija čije su lokacije prikazane na slici 2.3. Konverzija iz Kp u ap indeks je napravljena tako da na stanici na otprilike 50° geomagnetske širine ap predstavlja raspon na onoj horizontalnoj komponenti koja je najveće poremećena u jedinicama od 2 nT (preuzeto s <https://www.gfz-potsdam.de/en/kp-index/>). Magnetska aktivnost u umjerenim širinama posljedica je utjecaja polarnih elektrojet struja (engl. *polar*



*electrojet currents*), prstenaste struje magnetosfere, ali i struja koje prate silnice geomagnetskog polja (engl. *field aligned currents*). Budući da postoji čitav niz doprinosa, ovaj indeks dobro odražava općenito stanje magnetske aktivnosti (pa tako i ukupnu količinu energije koja je unesena putem Sunčeva vjetra u Zemljinu okolinu) (Prölss i Bird, 2004).

Indeks AE (engl. *auroral electrojet index*) kvantizira aktivnost elektromlaznih struja u auroralnom području. Najopćenitije govoreći, ovaj indeks predstavlja mjeru geomagnetske aktivnosti na visokim geografskim širinama. Računa se kao razlika između Indeksa AU (engl. *upper auroral index*) i indeksa AE (engl. *lower auroral index*)- AU-AE, koji su pak gornja i donja ovojnica krivulje koja predstavlja horizontalnu geomagnetsku komponentu H, ali tako da je prethodno uklonjen utjecaj regularnih varijacija (Prölss i Bird, 2004). Najčešće se pri izračunu ovog indeksa koriste mjerenja s 10-12 opservatorija koji su također prikazani na slici 2.3.



Slika 2.3. Opservatoriji čija mjerenja ulaze u određivanje indeksa Dst (crveni kvadratići), ap (zeleni rombići) i AE (plavi kružići) indeksa.

## 2.4 Geosferske oluje

Geosferske oluje (engl. *geospheric storms*) predstavljaju svaku pojačanu disipaciju energije Sunčeva vjetra u Zemljinoj neposrednoj blizini. Pod pojmom Zemljina neposredna blizina podrazumijevamo visoku atmosferu i magnetosferu pa možemo razlikovati više oblika manifestacije geosferskih oluja: ionsferske, magnetske, termosferske, auro-

ralne oluje i podoluje. One tipično traju 1-3 dana, a ukupna stopa disipacije energije iznosi i do  $10^{12}$  W.

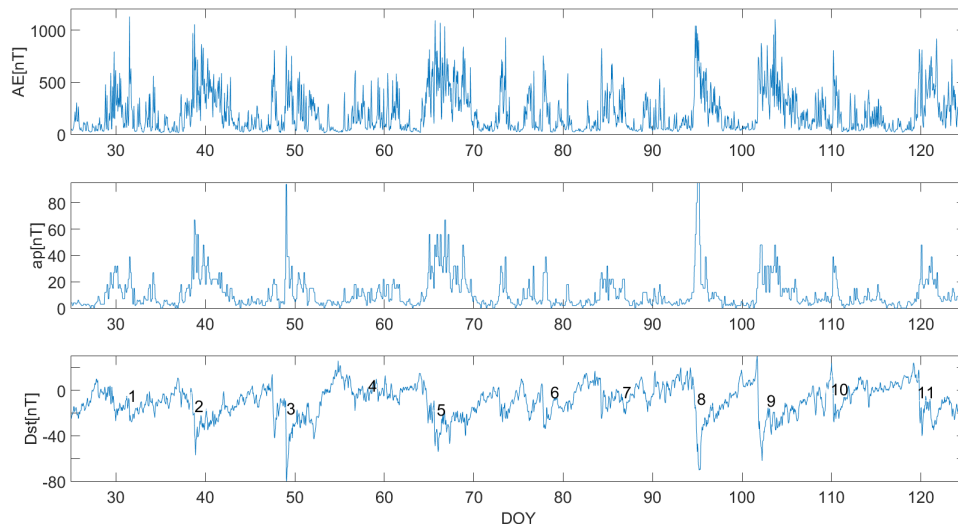
Geomagnetsko polje pokazuje promjenjivost na svim vremenskim skalama, od onih dugoperiodičnih - geomagnetski reverzali (obrtaži), do kratkoperiodičnih - mikropulsacije. Osim ovih pravilnih (ponavljajućih) varijacija, geomagnetsko polje pokazuje i nepravilne varijacije. U kontekstu magnetskih oluja i podoluje od interesa su nepravilne varijacije na vremenskoj skali od nekoliko minuta do par dana. One su posljedica pojačanja jakosti u strujnim sistemima u Zemljinoj okolini koje pak uzrokuju promjene vanjskog magnetskog polja. Ove promjene se prate pomoću geomagnetskih indeksa koji su detaljno opisani u prethodnom poglavlju.

Za vrijeme pojačane disipacije Sunčeve energije u auroralnim područjima u visokoj atmosferi dolazi do pojave snažnih vjetrova, poremećaja temperature i gustoće, ali i promjene sastava. Međutim, promjene u gustoći i sastavu termosfere zabilježene su i u ekvatorijalnim područjima i to svega nekoliko sati nakon opažanja promjena u auroralnim područjima. Objašnjenje za ovako brzo širenje poremećaja su već spomenuti TAD-ovi. Iako se u auroralnim područjima pobuđuju težinski valovi svih frekvencija, samo oni niskih frekvencija ne budu ugušeni do ekvatora. Dakle, poremećaji se prenose težinskim valovima koji su pobuđeni u auroralnim područjima, a imaju velike valne duljine. Brzina propagacije iznosi 500 m/s do 1000 m/s što znači da se poremećaj u ekvatorijalnom području može primijetiti već par sati nakon pobude. Prema ekvatoru putuju poremećaji s oba pola pa dolazi do kompresije i zagrijavanja plinova na nižim širinama.

### 3. Analiza podataka i metoda

#### 3.1 Podaci

Promatrano razdoblje obuhvaća 100 dana u završnoj fazi 23. Sunčevog ciklusa odnosno od 25. siječnja do 5. svibnja 2005. godine. Ovaj je period zbog svoje specifičnosti promatran u radovima Verbanac i sur. (2011a,b), Zhang i sur. (2010), Vršnak i sur. (2007) te Temmer i sur. (2007). Sunčeva aktivnost u promatranom periodu je dominirana HSS-ovima. Geomagnetska aktivnost je predstavljena trima geomagnetskim indeksima, Dst, ap i AE koji su preuzeti s OMNI baze podataka, <https://omniweb.gsfc.nasa.gov/form/dx1.html>. Pripadni vremenski nizovi su prikazani na slici 3.1. Vrijeme je dano u DOY-evima (engl. *day of the year*), pa tako 25. siječnja odgovara DOY=25, a 5. svibnja odgovara DOY=125.



Slika 3.1. Vremenska ovisnost jednosatnih vrijednosti AE [nT], ap [nT] i Dst [nT] geomagnetskih indeksa, redom od vrha prema dnu. Vrijeme je izraženo u DOY-evima, za 2005. godinu.

Prema Verbanac i sur. (2011a,b) te tamo navedenim referencama, geomagnetski indeksi u ovom razdoblju pokazuju periodičnost s periodom  $T=9.1$  dan što odgovara  $1/3$  sinodičnog perioda rotacije Sunca. Ovo je posljedica postojanja tri dugoživuće ekvatorijalne CH na međusobnoj longitudinalnoj udaljenosti od otprilike  $120^\circ$ .

Kako bi se odredila priroda odaziva termosfere na pojačanu geomagnetsku aktivnost uzrokovanu HSS-ovima, korišteni su podaci o neutralnoj gustoći termosfere duž putanje GRACE satelita. *The Gravity Recovery and Climate Experiment* je američko-njemačka satelitska misija čiji je primarni cilj bio odrediti gravitacijsko polje s prostornom rezolucijom 400-40 000 km svakih 30 dana. Čine ju dvije identične letjelice (GRACE-1 i

GRACE-2) na međusobnom razmaku od 220 km. Letjelice su lansirane u travnju 2002. godine na visinu od otprilike 500 km s inklinacijom od  $89.5^\circ$ , a predviđeno trajanje misije je bilo 5 godina (Tapley i sur., 2004). Misija je službeno završila tek u kolovozu 2017. godine. Period orbite iznosio je 95 minuta, a za obuhvaćanje svih lokalnih vremena letjelicama je trebalo 160 dana. Radi otklanjanja utjecaja sila negravitacijskog podrijetla na letjelice, iste su bile opremljene akcelerometrima. Gustoća  $\rho$  se na temelju podataka o akceleraciji  $\vec{a}$  računa pomoću relacije

$$\vec{a} = -\frac{1}{2}\rho \left[ \sum_{i=1}^p C_{D,j} \frac{A_i}{m} (\vec{v} \cdot \vec{n}_i) \cdot \vec{v} \right]. \quad (3.1.)$$

$m$  je masa satelita,  $C_{D,j}$  je promjenjivi koeficijent povrata (engl. *drag force coefficient*),  $A_i$  je površina pojedine ploče satelita,  $\vec{v}$  je relativna brzina satelita s obzirom na rotaciju Zemlje,  $\vec{n}_i$  je jedinični vektor svake pojedine  $i$ -te ploče dok  $p$  označava ukupan broj ploča satelita (Krauss i sur., 2018). Zbog eliptičnosti putanje podaci o gustoći su normalizirani na prosječnu visinu 490 km ( $\rho_{490}$ ) pomoću empirijskog modela za termosferu prema Bowman i sur. (2008) ( $\rho_{JB}$ ,  $\rho_{JB490}$ ) prema relaciji

$$\rho_{490} = \frac{\rho_{JB490}}{\rho_{JB}} \rho, \quad (3.2.)$$

a radi izgladivanja podataka, primijenjen je 5-minutni pomični filter (Krauss i sur., 2015).

## 3.2 Metoda

### 3.2.1 Identifikacija poremećaja

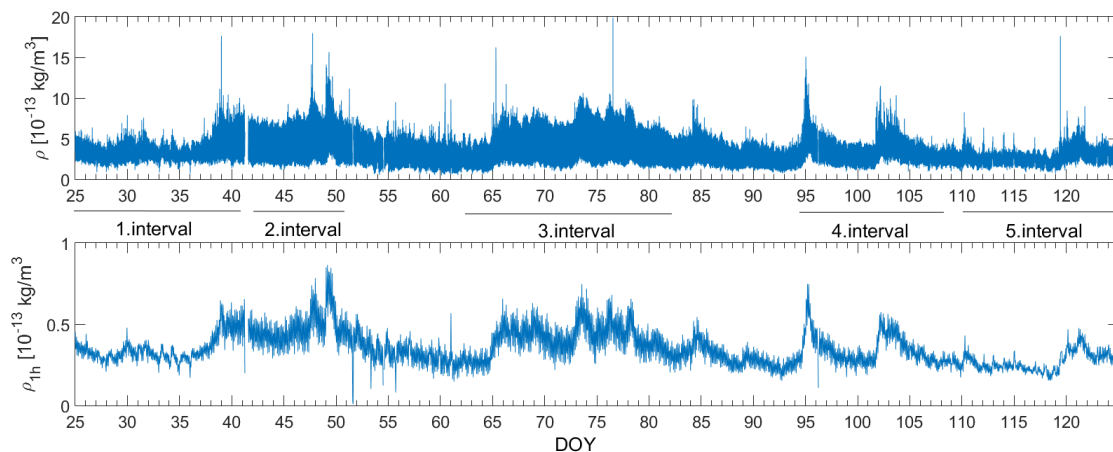
Za promatrani period u Verbanac i sur. (2011a,b) identificirano je ukupno 11 događaja, poremećaja geomagnetskih indeksa, koji su povezani s HSS-ovima koji potječu od tri dugoživuce CH i označeni su na slici 3.1. Radi vizualne identifikacije tih poremećaja u podacima o neutralnoj gustoći, najprije je napravljen graf gustoća-vrijeme. Budući da se radi o minutnim podacima, nakon grafičkog prikaza istih, napravljeno je usrednjavanje kako bi odabrali optimalnu rezoluciju za daljnji rad i lakše povezali ranije identificirane događaje sa slike 3.1. s poremećajima neutralne gustoće. Jednominutni podaci su usrednjeni s vremenskim okvirom od jednog, tri i šest sati. Centrirano usrednjavanje je napravljeno od početnog, jednominutnog seta podataka za sve tri različite rezolucije. Budući da su geomagnetski indeksi Dst, ap i AE dani na rezoluciji od jednog sata i očekivan je odaziv termosfere u relativno kratkom vremenu (red veličine par sati), jednosatna rezolucija je odabrana za daljnji rad s neutralnom gustoćom. Treba naglasiti da je u jednominutnom setu podataka uočeno par vrijednosti koje znatno odstupaju od okolnih, tzv. stršeće vrijednosti (engl. *outliers*) zbog čega su iste izostavljene i tek

nakon toga je izvršeno usrednjavanje i daljnja analiza. Prilikom identifikacije stršećih vrijednosti korišten je graf gustoća-vrijeme i prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće.

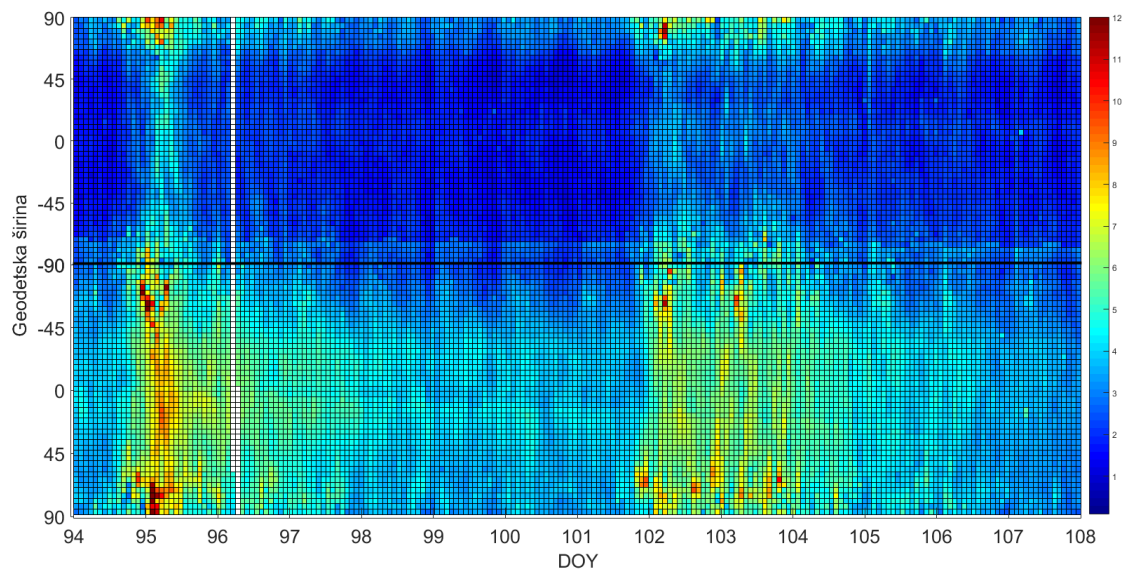
Kao posljedica naglog porasta Jouleove topline na polovima dolazi do pobude težijskih valova, kako u ionosferi tako i u termosferi. Da bi potvrdili njihovo postojanje i eventualni transport (preraspodjelu) energije u vidu TAD-ova velikih valnih duljina koji putuju prema ekvatoru, podaci o gustoći su raspoređeni prema geodetskim širinama tj. određene su uzastopne orbite satelita na intervalima od interesa. To su oni intervali kod kojih su uočeni poremećaji geomagnetskih indeksa uzrokovani HSS-ovima, ali također da orbita satelita u tom odabranom intervalu obuhvaća približno konstantan LT. Na slici 3.2. prikazani su originalni, jednodominantni podatci te jednosatne srednje vrijednosti. Treba naglasiti kako relativno pravilne oscilacije na visokim frekvencijama, koje se mogu uočiti na slici 3.2 u prikazu originalnog seta podatka neutralne gustoće, potječu od razlike u gustoći između dana i noći, a period takvih oscilacija se podudara s periodom orbite satelita, dakle iznosi približno 1.5 h. Nadalje, na slici 3.2 su označeni i intervali od interesa unutar promatranih 100 dana, a to su:

- 1) DOY=25-41
- 2) DOY=42-51
- 3) DOY=62-82
- 4) DOY=94-108
- 5) DOY=110-125

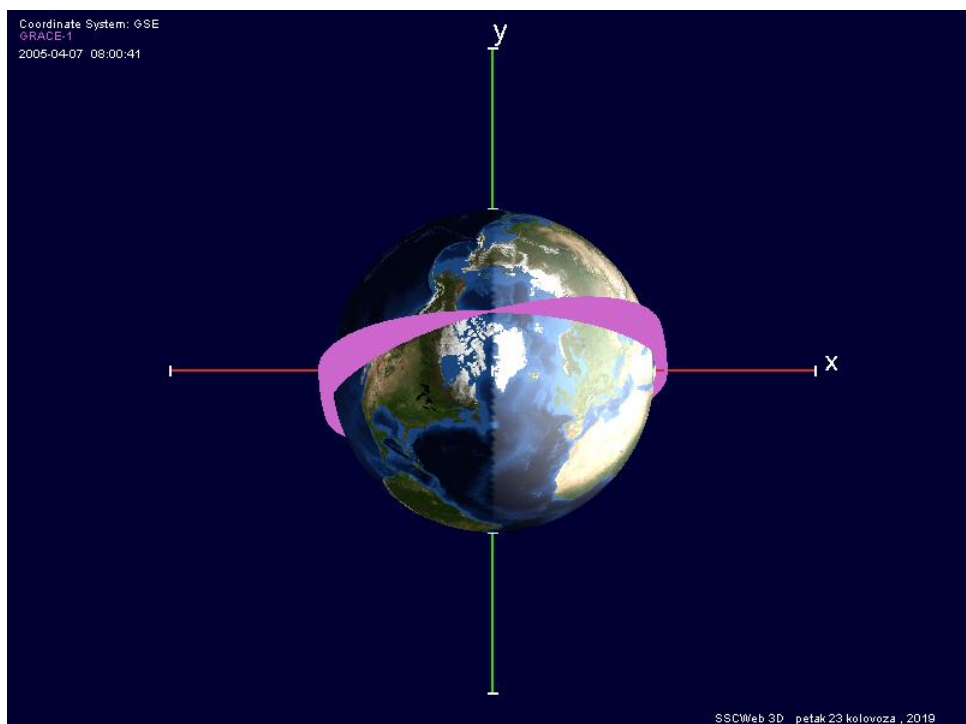
Na slici 3.3. se nalazi prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće. Radi se o geodetska širina-vrijeme prikazu neutralne gustoće termosfere  $\rho$  u jedinicama  $10^{-13} kg/m^3$  za četvrti interval (DOY=94-108). Orbita satelita za taj promatrani interval prikazana je na slici 3.4. Naime, svaki takav prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće je promatran u kontekstu orbite za taj vremenski period. Orbita je dana u GSE sustavu (engl. *Geocentric solar ecliptic*) pa je tako x-os usmjerena prema Suncu, a z-os je okomita na ravninu Zemljine rotacije oko Sunca (pozitivan smjer je definiran prema sjeveru). Budući da je ovaj koordinatni sustav fiksiran s obzirom na liniju Zemlja-Sunce, Strana Zemlje okrenuta prema Suncu (dan) je prikazana svjetlijim dijelom, dok je tamniji dio noć.



Slika 3.2. Vremenska ovisnost minutnih podataka za neutralnu gustoću termosfere (gornja slika) i jednosatni srednjaci (donja slika) zajedno s naznačenim intervalima. Vrijeme je izraženo u DOY-evima, za 2005. godinu.



Slika 3.3. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće u jedinicama  $10^{-13} \text{ kg/m}^3$  za četvrti vremenski interval, DOY=94-108. Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT  $\sim 00$  h, a donji silazni uz LT  $\sim 12$  h. Vrijeme između dvije uzastopne vertikalne linije mreže iznosi 94 minute (jedna puna orbita).



Slika 3.4. Orbita GRACE-1 letjelice za 4. interval u GSE sustavu. Sunce se nalazi u smjeru x-osi. Orbita je nacrtana pomoću 4D Orbit Viewer-a, programa preuzetog s <https://spdf.gsfc.nasa.gov/index.html>

### 3.2.2 Analiza odaziva

Kako bismo detaljnije proučili razlike koje se javljaju u odazivu termosfere tijekom dana i odazivu termosfere tijekom noći podijelili smo podatke prema LT-u na sljedeći način:

- 1)  $LT \in [08,16]$  h  $\Rightarrow$  dan
- 2)  $LT \in [20,04]$  h  $\Rightarrow$  noć

Svi podaci koji se odnose na interval od dva sata oko linije zora-sumrak nisu uzeti u obzir jer za taj vremenski period razlike dan-noć ne dolaze do izražaja. Nadalje, kako bi uočili razlike u odazivu s obzirom na latitudu, nakon podjela prema LT-u, napravljena je i podjela podataka prema latitudinalnim pojasevima:

- 1)  $\varphi \in [90^\circ, 60^\circ) \Rightarrow 75^\circ$
- 2)  $\varphi \in [-90^\circ, -60^\circ) \Rightarrow -75^\circ$
- 3)  $\varphi \in [60^\circ, 30^\circ) \Rightarrow 45^\circ$
- 4)  $\varphi \in [-60^\circ, -30^\circ) \Rightarrow -45^\circ$
- 5)  $\varphi \in [30^\circ, 0^\circ) \Rightarrow 15^\circ$
- 6)  $\varphi \in [-30^\circ, 0^\circ] \Rightarrow -15^\circ$

Latituda napisane s desne strane strelice predstavljaju srednjak latituda pojedinih pojava, a naglašene su kako bi se kasnije u tekstu i na slikama lakše referiralo na pojedini pojas. Također, treba naglasiti kako je centrirano usrednjavanje na rezoluciju od 1 h napravljeno nakon podjele podataka prema LT-u i prema latitudama. Naime, ako se prvo radi usrednjavanje, a tek onda podjela, treba usrednjavati i pripadne latituda i pripadne LT-ove čime gubimo na bitnim informacijama. Na primjer, promatramo period od sat vremena tijekom kojeg satelit prođe otprilike 2/3 njegove pune orbite. Tijekom tih sat vremena satelit je prošao i neke LT-ove koji su vezani uz dan i neke LT-ove koji su vezani uz noć dok ćemo mi kao ukupni srednjak LT-ova za tih sat vremena dobiti samo jednu vrijednost, jednosatni srednjak, koji ne odaje nikakvu informaciju o LT-u. Situacija je potpuno analogna za razdiobu prema latitudama, kako je već rečeno, tijekom sat vremena satelit prođe 2/3 orbite što znači da u tom periodu obuhvati barem četiri od šest gore navedenih latitudinalnih pojava.

Kako nisu primijećene drastične razlike u odgovoru južne i sjeverne hemisfere nakon DOY=65, a radi povećanja broja jednosatnih srednjaka koji ulaze u korelacijsku analizu, napravljeno je spajanje pojava 1) i 2), 3) i 4) te 5) i 6) tako da u idućem koraku promatramo samo tri latitudinalna pojava:

- 1)  $\varphi \in \left( [90^\circ, 60^\circ) \cup [-90^\circ, -60^\circ) \right) \Rightarrow 75^\circ$
- 2)  $\varphi \in \left( [60^\circ, 30^\circ) \cup [-60^\circ, -30^\circ) \right) \Rightarrow 45^\circ$
- 3)  $\varphi \in \left( [30^\circ, 0^\circ] \cup [-30^\circ, 0^\circ] \right) \Rightarrow 15^\circ$

Ponovno, s desne strane strelice se nalazi jedna odabrana latituda koja predstavlja cijeli latitudinalni pojas, radi jednostavnijeg referiranja. Radi lakše usporedbe odaziva termosfere (bez podjele po latitudama) i odaziva pojedinog latitudinalnog pojava napravljeno je usrednjavanje podataka na rezoluciji od 6 sati. Svi prikazani šesterosatni srednjaci izračunati su iz originalnog jednogminutnog seta podataka, a ne iz jednosatnih srednjaka.

### 3.2.3 Poprečna korelacija

Kako bismo odredili vezu između neutralne gustoće termosfere i geomagnetskih indeksa najprije je izračunat Pearsonov koeficijent korelacije  $R$ . U najopćenitijem slučaju Pearsonov koeficijent dvije slučajne varijable  $X$  i  $Y$  definiran je slijedećom relacijom:

$$R(X, Y) = \frac{cov(X, Y)}{\sqrt{var(X)var(Y)}} \quad (3.3.)$$



gdje je kovarijanca  $cov(X, Y)$  definirana kao

$$cov(X, Y) = E[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)], \quad (3.4.)$$

a varijanca  $var(X)$  na sljedeći način:

$$var(X) = E[(X - \mu_X)^2]. \quad (3.5.)$$

$E(X)$  je matematičko očekivanje dok je s  $\mu_X$  označena srednja vrijednost slučajne varijable  $X$ , analogno vrijedi za slučajnu varijablu  $Y$ . Pearsonova korelacija podrazumijeva postojanje linearne veze između dvije varijable, a njegova maksimalna apsolutna vrijednost je 1. Ako su dvije varijable nezavisne tada će koeficijent biti 0. Pozitivna korelacija između dvije varijable postoji ako je  $R \in \langle 0, 1 \rangle$ , dok negativna korelacija postoji ako je  $R \in \langle -1, 0 \rangle$ . Koeficijent korelacije za  $X$  i  $Y$  biti će jednak kao za  $Y$  i  $X$ ,  $-X$  i  $-Y$  te za  $-Y$  i  $-X$ . K tome, vrijednost koeficijenta korelacije za  $-X$  i  $Y$ , baš kao i za  $X$  i  $-Y$  je jednaka negativnoj vrijednosti koeficijenta za  $X$  i  $Y$ . Prednosti ovog koeficijenta u odnosu, na primjer, kovarijancu kao mjeru korelacije jest da ne ovisi o skali promatranih varijabli (Gibbson i Chakraborti, 2011).

Budući da očekujemo kako će postojati određeni vremenski odmak između odgovora geomagnetskih indeksa i odgovora termosfere na poremećaje uzrokovane HSS-ovima, želimo taj vremenski odmak i izračunati. Metoda poprečne korelacije se temelji na računanju koeficijenta korelacije, u našem slučaju upravo Pearsonovog koeficijenta  $R$ , za nizove koji su međusobno u vremenu pomaknuti. Osnovna ideja poprečne korelacije je pronaći onaj vremenski odmak  $\tau$  za kojeg je koeficijent korelacije maksimalan. Kako su u ovom konkretnom slučaju slučajne varijable  $X$  i  $Y$  iz gornjih relacija zapravo dva vremenska niza podataka  $X(i)$  i  $Y(i)$ , za  $i=1,2,..N$ . Pearsonov koeficijent poprečne korelacije (engl. *Pearson coefficient for lagged time series*) je definiran na sljedeći način:

$$R(\tau) = \frac{E[(X_i - \mu_X)(Y_{i+\tau} - \mu_Y)]}{\sqrt{E[(X_i - \mu_X)^2]E[(Y_{i+\tau} - \mu_Y)^2]}}. \quad (3.6.)$$

Pomoću gornje relacije računamo koeficijent korelacije  $R(\tau)$  za  $\tau=0,1,2..48$  h i  $i=1,2,..N-\tau$ . Tražimo onaj vremenski odmak za koji je koeficijent korelacije maksimalan,  $R = R_{max}$ . Tada kažemo da "Y kasni za X" upravo za taj  $\tau > 0$ . S druge strane, ako želimo provjeriti slučaj da "Y rani za X" tada primjenjujemo relaciju 3.6. uz zamjenu  $X_i \Rightarrow X_{i+\tau}$  i  $Y_{i+\tau} \Rightarrow Y_i$  i u tom slučaju govorimo o negativnom vremenskom odmaku tj.  $\tau \Rightarrow -\tau$ . Dakle, korelacija "X-Y" odgovara linearnoj formi  $Y(t) = aX(t^*) + b$ , gdje  $X(t^*)$  predstavlja vrijednost X-a koja se pojavila  $\tau$  vremena prije vrijednosti  $Y(t)$ .  $t^*$  je tzv. "retardirano vrijeme" i vrijedi  $t^* = t - \tau$ .

U slučaju kada za određenu latitudinalnu skupinu za određeni LT nije moguće izra-

čunati jednosatni srednjak zbog nedostatka podatka, primijenjena je metoda linearne interpolacije neposredno prije računanja koeficijenta poprečne korelacije i vremenskog posmaka. Kako je metoda poprečne korelacije primijenjena na 60-dnevni period, od DOY=65 do DOY=125, slijedi da je maksimalan broj satnih srednjaka za taj period 1440 ( $60 \cdot 24$ ). U tablici 3.1 prikazano je koliko je jednosatnih srednjaka od njih 1440 dobiveno metodom linearne interpolacije.

Tablica 3.1. Broj satnih srednjaka koji su dobiveni metodom linearne interpolacije u odnosu na ukupan broj satnih srednjaka za promatrani 60-dnevni period za tri latitudinalne skupine za tri različita LT-a, označeni s  $n_{int}[\%]$ .

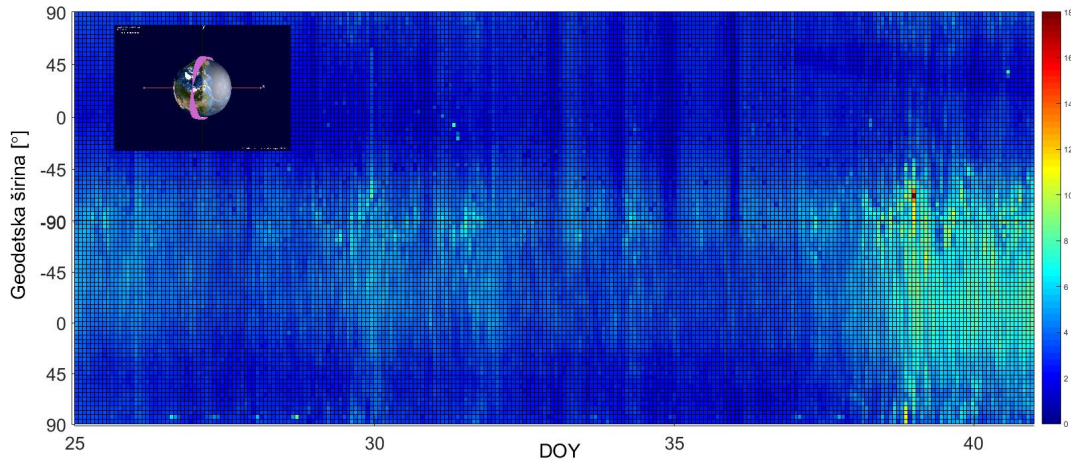
	$n_{int}[\%]$ LT=08-16 h	$n_{int}[\%]$ LT=20-04 h	$n_{int}[\%]$ LT=0-24 h
75	0.1	0.1	0.1
45	4.3	4.0	/
15	20.8	20.8	/

## 4. Rezultati

Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za različite vremenske intervale dan je na slikama 4.1-4.5. Dobiveni su razdiobom podataka prema latitudama tako da svaki stupac predstavlja jedan prolaz satelita u njegovoj orbiti. Budući da se GRACE satelit nalazi u polarnoj (kvazipolarnoj) orbiti, u svakom se orbitalnom prolazu jednom nađe u neposrednoj blizini južnog i sjevernog pola. Donji dio prostorno-vremenskog prikaza neutralne gustoće predstavlja silazni dio putanje, dakle satelit ide od  $90^\circ$  prema  $-90^\circ$ , dok gornji dio označava uzlazni dio putanje kada se satelit kreće od  $-90^\circ$  prema  $90^\circ$ . Svaka vertikalna linija razdvaja jednu orbitu od druge i sukladno tome, između vertikalnih linija je 94 minute (vrijeme potrebno da satelit napravi punu orbitu). Granica koja razdvaja dan i noć se ne nalazi na točno  $\pm 90^\circ$  geodetske širine ili, drugačije rečeno, silazni dio orbite se ne nalazi u cijelosti u danu, već postoji dio silazne orbite koji je u noći. Sasvim suprotno vrijedi za noć i uzlaznu putanju. Odnosno, podebljana horizontalna linija odvađa podatke s obzirom na južni pol, geodetska širina  $\sim -90^\circ$ , ali iz gore navedenog razloga ne možemo reći da ta linija precizno odvađa i dan od noći. Zato svaki prostorno-vremenski prikaz gustoće treba promatrati u kontekstu orbite koja je prikazana u uglu na svakoj slici i odgovara točno tom vremenskom periodu na koji se odnosi i sam prostorno-vremenski prikaz gustoće. Orbita je dana u GSE (engl. *geocentric solar ecliptic*) pa je tako x-os usmjerena prema Suncu, a z-os je okomita na ravninu Zemljine rotacije oko Sunca (pozitivan smjer je definiran prema sjeveru). Budući da je ovaj koordinatni sustav fiksiran s obzirom na liniju Zemlja-Sunce, strana Zemlje koja je prema Suncu (dan) je prikazana svjetlijim dijelom na slici orbite, dok tamniji dio predstavlja noć. Radi jednostavnije usporedbe slika 4.1-4.5, skala je za svaki promatrani interval ista-  $[0,18] \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ . Svako bijelo polje na matrix plotovima znači da za taj trenutak ne postoji podatak o neutralnoj gustoći.

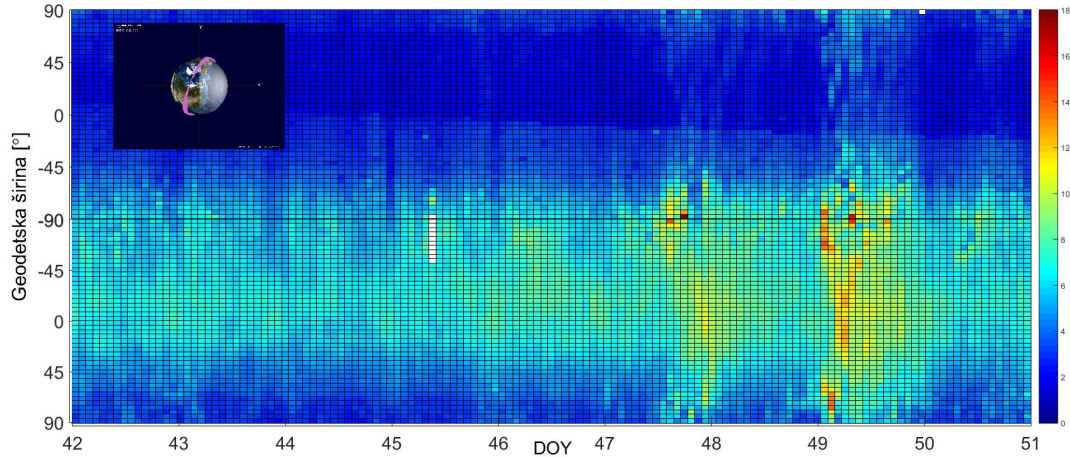
Vremensko-prostorni prikaz neutralne gustoće za prvi interval, DOY=25-41, se nalazi na slici 4.1, za gornji dio (iznad podebljane horizontalne linije) je LT $\sim$ 18 h, a za donji dio (ispod podebljane horizontalne linije) LT $\sim$ 06 h. Značajna razlika između gornjeg i donjeg dijela prikaza koji su odvojeni podebljanom linijom za  $\varphi \sim -90^\circ$  nije vidljiva. Razlog je putanja satelita koja je u ovom vremenskom periodu približno "zora-sumrak" pa je nemoguće primijetiti dan-noć razlike. Povećanje gustoće se primjećuje za pojas latituda od otprilike  $0^\circ$  na silaznom dijelu do otprilike  $-45^\circ$  na uzlaznom dijelu orbite i ono se proteže kroz cijeli vremenski interval. Geomagnetski poremećaj označen brojem 1 na slici 3.1 se može primijetiti i na ovom prostorno-vremenskom prikazu neutralne gustoće, neposredno prije DOY=30. Međutim, geomagnetski poremećaj označen brojem 2 se puno više ističe, vidljivo za DOY=38-41. Minimalna vrijednost

neutralne gustoće za ovaj interval iznosi  $7.27 \cdot 10^{-14} \text{ kg/m}^3$ , a maksimalna vrijednost iznosi  $1.77 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ .



Slika 4.1. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za prvi interval, DOY=25-41. Neutralna gustoća je u jedinicama  $10^{-13} \text{ kg/m}^3$ . Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT  $\sim 06 \text{ h}$ , a donji silazni uz LT  $\sim 18 \text{ h}$ .

Na slici 4.2 se nalazi prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za DOY=42-51. Primjećuje se pojas povećane gustoće za cijeli interval, od  $\varphi \sim -45^\circ$  u donjem dijelu do  $\varphi \sim -60^\circ$  u gornjem dijelu prostorno-vremenskog prikaza neutralne gustoće. Za DOY=47.5-50 uočavaju se dva TAD-a, drugi se može povezati s geomagnetskim poremećajem broj 3 sa slike 3.1, dok se prvi može povezati s naglim padom Dst-a neposredno prije geomagnetskog poremećaja 3 na slici 3.1. Naglo povećanje gustoće kod oba TAD-a počinje na visokim, a kasnije se primjećuje i na srednjim i niskim širinama. Primjerice TAD kojeg povezujemo s geomagnetskim poremećajem broj 3, započinje na visokim širinama za DOY  $\sim 49.1$ , a završava se na niskim širinama na otprilike DOY  $\sim 49.3$ . TAD-ovi se uočavaju i u gornjem dijelu prostorno-vremenskog prikaza ali znatno manjih vrijednosti gustoće. Maksimum neutralne gustoće za ovaj interval iznosi  $1.8 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^3$  što je ujedno i najveća vrijednost koja je zabilježena na svim prostorno-vremenskim prikazima neutralne gustoće, a minimum iznosi  $3.29 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ .



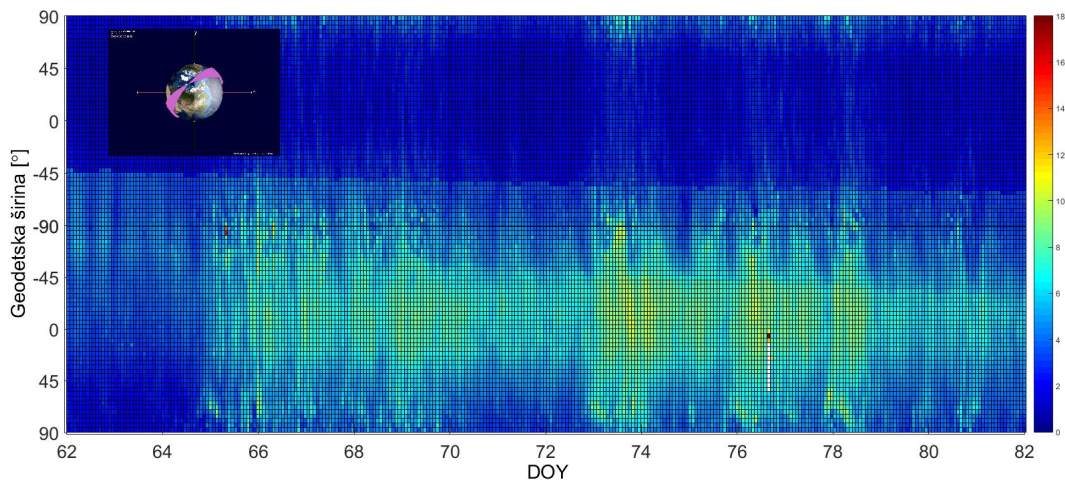
Slika 4.2. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za drugi interval, DOY=42-51. Neutralna gustoća je u jedinicama  $10^{-13} \text{kg/m}^3$ . Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT  $\sim 05$  h, a donji silazni uz LT  $\sim 17$  h.

Na slici 4.3 je prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za treći interval, DOY=62-82. Linija koja razdvaja dan od noći jasno se vidi na gornjem dijelu prostorno-vremenskog prikaza neutralne gustoće, na početku intervala se nalazi na otprilike  $\varphi \sim -45^\circ$  i lagano se spušta do  $\varphi \sim -55^\circ$ . Ovo je direktna posljedica orbite u ovom vremenskom periodu koja se premješta od sumraka prema zori i pri tome se dio silazne putanje koji je u noći smanjuje, što je vidljivo na slici orbite u gornjem lijevom kutu. Poremećaj 4 na slici 3.1 odgovara TAD-u, povećanju gustoće, na prostorno-vremenskom prikazu neutralne gustoće neposredno nakon DOY=64.5. Zanimljivo je da pojas povećane gustoće u odnosu na okolinu ne prestaje nakon tog događaja, već kontinuirano prelazi u nove događaje na otprilike DOY=73. Tada se javljaju tri uzastopna TAD-a od kojih se treći, ujedno i najslabiji, može povezati s geomagnetskim poremećajem broj 6 na slici 3.1. Slično kao na prethodnom prikazu, postoji povećanje gustoće i na uzlaznom dijelu putanje, međutim odgovor je, iako istovremen, puno manjeg intenziteta. Također se može uočiti kako nagli skok u vrijednosti gustoće započinje na visokim širinama, ali se s vremenom pojavljuje i na srednjim, a zatim i niskim širinama. Maksimalna vrijednost gustoće koja se postiže iznosi  $1.62 \cdot 10^{-12} \text{kg/m}^3$ , a najmanja iznosi  $2.63 \cdot 10^{-13} \text{kg/m}^3$ .

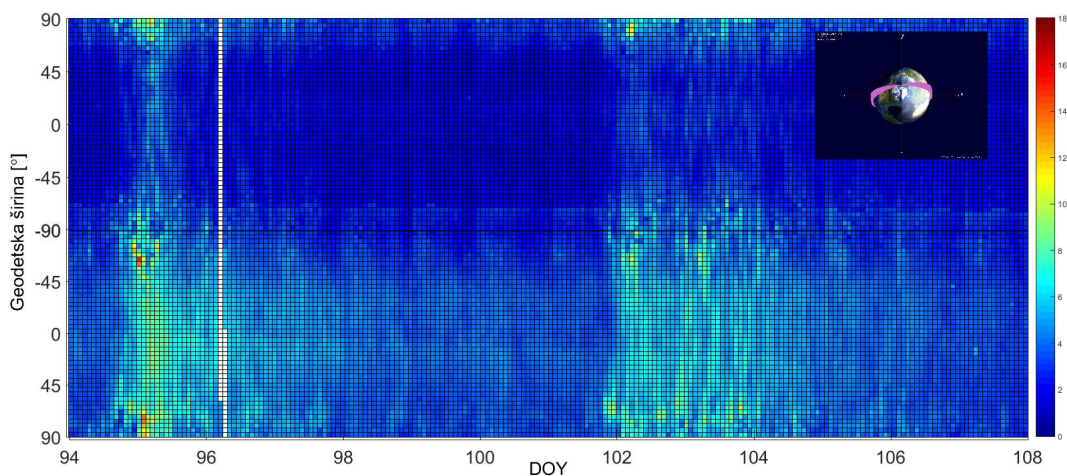
Najveću simetričnost putanje u kontekstu dana i noći ima četvrti interval, za DOY=94-108, slika 4.4. Ova simetričnost se odražava i na prostorno-vremenskom prikazu pa se tako horizontalna linija koja dijeli noć od dana nalazi najbliže sredini prikaza. Na otprilike DOY=95 može se uočiti poremećaj u gustoći kojeg povezujemo s geomagnetskim događajem broj 8 na slici 3.1. Ovaj poremećaj gustoće je, u odnosu na druge poremećaje gustoće koje opažamo s noćne strane, najistaknutiji. Ponovno se može uočiti kako poremećaj započinje na visokim širinama i premješta se prema nižim.



Za DOY=102-104 se također uočava povećanje gustoće, s dnevne i s noćne strane, a najintenzivnije je na visokim širinama. U odnosu na prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće na slici 4.2 i na slici 4.3 za ovaj period poremećaji u gustoći koji se primjećuju se ne protežu preko cijelog intervala već se jasnije mogu izdvojiti periodi događaja od mirne situacije. Također, u odnosu na prethodna dva prostorno-vremenska prikaza neutralne gustoće, poremećaj jače slabi pri putovanju prema nižim širinama odnosno možemo reći da je atenuacija pobuđenih TAD-ova jako izražena. Maksimalna vrijednost neutralne gustoće za ovaj vremenski period je  $1.51 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ , a minimalna  $3.18 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ .

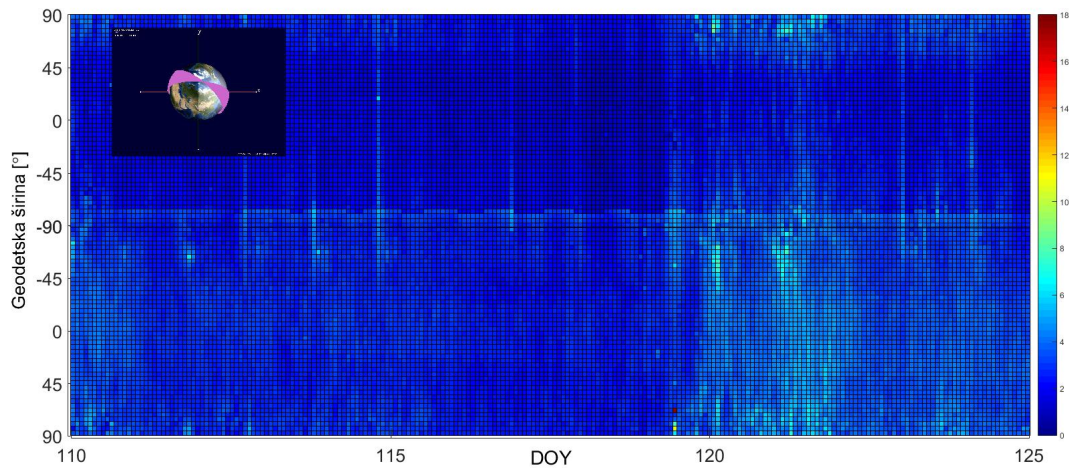


Slika 4.3. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za treći interval, DOY=62-82. Neutralna gustoća je u jedinicama  $10^{-13} \text{ kg/m}^3$ . Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT ~03 h, a donji silazni uz LT~15 h.



Slika 4.4. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za četvrti interval, DOY=94-108. Neutralna gustoća je u jedinicama  $10^{-13} \text{ kg/m}^3$ . Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT ~00 h, a donji silazni uz LT~12 h.

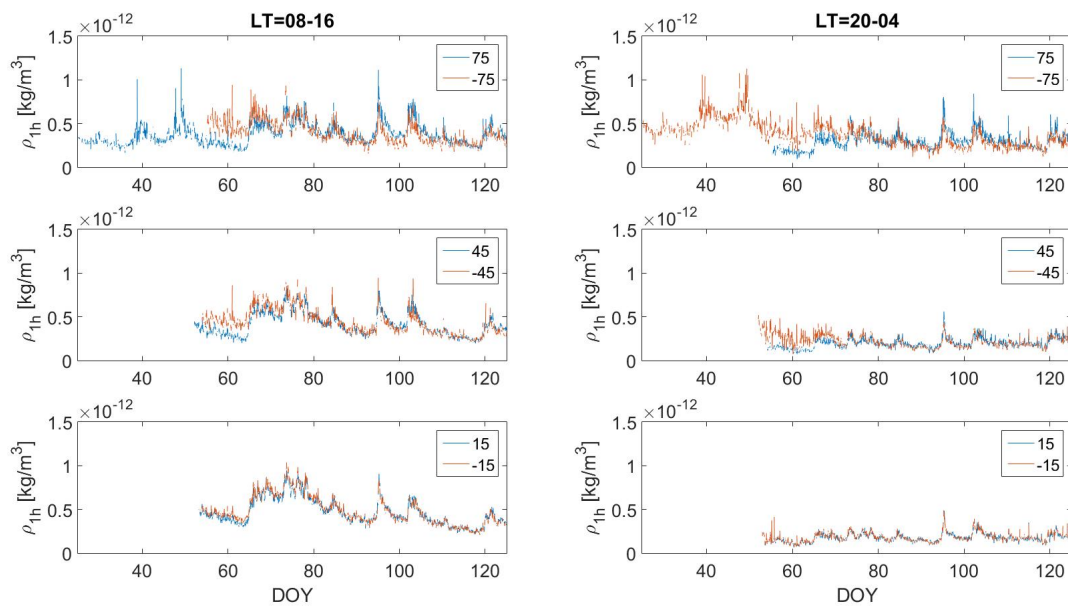
Na slici 4.5 je prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za posljednji interval, DOY=110-125. Orbita je daleko od "zora-sumrak" orbite i skoro je simetrična s obzirom na dan-noć situaciju što se ponovno odražava u simetriji, linija koja dijeli dan od noći nalazi se relativno blizu  $-90^\circ$ , baš kao i na prethodnom prostorno-vremenskom prikazu neutralne gustoće. Nadalje, za DOY=119.5-122 uočava se povećanje u gustoći, i za silazni i za uzlazni dio putanje, a može se povezati s događajem broj 11 sa slike 1.3. Ponovno se može uočiti kako poremećaj nastaje na visokim te kasnije slijedi propagacija prema srednjim i niskim širinama. Ovaj poremećaj ima najmanje povećanje gustoće u odnosu na sve do sada promatrane događaje. U skladu s time je i maksimalna vrijednost u ovom intervalu manja od svih maksimalnih na prethodnim prostorno-vremenskim prikazima neutralne gustoće i iznosi  $1.76 \cdot 10^{-12} \text{ kg/m}^3$ , a najmanja vrijednost iznosi  $2.8 \cdot 10^{-13} \text{ kg/m}^3$ .



Slika 4.5. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće za peti interval, DOY=94-108. Neutralna gustoća je u jedinicama  $10^{-13} \text{ kg/m}^3$ . Gornji dio prikazuje uzlazni dio putanje LT  $\sim 23$  h, a donji silazni uz LT  $\sim 11$  h.

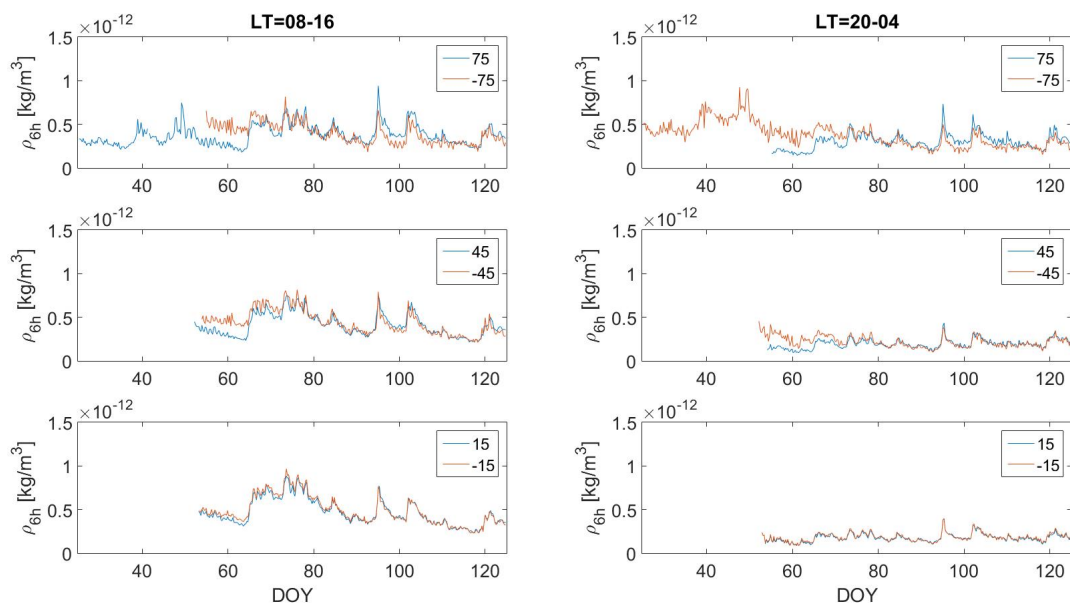
Na slici 4.6 je prikazana neutralna gustoća na rezoluciji od 1 h za šest promatranih latitudinalnih pojasa, zasebno za dan i za noć. Na slici 4.7. je prikazano isto, ali na 6 h rezoluciji. Plave krivulje označavaju pozitivne širine, odnosno sjevernu hemisferu dok narančaste krivulje označavaju negativne širine tj. južnu hemisferu. Period od interesa pri interpretaciji je od DOY=55 do DOY=125 jer u tom periodu ima smisla promatrati dan-noć razlike jer je orbita daleko od terminatora. Može se uočiti kako do otprilike DOY=65 postoji razlika između vrijednosti za južnu i sjevernu hemisferu, i s dnevne i s noćne strane. Najveća razlika se uočava na visokim širinama dok se na niskim širinama skoro pa i ne uočava. Primjećuje se kako krivulje i za noć i za dan, za sve širinske pojaseve prate isti trend, međutim, do istaknutijeg porasta gustoće u odnosu na period prije i nakon DOY  $\sim 65-80$  dolazi s dnevne strane. Takav značajniji skok se ne primjećuje na noćnoj strani, vidljivo na slikama 4.6 i 4.7, ali i na prostorno-vremenskom prikazu

neutralne gustoće na slici 4.3. Nadalje, za period prije DOY=55 vrijednosti postoje samo na visokim širinama, dok podataka nema na srednjim i niskim širinama. K tome, primjećuje se kako za LT=08-16 h postoji samo plava krivulja na visokim širinama, dakle, sjeverna hemisfera, dok za LT=20-04 h postoji samo narančasta krivulja, dakle, vrijednosti za južnu hemisferu. Ovo je izravna posljedica orbite satelita (pogledati orbitu na slici 4.1 i 4.2). Orbita je na visokim širinama do DOY~55 oko sjevernog geografskog pola cijela u danu, a oko južnog geografskog pola cijela u noći, a ovo je pak posljedica postojanja inklinacije orbite satelita i inklinacije Zemljine osi rotacije.



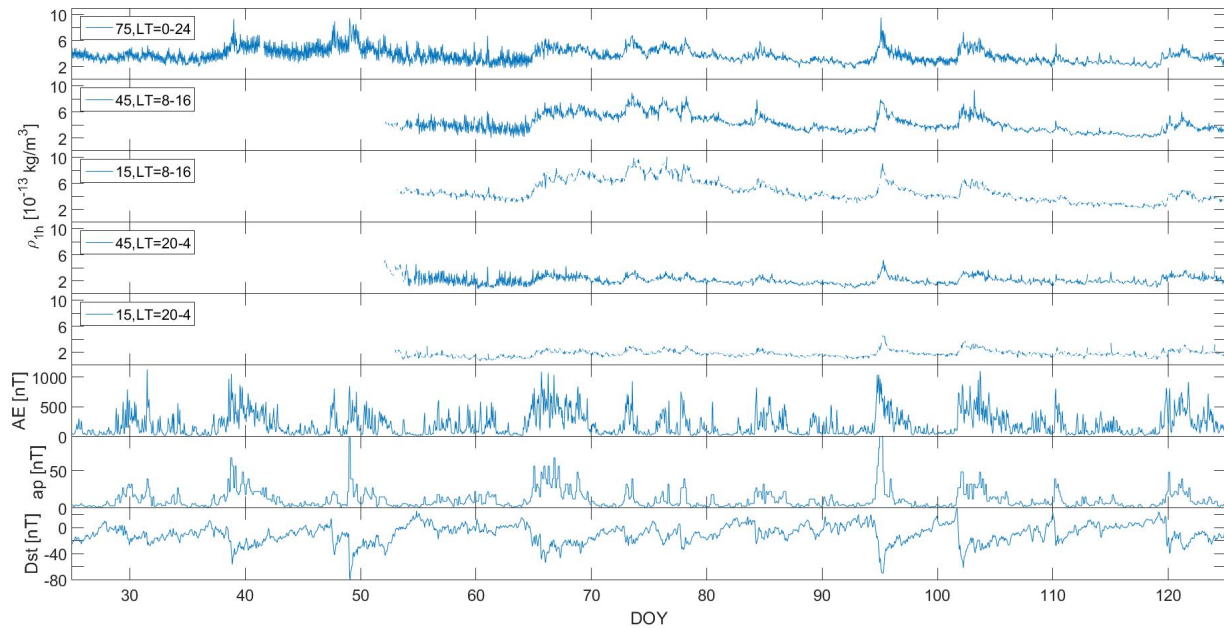
Slika 4.6. Jednosatni srednjak neutralne gustoće na 490 km za period DOY=25 do DOY=125 2005. godine. U lijevom stupcu su vrijednosti na dnevnoj strani, za LT=08-16 h, a u desnom stupcu su noćne vrijednosti, za LT=20-04 h. Svaki redak predstavlja jedan latitudinalni pojas, gore: visoke latituda sa srednjom vrijednosti  $\pm 75^\circ$ , sredina: srednje latituda sa srednjom vrijednosti  $\pm 45^\circ$  i dolje: niske latituda sa srednjom vrijednosti  $\pm 15^\circ$ .



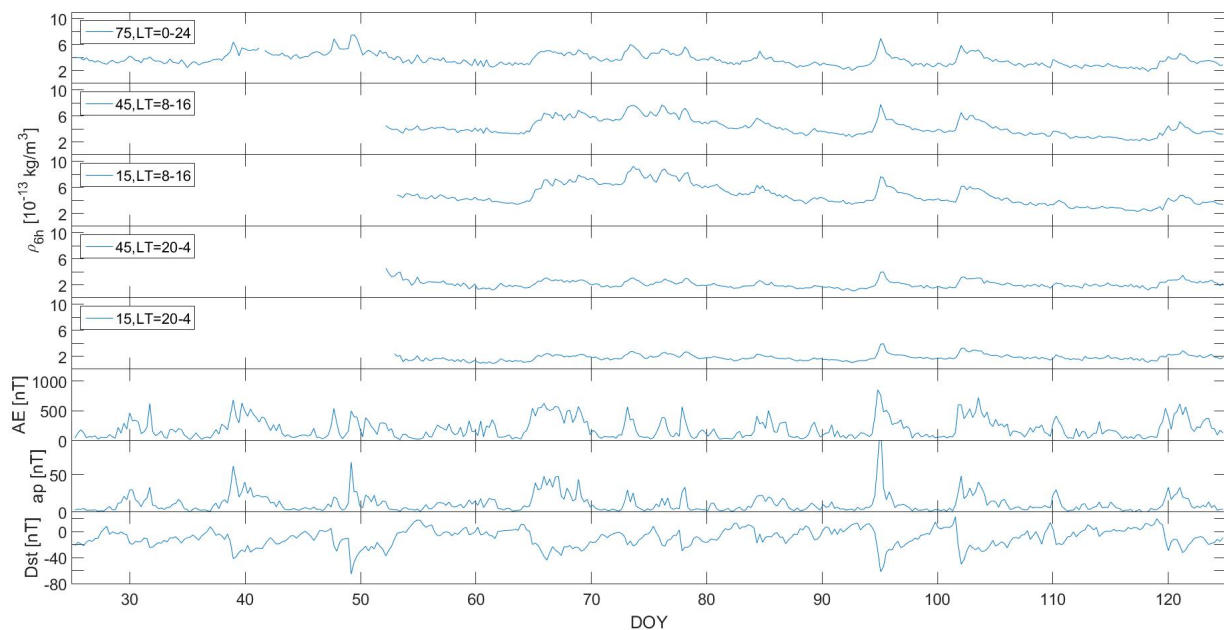


Slika 4.7. Šesterosatni srednjak neutralne gustoće na 490 km za period DOY=25 do DOY=125 2005. godine. U lijevom stupcu su vrijednosti na dnevnoj strani, za LT=08-16 h, a u desnom stupcu su noćne vrijednosti, za LT=20-04 h. Svaki redak predstavlja jedan latitudinalni pojas, gore: visoke latituda sa srednjom vrijednosti  $\pm 75^\circ$ , sredina: srednje geodetske latituda sa srednjom vrijednosti  $\pm 45^\circ$  i dolje: niske latituda širine sa srednjom vrijednosti  $\pm 15^\circ$ .

Radi povećanja broja jednosatnih srednjaka koji ulaze u posmičnu korelacijsku analizu, a zahvaljujući činjenici da ne postoji značajna razlika u krivuljama za sjevernu i južnu hemisferu nakon DOY=65 (slike 4.6 i 4.7), vrijednosti za sjevernu i južnu hemisferu su spojene tako da se ubuduće ne razmatra šest različitih latitudinalnih pojaseva već samo njih tri, kao što je to opisano u potpoglavlju 3.2.2. Kako se granica dan-noć ne nalazi na točno  $\pm 90^\circ$ , za pojas visokih latituda nije primjereno primjenjivati podjelu na dan-noć pomoću LT-ova tako da će se pojas visokih latituda promatrati za LT=0-24 h. Grafički prikaz ove izmjene nalazi se na slikama 4.8 i 4.9. Dakle, na slici 4.8 su prikazani vremenski nizovi, redom od vrha prema dnu, neutralne gustoće na visokim latitudama za LT=0-24 h, neutralne gustoće za niske i srednje širine, prvo za LT=08-16 h, a zatim i za LT=20-04 h, slijede jednosatni srednjaci geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst. Na slici 4.9 se nalaze isti vremenski nizovi, u istom redoslijedu ali za rezoluciju od 6 h.

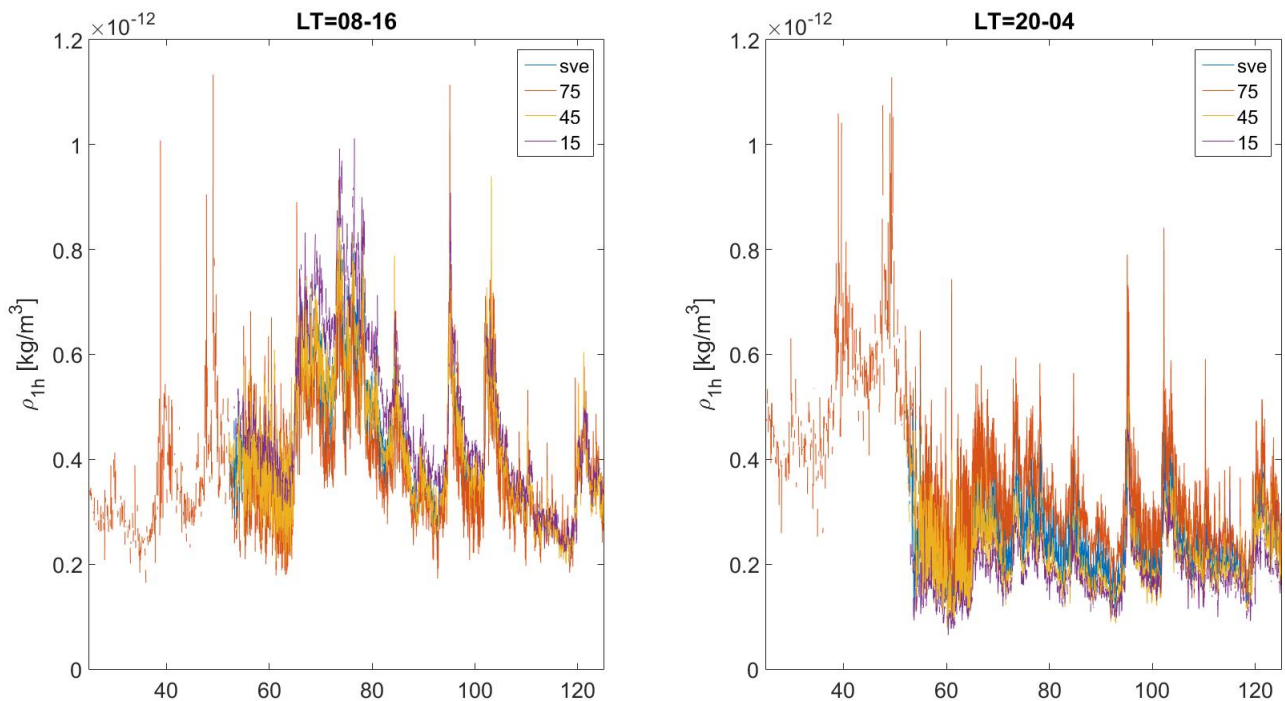


Slika 4.8. Vremenski nizovi, 1 h rezolucija neutralne gustoće  $\rho[10^{-13} \text{ kg/m}^3]$  na visokim latitudama za LT=0-24 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=08-16 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=20-04 h, AE [nT], ap [nT] i Dst [nT], redom od vrha prema dnu. Vrijeme je izraženo u DOY-evima, za 2005. godinu



Slika 4.9. Vremenski nizovi, 6 h rezolucija neutralne gustoće  $\rho[10^{-13} \text{ kg/m}^3]$  na visokim latitudama za LT=0-24 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=08-16 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=20-04 h, AE [nT], ap [nT] i Dst [nT], redom od vrha prema dnu. Vrijeme je izraženo u DOY-evima, za 2005. godinu

Na slici 4.10 uz jednosatne srednjake neutralne gustoće na niskim (ljubičasta krivulja), srednjim (žuta krivulja) i visokim (narančasta krivulja) latitudama, prikazana je i vrijednost jednosatnih srednjaka neutralne gustoće bez podjele po latitudama (plava krivulja). Lijevi dio slike se odnosi na dnevnu stranu, a desni dio slike se odnosi na noćnu stranu termosfere. Vidi se kako sve krivulje i za dan i za noć prate isti trend. Očekivano, također je vidljivo kako dnevne krivulje poprimaju veće vrijednosti od noćnih. Zanimljivo, sami iznosi nisu jedina razlika između dnevne i noćne situacije. Naime, ako promotrimo samo noćnu situaciju tada je vidljivo kako se najviše vrijednosti poprimaju za visoke, potom za srednje i najmanje vrijednosti se postižu za niske latituda. S druge strane, ako promotrimo samo dnevnu situaciju tada vrijedi sasvim suprotno. Dakle, za LT=08-16 h najveća vrijednost se postiže za pojas niskih, a najmanja za pojas visokih latituda. Ovu različitost dnevne i noćne situacije potvrđuju i vrijednosti srednjaka u tablici 1. Srednjaci iz tablice 1 su izračunati iz podataka na jednosatnoj rezoluciji koji su prikazani na slici 4.10 i neznatno se razlikuju od srednjaka koji su izračunati iz podataka na originalnoj jednominutnoj rezoluciji.

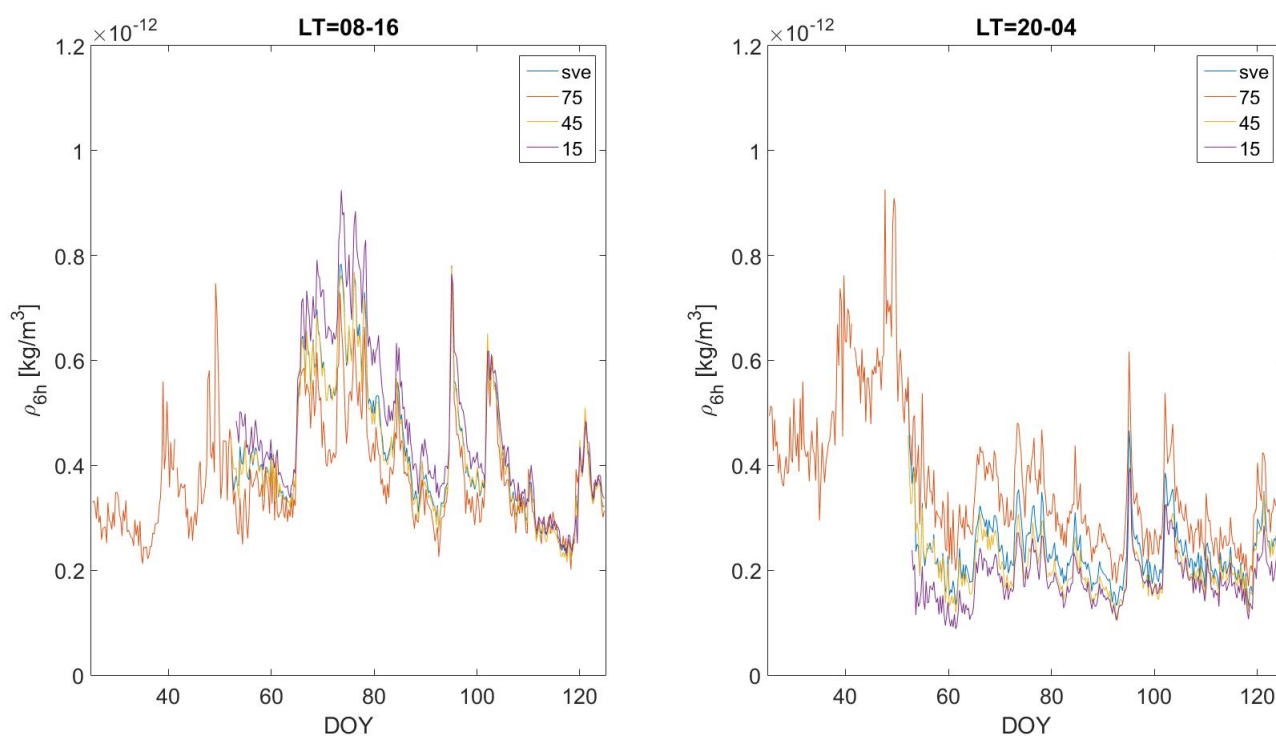


Slika 4.10. Neutralna gustoća na 1 h rezoluciji na 490 km za period DOY=25-125 za 2005. godinu. Dnevne vrijednosti, LT=08-16 h (lijevo) i noćne vrijednosti, LT=20-04 h (desno). Plava krivulja su vrijednosti bez razdiobe po latitudama, narančasta krivulja odgovara vrijednostima u najvišem, žuta u srednjem, a ljubičasta u najnižem latitudinalnom pojasu.

Tablica 4.1. Izračunate srednje vrijednosti krivulja na rezoluciji od 1 h za dan i noć s obzirom na latitudinalnu razdiobu

	$\rho_{dan}$ [ $10^{-13}$ kg/m <sup>3</sup> ]	$\rho_{noc}$ [ $10^{-13}$ kg/m <sup>3</sup> ]
75	3.8183	3.5316
45	4.2400	2.1193
15	4.7754	1.7938
sve	4.1098	2.9964

Na slici 4.11 prikazane su iste krivulje kao na slici 3.10, ali na rezoluciji od 6 h radi lakšeg uočavanja spomenutih različitosti između dnevne i noćne situacije. Usto, može se jasnije primijetiti kako plava krivulja, vrijednosti neutralne gustoće bez razdiobe po latitudinalnim pojasevima, poprima vrijednosti najslabije vrijednostima gustoće za pojas srednjih širina (žuta krivulja).



Slika 4.11. Neutralna gustoća na 6 h rezoluciji na 490 km za period DOY=25-125 za 2005. godinu. Dnevne vrijednosti, LT=08-16 h (lijevo) i noćne vrijednosti, LT=20-04 h (desno). Plava krivulja su vrijednosti bez razdiobe po latitudinama, narančasta krivulja odgovara vrijednostima u najvišem, žuta u srednjem, a ljubičasta u najnižem latitudinalnom pojasu.

U tablici 4.2 prikazane su vrijednosti koeficijenta poprečne korelacije i vremenski posmaci između geomagnetskih indeksa i najvišeg latitudinalnog pojasa za LT=0-24

h za 1 h i 6 h rezoluciju, a pripadne oznake su  $\tau_{1h}$  i  $\tau_{6h}$ , slijedom. Također, pripadne vrijednosti korelacije su označene s  $R_{1h}$  i  $R_{6h}$ . Treba napomenuti da su korelacije indeksa *Dst* i gustoće, za razliku od korelacija ostalih indeksa i gustoće, negativne. Ovo je posljedica smanjenja indeksa *Dst* za vrijeme geomagnetskih oluja dok se drugi indeksi povećavaju (slika 3.1). Najveća korelacija je "*Dst*- $\rho_{9060}$ " na 6 h rezoluciji i iznosi -0.75, a najmanja korelacija se postiže na 1 h rezoluciji za "*AE*- $\rho_{9060}$ " i iznosi 0.6.

Nadalje, u tablici 4.3 i 4.4 prikazane su vrijednosti koeficijenta poprečne korelacije i vremenskog posmaka između geomagnetskih indeksa i gustoće za tri različita latitudinalna pojasa na 1 h i 6 h rezoluciji za  $LT=8-16$  h i  $LT=20-4$  h, slijedom. Najveća korelacija za  $LT=8-16$  h je "*Dst*- $\rho_{9060}$ " za 6 h rezoluciju i iznosi -0.73, dakle, nešto manje nego je ista korelacija u tablici 4.2 za  $LT=0-24$  h. Najmanja korelacija je izračunata na 1 h rezoluciji i iznosi svega 0.35 za "*AE*- $\rho_{9060}$ ". Za noćnu situaciju,  $LT=20-4$  h najveća korelacija je za "*AE*- $\rho_{6030}$ " i "*Dst*- $\rho_{6030}$ " i iznosi 0.81 na 6 h rezoluciji, a najmanja korelacija za noćnu situaciju je, ponovno, na 1 h rezoluciji i iznosi 0.59 za "*AE*- $\rho_{9060}$ ".

Može se primijetiti kako je svaka pojedina korelacija veća na 6 h rezoluciji nego na 1 h rezoluciji. S druge strane, na 6 h rezoluciji nemamo dovoljno precizno izračunati vremenski posmak jer on iznosi, prema rezultatima na 1 h rezoluciji, svega par sati. Usporedbom tablice 4.2. i prve skupine korelacija iz tablica 4.3 i 4.4 primjećuje se kako postoji veća korelacija između indeksa i gustoće za visoki latitudinalni pojas za  $LT=0-24$  h nego za  $LT=8-16$  h i  $LT=20-4$  h. Usto, veće korelacije se postižu između geomagnetskih indeksa i gustoće, neovisno o pojasu, za  $LT=20-4$  h (tablica 4.4) nego za  $LT=8-16$  h (tablica 4.3). Drugačije rečeno, veće su korelacije izračunate za noć nego za dan. Ako promatramo iznos korelacije s obzirom na indekse, onda se vidi kako je korelacija najveća između *Dst* indeksa i gustoće, neovisno o  $LT$ -u i latitudinalnom pojasu.

Budući da je odaziv termosfere na pojačanu geomagnetsku aktivnost, prema vremenskim posmacima  $\tau_{1h}$  jako brz, svega par sati, može se reći da vremenski posmaci  $\tau_{6h}$  nisu relevantni za promatranje same brzine odaziva. Također, treba naglasiti kako su vrijednosti  $\rho_{1h}$  izračunate kao centrirani jednosatni srednjaci iz jednodominutnih podataka, a geomagnetski indeksi su veličine izvedene iz mjerenja komponentni geomagnetskog polja. Shodno tome, može postojati pogreška reda veličine pola sata zbog samog načina izvođenja i eventualnog drugačijeg načina centriranja geomagnetskih indeksa koji su na rezoluciji od 1 h preuzeti s OMNI baze podataka.

Treba primjetiti i kako su svi vremenski posmaci  $\tau_{1h}$  pozitivni, izuzev za korelaciju "*Dst*- $\rho_{9060}$ " u tablici 4.3 gdje je izračunati  $\tau_{1h}=-1$ . To znači da gustoća općenito kasni za geomagnetskim indeksima tj. da je poremećaj gustoće posljedica poremećaja geomagnetskih indeksa. Nadalje, može se primijetiti da je vremenski posmak korelacije

Tablica 4.2. Izračunati koeficijenti posmične korelacije  $R$  i vremenski posmaci  $\tau$  između neutralne gustoće za visoke širine za LT=0-24 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst.

	$R_{1h}$	$\tau_{1h}$ [h]	$R_{6h}$	$\tau_{6h}$ [h]
AE- $\rho_{9060}$	0.60	1	0.69	0
ap- $\rho_{9060}$	0.62	2	0.68	0
Dst- $\rho_{9060}$	-0.69	0	-0.75	-6

gustoće s indeksom Dst, u odnosu na korelacije s indeksima ap i AE najmanji. To znači da gustoća najmanje kasni za indeksom Dst ili čak odgovori prije samog indeksa kao što je to slučaj za gore navedenu iznimku negativnog  $\tau_{1h}$ .

Vremenski posmaci prikazani u tablici 4.3 jako dobro kvantiziraju brzinu preraspodjele energije u vidu TAD-ova od visokih prema niskim širinama koja je primijećena i kvalitativno opisana pomoću prostorno-vremenskih prikaza neutralne gustoće, na primjer, za "AE- $\rho_{9060}$ "  $\tau_{1h}=1$ , zatim za "AE- $\rho_{6030}$ "  $\tau_{1h}=2$  i konačno za "AE- $\rho_{3000}$ "  $\tau_{1h}=5$ . Iz ovoga zaključujemo kako na poremećaje AE indeksa najprije odgovori pojas visokih, zatim pojas srednjih, a kao posljednje imamo odgovor gustoće niskih latituda. Isto se može zaključiti ako se promotri vremenski posmak korelacija preostala dva indeksa s neutralnom gustoćom za različite latitudinalne pojaseve. Shodno tome, slijedi da je vrijeme putovanja poremećaja neutralne gustoće termosfere od polova prema ekvatoru približno 4 h. Uz pretpostavku da poremećaj u gustoći nastaje točno na  $\varphi = 90^\circ$  i za 4 sata se nalazi točno na ekvatoru  $\varphi = 0^\circ$  slijedi da je prevaljeni put  $s=9952.2$  km (uz pretpostavku da  $1^\circ$  geografske širine odgovara 110.58 km) pa prema  $v = s/t$  slijedi da je brzina TAD-ova otprilike 700 m/s.

Situacija u tablici 4.4 je različita u odnosu na gore opisanu situaciju u tablici 4.3. Dakle, ne može se reći da noćna strana termosfere pokazuje jednaku preraspodjelu energije kao što je to slučaj za dnevnu stranu. Jedino se vrijednosti posmaka za korelaciju indeksa Dst s gustoćom povećavaju sa smanjenjem širine, za druga dva indeksa AE i ap najveće vrijednosti  $\tau_{1h}$  se postižu u korelaciji s  $\rho_{6030}$ . Različitost u preraspodjeli energije za dnevnu i noćnu stranu termosfere već je primijećena i u kvalitativnom opisu pomoću prostorno-vremenskog prikaza neutralne gustoće.

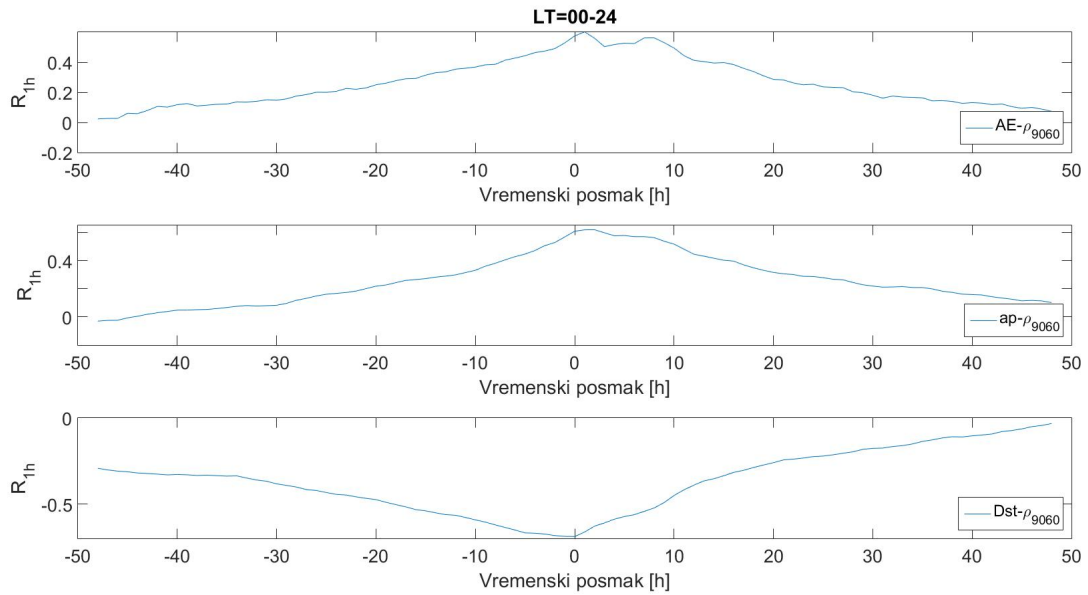
Tablica 4.3. Izračunati koeficijenti posmične korelacije  $R$  i vremenski posmaci  $\tau$  između neutralne gustoće za visoke, srednje i niske širine za LT=8-16 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst.

	$R_{1h}$	$\tau_{1h}$ [h]	$R_{6h}$	$\tau_{6h}$ [h]
AE- $\rho_{9060}$	0.57	1	0.66	0
ap- $\rho_{9060}$	0.60	1	0.66	0
Dst- $\rho_{9060}$	-0.66	-1	-0.73	-6
AE- $\rho_{6030}$	0.45	2	0.49	0
ap- $\rho_{6030}$	0.48	2	0.50	0
Dst- $\rho_{6030}$	-0.61	0	-0.63	0
AE- $\rho_{3000}$	0.35	5	0.39	6
ap- $\rho_{3000}$	0.40	5	0.40	6
Dst- $\rho_{3000}$	-0.53	3	0.54	0

Tablica 4.4. Izračunati koeficijenti posmične korelacije  $R$  i vremenski posmaci  $\tau$  između neutralne gustoće za visoke, srednje i niske širine za LT=20-4 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst.

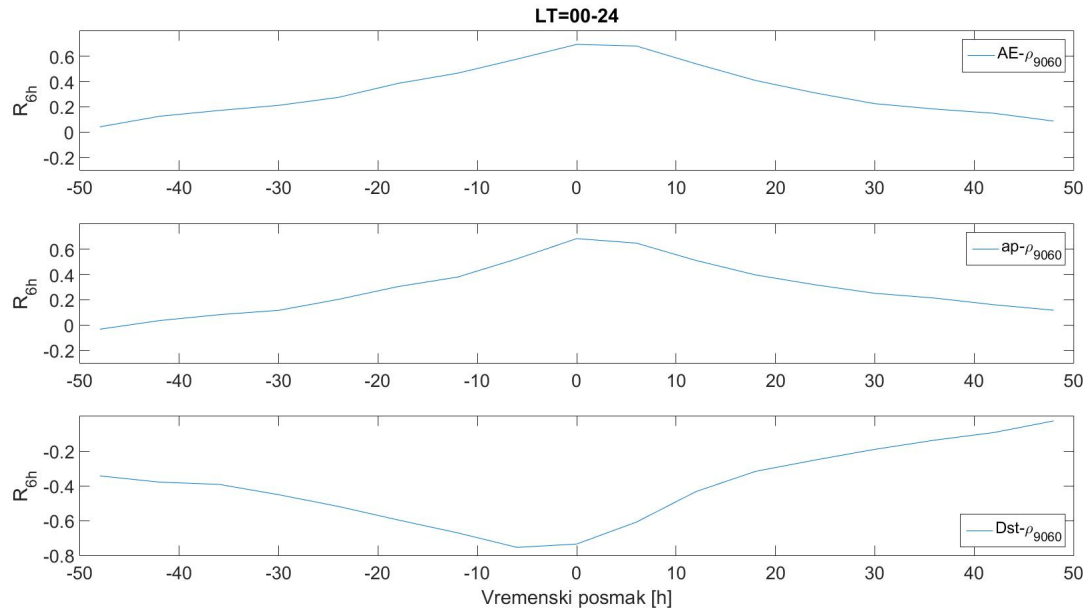
	$R_{1h}$	$\tau_{1h}$ [h]	$R_{6h}$	$\tau_{6h}$ [h]
AE- $\rho_{9060}$	0.59	1	0.73	6
ap- $\rho_{9060}$	0.60	2	0.70	0
Dst- $\rho_{9060}$	-0.67	0	-0.77	-6
AE- $\rho_{6030}$	0.64	7	0.81	6
ap- $\rho_{6030}$	0.66	6	0.75	6
Dst- $\rho_{6030}$	-0.71	1	-0.81	0
AE- $\rho_{3000}$	0.64	4	0.77	6
ap- $\rho_{3000}$	0.69	5	0.75	6
Dst- $\rho_{3000}$	-0.73	3	-0.80	0

Na slici 4.12 prikazane su krivulje posmične korelacije između geomagnetskih indeksa  $AE$ ,  $ap$  te  $Dst$  i gustoće na visokim latitudama  $\rho_{9060}$  za  $LT=0-24$  h na 1 h rezoluciji. Na slici 4.13 je prikazano isto, ali na 6 h rezoluciji. Očekivano, krivulje su izglađenije na 6 h nego na 1 h rezoluciji i na 6 h rezoluciji postižu se veće vrijednosti korelacije, vidljivo i u tablici 4.2. Krivulje ostalih posmičnih korelacija iz kojih su izračunati Pearsonovi koeficijenti korelacije i vremenski posmaci navedeni u tablicama 4.3 i 4.4 mogu se pronaći u dodatku B.



Slika 4.12. Funkcije poprečne korelacije na 1 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$  za  $LT=0-24$  h i geomagnetskih indeksa  $AE$ ,  $ap$  i  $Dst$ , slijedom, od vrha prema dnu.





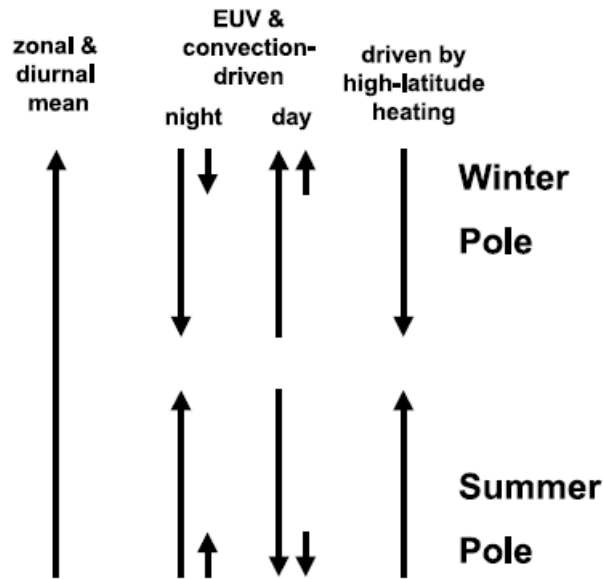
Slika 4.13. Funkcije poprečne korelacije na 6 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$  za LT=0-24 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst, slijedom, od vrha prema dnu.

## 5. Diskusija

Uočili smo da je asimetrija dan-noć jako izražena. Poremećaji su puno uočljiviji na dnevnoj strani i moguće ih je pratiti sve od mjesta nastanka, polarnih širina, do ekvatorijalnih širina. Ovakva asimetrija se ne uočava u Krauss i sur. (2015) gdje su prikazani TAD-ovi za 3 uzastopna CME-a u srpnju 2004. S druge strane, prema istraživanju Bruinsma i Forbes (2008) koji su promatrali ukupno 21 TAD u razdoblju 2001.-2007. prema kriteriju Kp 3.3-9, TAD-ovi koji propagiraju s dnevne strane su istaknutiji i njihovu je propagaciju od polova prema ekvatoru lakše pratiti. Također, primijetili su kako je više težinskih valova pobuđeno s noćne strane, ali nedovoljno velikih valnih duljina da ostvare propagaciju prema ekvatoru. Ovo je u skladu sa situacijom na slikama 4.1 do 4.5. Nadalje, Forbes i sur. (2005) su promatrali odgovor termosfere na pojavu tri uzastopna CME-a u razdoblju 15.-24. ožujka 2002., za  $LT \sim 4:30$  h i  $LT \sim 15:30$  h. Ova lokalna vremena najbolje odgovaraju situaciji koja je prikazana na slici 4.3. Prostorno-vremenski prikaz neutralne gustoće sa slike 4.3 podsjeća upravo na situaciju prikazanu u tom istraživanju. Naime, poremećaji na dnevnoj strani su izraženiji i uočavaju se TAD-ovi, dok je na noćnoj strani zabilježen odgovor termosfere u neposrednoj blizini polova, ali i znatno slabija daljnja propagacija prema ekvatoru. Samo su dva poremećaja rezultirala pojavom TAD-ova na noćnoj strani koji su prema intenzitetu usporedivi s onima na dnevnoj strani. Prvi, na slici 4.2 koji se povezuje s događajem 3 na slici 3.1 i drugi koji je vidljiv na prostorno-vremenskom prikazu neutralne gustoće na slici 4.4, a povezuje se s događajem 8 na slici 3.1. Možda je ovo posljedica utjecaja ljetno-zimske cirkulacije koja je suprotnog smjera od smjera rasprostiranja TAD-ova na noćnoj strani, ali utvrđivanje utjecaja ove cirkulacije nadilazi ciljeve rada. Teoretski je za očekivati kako će, sasvim suprotno, TAD-ovi s dnevne strane značajnije atenuirati zbog veće gustoće neutrala ali i zbog veće gustoće neutrala i većeg broja nabijenih čestica uslijed čega će sudari biti učestaliji. Međutim, prema Bruinsma i Forbes (2008) i prema Bruinsma i sur. (2006) disipacija energije zbog sudara iona i neutrala nije dovoljno velika da bi značajno utjecala na rasprostiranje TAD-ova osim možda u maksimumu Sunčeve aktivnosti, što nije slučaj za ovdje promatran period. Također, autori naglašavaju kako pozitivna i negativna interferencija različitih težinskih valova pobuđenih na polovima, uvelike određuje amplitudu valova koji propagiraju.

Svaki poremećaj neutralne gustoće izazvan pojačanom geomagnetskom aktivnošću, koji je prikazan na slikama 4.1 do 4.5 treba interpretirati u kontekstu već postojeće cirkulacije termosfere. Najprije treba spomenuti cirkulaciju koja je posljedica nejednakosti u temperaturi između zimske i ljetne hemisfere (engl. summer-to-winter circulation). Usto, treba istovremeno razmišljati o efektima koje na uočene poremećaje

može imati efekt dnevnog zagrijavanja (engl. diurnal heating) odnosno pojava dnevnih vjetrova (engl. tidal/diurnal winds). Posljedično se javlja meridionalna cirkulacija (na dnevnoj strani usmjerena prema ekvatoru, a tijekom noći je usmjerena prema polovima), a koja može pojačati ili umanjiti utjecaj zimsko-ljetne cirkulacije na rasprostiranje TAD-ova (Forbes, 2007; Prölss i Bird, 2004). Na slici 5.1 je shematski prikazan smjer navedenih cirkulacija. Nadalje, oslobođena Jouleova toplina je zbog povećane ionizacije veća u ljetnom auroralnom području, nego u zimskom auroralnom području. Zbog svega ovoga možemo očekivati asimetriju u samom izvoru poremećaja, ali i u načinu i brzini propagacije. Asimetrija zbog različite količine oslobođene Jouleove topline u polarnim predjelima zimske i ljetne hemisfere se može uočiti na slikama 4.1 i 4.2. Preciznije, za događaje 1, 2 i 3 sa slike 3.1 primjećuje se veće povećanje gustoće u neposrednoj blizini južnog pola, nego u blizini sjevernog pola. Za ostale identificirane TAD-ove se ne uočava ova asimetrija u neposrednoj blizini samog izvora pobude, što je u skladu s očekivanjima, jer se intezitet ionizacije oko sjevernog i južnog pola izjednačava kako Zemlja ide od Perihela prema Afelu, to jest iz zime u proljeće na sjevernoj hemisferi. Isti ovaj efekt može se uočiti na slikama 4.6 i 4.7, gdje krivulje za južnu hemisferu pokazuju veće vrijednosti od krivulja za sjevernu hemisferu. Ovaj efekt je najvidljiviji na visokim, a najmanje vidljiv na niskim širinama što je također u skladu s očekivanjima kako je on posljedica pojačanog Jouleova zagrijavanja upravo u neposrednoj blizini polova. Usto, ovaj efekt se smanjuje na svim širinama kako Zemlja ide od zime prema proljeću na sjevernoj hemisferi. Na slikama 4.6 i 4.7 razlika između krivulje za sjevernu i južnu hemisferu je značajna do  $DOY \sim 75$ , što kalendarski odgovara datumu 16. ožujka.



Slika 5.1. Smjerovi različitih strujanja koji utječu na advekciju poremećaja neutralne gustoće od polarnih prema ekvatorskim područjima. Preuzeto iz Bruinsma i sur. (2006)

Sa slika 4.10 i 4.11 se može zaključiti da tijekom dana dominira utjecaj Sunčeva EUV zračenja zbog čega se na nižim širinama bilježe najveće gustoće termosfere, a na višim širinama manje vrijednosti. Za noćnu situaciju vrijedi sasvim suprotno, najviše vrijednosti gustoće postižu se upravo na polovima što može biti posljedica unosa Jouleove topline, ali i strujanja neutralnog vjetrova preko polova sa dnevne na noćnu stranu.

Kao što je ranije spomenuto, korelacije između neutralne gustoće i različitih geomagnetskih indeksa su izračunate na rezoluciji od 1 h i 6 h, a dobiveni koeficijenti korelacije su veći rezoluciji od 6 h nego 1 h. Razlog leži u činjenici da na rezoluciji od 6 h oscilacije neutralne gustoće visokih frekvencija koje se mogu učiti na slikama 4.8 i 4.10, ne postoje (vidljivo na slikama 4.9 i 4.11) pa ne utječu na rezultate korelacijske analize. Budući da su ove visokofrekventne oscilacije isključivo posljedica dan-noć razlike u gustoći termosfere, nisu relevantne za promatranje poremećaja u gustoći koji su uzrokovani geomagnetskim olujama. Također, najveće korelacije su dobivene između neutralne gustoće (neovisno o latitudinalnom pojasu) i indeksa Dst što je u skladu s rezultatima opisanim u Krauss i sur. (2015) i navodima tamo. U tom istraživanju korelacija s indeksom Dst u odnosu na korelaciju s indeksima Kp i AE indeksom je veća, a razlog smanjene korelacije je u nelinearnom odnosu ovih indeksa i neutralne gustoće termosfere. Također, prema izračunatim vremenskim posmacima na 1 h rezoluciji koji su prikazani u tablici 4.3 (za LT=8-16 h) slijedi da je odgovor termosfere na visokim širinama relativno brz, do jednog sata, a 4 sata nakon dolazi do odgovora termosfere niskih širina. Ovo je u skladu s rezultatima prikazanim u članku Bruinsma i sur. (2006)

gdje je isti vremenski period odgovora izračunat za geomagnetske oluje u periodu 20. - 21. studenoga 2003. Ovaj vremenski period vodi na brzine rasprostiranja TAD-ova od otprilike 700 m/s što je u skladu s brzinama izračunatim u Bruinsma i Forbes (2008) i Forbes i sur. (2005). Iz vremenskih posmaka koji su prikazani u tablici 4.4 (za  $LT=20-8$  h) ne možemo zaključiti o brzini rasprostiranja TAD-ova jer je izračunati vremenski posmak za srednji pojas latituda veći nego za niski pojas latituda. Ovo ne čudi budući da iz prostorno-vremenskog prikaza neutralne gustoće, osim za dva događaja sa slike 3.1 (4 i 8) ne uočavamo globalnu preraspodjelu energije u vidu TAD-ova s noćne strane.

## 6. Zaključak

Fizikalno stanje termosfere poput iznosa neutralne gustoće i razdiobe po geografskim pojasevima, propagacija poremećaja, kao i globalna ibucija energije u silaznoj fazi Sunčevih ciklusa nije u potpunosti objašnjena, a upravo je poboljšanje razumijevanja ovih karakteristika termosfere bila motivacija za rad.

Promatran je period pojačane geomagnetske aktivnosti, 25.1.2005. - 5.5.2005. Geomagnetska aktivnost u tom razdoblju je uvjetovana HSS-ovima koji potječu od tri dugoživuće CH koje su međusobno bile razmaknute za približno  $120^\circ$  heliografske dužine, dok je aktivnost zbog CME-ova u tom periodu jako niska (Verbanac i sur., 2011a,b). Kako bi se utvrdio odgovor termosfere u vidu promjene neutralne gustoće, korišteni su podaci o neutralnoj gustoći koji su izračunati iz mjerenja akceleracije GRACE misije koji su prethodno normalizirani na visinu od 490 km i izglađeni 5-minutnim pomičnim filterom (Krauss i sur., 2015).

Najprije je vizualno potvrđena periodičnost odgovora termosfere na nalete HSS-ova. Svih 11 događaja koji su zapaženi u Verbanac i sur. (2011a,b) za taj period su uočeni u podacima neutralne gustoće. Između ostalog, ovim radom je potvrđeno kako pojačana konvekcija plazme na visokim polarnim širinama ne samo da ekspandira termosferu u neposrednoj blizini već nadalje dolazi do globalne preraspodjele energije. Naime, uočili smo TAD-ove, glavni mehanizam globalne ibucije energije unesene u IT sustav, a koja je posljedica pojačane geomagnetske aktivnosti. Zaključeno je kako su TAD-ovi vidljiviji s dnevne strane, dakle postoji asimetrija u odgovoru dnevne i noćne strane. Međutim, asimetrija je utvrđena ne samo u propagaciji TAD-ova već i u neposrednoj blizini samog izvora pobude. Ova asimetrija u blizini polova je posljedica veće ionizacije na ljetnoj polutki. Dakle, u ovom periodu se radi o jačoj pobudi u blizini južnog geografskog pola.

Kvantitativni opis vizualno uočenog odgovora termosfere na pojačanu geomagnetsku aktivnost uzrokovanu HSS-ovima određen je primjenom metode poprečne korelacije-izračunat je Pearsonov koeficijent korelacije i vremenski posmak za koji je korelacija između neutralne gustoće i geomagnetskih indeksa  $AE$ ,  $ap$  i  $Dst$  najveća. Pozitivni vremenski posmaci sugeriraju kako je poremećaj neutralne gustoće posljedica pojačane geomagnetske aktivnosti što je u skladu s očekivanjima. Najmanji vremenski posmak je izračunat za  $Dst$  indeks što sugerira kako upravo indeks  $Dst$  posljednji reagira na pojačanu geomagnetsku aktivnost što je u skladu s rezultatima objavljenim u Verbanac i sur. (2011a,b).

Kako bismo proučili različitost odgovora dnevne i noćne strane podaci su razvrstani s obzirom na LT tako da su podaci za koje je  $LT=8-16$  h prikazani kao dnevni, a oni za koje je  $LT=20-4$  h su karakterizirani kao noć. Također, izvršena je podjela prema latitudinalim pojasevima tako da razlikujemo ukupno tri skupine 1)  $\varphi \in ([90^\circ, 60^\circ) \cup$

$[-90^\circ, -60^\circ)$ ), 2)  $\varphi \in ([60^\circ, 30^\circ) \cup [-60^\circ, -30^\circ)$  i 3)  $\varphi \in ([30^\circ, 0^\circ] \cup [-30^\circ, 0^\circ]$ ). Izračunati koeficijenti korelacije pokazuju veću korelaciju između gustoće s noćne strane i geomagnetskih indeksa nego s dnevne strane. Također, najveće korelacije, neovisno o latitudinalnom pojasu i dnevno-noćnoj situaciji su izračunate za *Dst* indeks što je u skladu s istraživanjem Krauss i sur. (2015). Promatranjem izračunatog vremenskog posmaka s dnevne strane, dakle za  $LT=8-16$  h, najmanji vremenski posmak za korelacije gustoće sa svim geomagnetskim indeksima je izračunat za gustoću u skupini 1), dakle za visoke širine. Suprotno, najveći vremenski posmak je izračunat između geomagnetskih indeksa i treće skupine, dakle, niskih širina. Ovo potvrđuje propagaciju TAD-ova od polarnih ka ekvatorijalnim širinama. U skladu s time možemo reći da je vrijeme odgovora termosfere na visokim širinama do jednog sata, a na niskim širinama do 5 sati. Shodno tome, vrijeme potrebno za putovanje TAD-ova od pola do ekvatora je otprilike 4 sata što nas vodi na brzinu propagacije poremećaja od otprilike 700 m/s što je u skladu s dosadašnjim istraživanjima (Bruinsma i Forbes, 2008; Bruinsma i sur., 2006). S noćne strane, za  $LT=20-4$  h nije uočena ova pravilnost u vremenskom odazivu termosfere. Najmanje vremena je očekivano potrebno za odgovor pojas visokih širina ali je zato izračunati vremenski posmak za niske širine manji nego za pojas srednjih širina. Budući da TAD-ovi s noćne strane nisu izraženi kao s dnevne strane, ovakav rezultat za vremenske posmake ne iznenađuje.

Treba naglasiti da je IT sustav izuzetno kompleksan, forsiran ne samo od magnetosfere već i s donje strane, dakle nižih dijelova atmosfere, a rezultati ovog rada mogu doprinijeti objašnjavanju iznimno kompleksne slike funkcioniranja IT sustava. Shodno tome, rezultati i navedeni zaključci bi u konačnici mogli doprinijeti ispitivanju i poboljšanju postojećih IT modela ali i omogućiti lakše predviđanje pada satelita u neposrednoj Zemljinoj okolini te poboljšanju prognoze u okviru svemirskog vremena. Ovime se sprječava sudaranje letjelica i produljuje vrijeme misija što ima veliki značaj u tehnološkom društvu kakvog danas poznajemo.

## Literatura

- Bowman, B. R., W. K. Tobiska, F. A. Marcos, C. Y. Huang, C. S. Lin, i W. J. Burke (2008). A new empirical thermospheric density model JB2008 using new solar and geomagnetic indices. Paper presented at AIAA/AAS Astrodynamics Specialist Conference, AIAA 2008-6438, Honolulu, Hawaii, 18-21 Aug.
- Bruinsma, S., J. M. Forbes, R. S. Nerem, i X. Zhang (2006, June). Thermosphere density response to the 20-21 November 2003 solar and geomagnetic storm from CHAMP and GRACE accelerometer data. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 111(A6), A06303.
- Bruinsma, S. L. i J. M. Forbes (2008, December). Properties of Traveling Atmospheric Disturbances (TADs) Inferred From CHAMP and GRACE Accelerometer Observations. In *AGU Fall Meeting Abstracts*, Volume 2008, pp. SA21B–1541.
- Campbell, W. H. (2003). *Introduction to Geomagnetic Fields: Second Edition*.
- Cranmer (2001). Coronal holes. In P. Murdin (Ed.), *Encyclopedia of Astronomy and Astrophysics*, Chapter 10, pp. 266–290. Hampsire: Nature Publishing Group.
- Forbes, J. M. (2007, March). Dynamics of the Thermosphere. *Journal of Meteorological Society of Japan* 85B, 193–215.
- Forbes, J. M., G. Lu, S. Bruinsma, S. Nerem, i X. Zhang (2005, December). Thermosphere density variations due to the 15-24 April 2002 solar events from CHAMP/STAR accelerometer measurements. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 110(A12), A12S27.
- Gibbson, J. i S. Chakraborti (2011). *Nonparametric Statistical Inference.: Fifth Edition*. CRC Press.
- Karttunen, H., P. Kroger, H. Oja, M. Poutanen, i K. J. Donner (2006). *Fundamental Astronomy: Fifth Edition*. Springer.
- Krauss, S., M. Temmer, i S. Vennerstrom (2018, October). Multiple Satellite Analysis of the Earth’s Thermosphere and Interplanetary Magnetic Field Variations Due to ICME/CIR Events During 2003-2015. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 123(10), 8884–8894.
- Krauss, S., M. Temmer, A. Veronig, O. Baur, i H. Lammer (2015, October). Thermospheric and geomagnetic responses to interplanetary coronal mass ejections observed by ACE and GRACE: Statistical results. *Journal of Geophysical Research (Space Physics)* 120(10), 8848–8860.



- Oliveira, D. M. i E. Zesta (2019, November). Satellite Orbital Drag During Magnetic Storms. *Space Weather* 17(11), 1510–1533.
- Prölss, G. W. i M. K. Bird (2004). *Physics of the Earth's Space Environment: an introduction*.
- Richardson, I. G. (2004, April). Energetic Particles and Corotating Interaction Regions in the Solar Wind. 111(3), 267–376.
- Tapley, B. D., S. Bettadpur, M. Watkins, i C. Reigber (2004, May). The gravity recovery and climate experiment: Mission overview and early results. 31(9), L09607.
- Temmer, M., B. Vršnak, i A. M. Veronig (2007, April). Periodic Appearance of Coronal Holes and the Related Variation of Solar Wind Parameters. 241(2), 371–383.
- Verbanac, G., B. Vršnak, A. Veronig, i M. Temmer (2011, February). Equatorial coronal holes, solar wind high-speed streams, and their geoeffectiveness. 526, A20.
- Verbanac, G., B. Vršnak, S. Živković, T. Hojsak, A. M. Veronig, i M. Temmer (2011, September). Solar wind high-speed streams and related geomagnetic activity in the declining phase of solar cycle 23. 533, A49.
- Vršnak, B., M. Temmer, i A. M. Veronig (2007). Coronal Holes and Solar Wind High-Speed Streams I. Forecasting the Solar Wind Parameters. *Solar Physics* 240(2), 315–330.
- Zhang, Y., J. L. Paxton, i D. Morrison (2010). Auroral and thermospheric response to the 9 dayperiodic variations in the dayside reconnectionrate in 2005. *Space Weather* 8, 07001.

# Dodatci

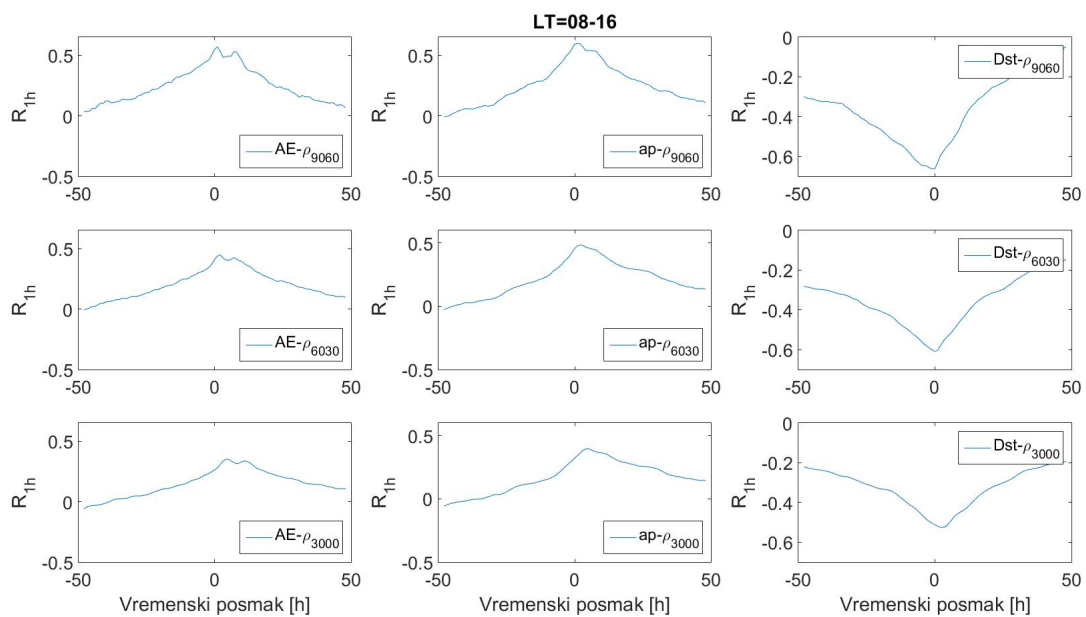
## A Popis kratica

Popis kratica korištenih u radu:

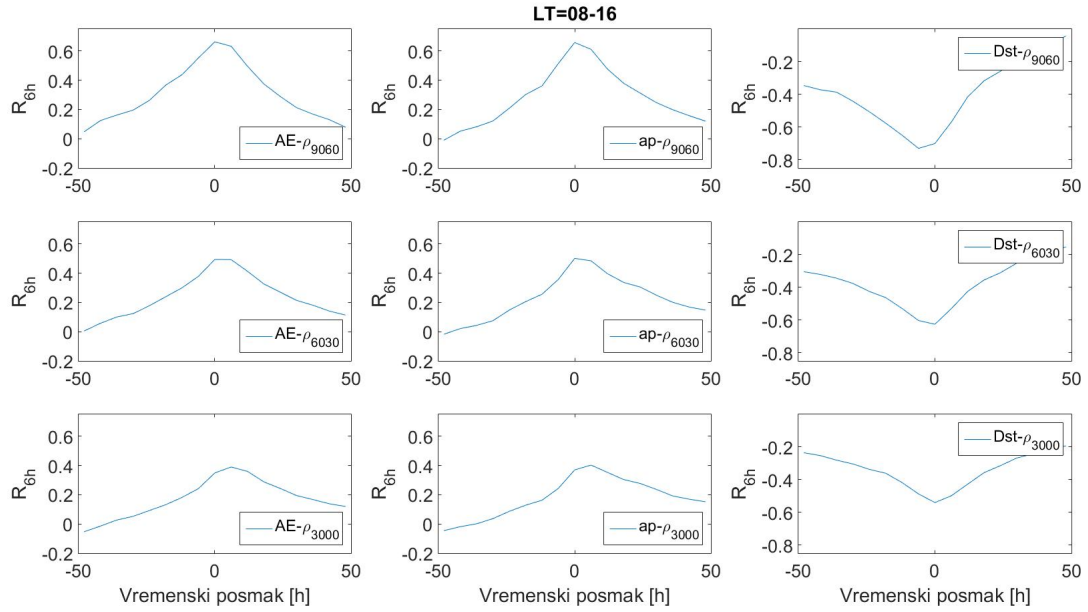
CME	koronini izbačaji mase (engl. <i>coronal mass ejection</i> )
HSS	brze struje Sunčeva vjetra (engl. <i>high-speed streams</i> )
CH	koronine šupljine (engl. <i>coronal holes</i> )
CIR	ko-rotirajuća područja međudjelovanja (engl. <i>co-rotating interacting regions</i> )
IGW	interni težinski valovi (engl. <i>internal gravity waves</i> )
TAD	putujući atmosferski poremećaj (engl. <i>travelling atmospheric disturbance</i> )
CMB	granice kora-plašt (engl. <i>core-mante boundary</i> )
DOY	dan u godini (engl. <i>day of the year</i> )
GRACE	(engl. <i>Gravity Recover and Climate Experiment</i> )
LT	lokalno vrijeme (engl. <i>local time</i> )

## B Krivulje poprečne korelacije

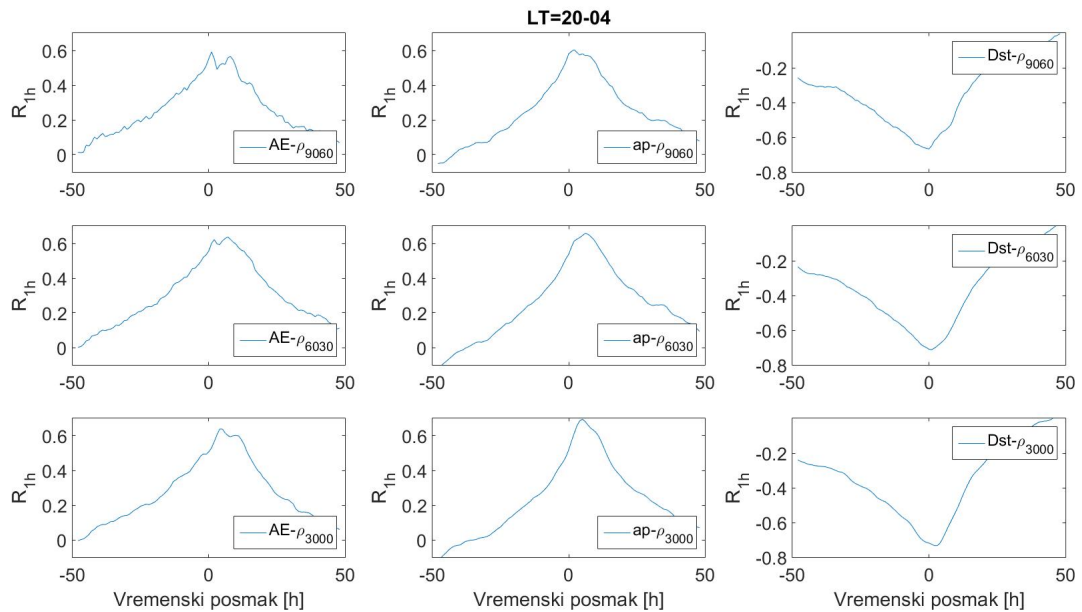
U ovom dodatku su prikazane krivulje korelacije iz kojih su izračunati vremenski posmaci i maksimalni Pearsonovi koeficijenti korelacije prikazani u tablicama 4.3 i 4.4. Slika B1 prikazuje krivulje korelacije za tablicu 4.3,  $LT=8-16$  h, za 1 h rezoluciju, a slika B2 prikazuje krivulje korelacije također za tablicu 4.3,  $LT=8-16$  h ali za 6 h rezoluciju. Nadalje, na slici B3 i B4 su prikazane krivulje korelacije za  $LT=20-4$  h na 1 h i 6 h rezoluciji, slijedom.



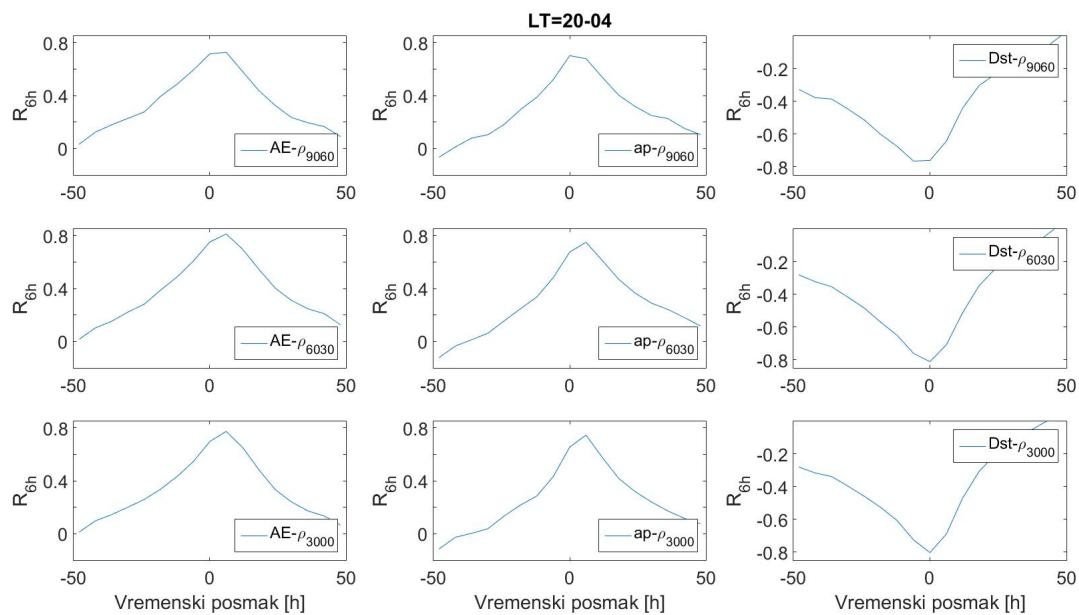
Slika B1. Funkcije poprečne korelacije na 1 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$ , srednje širine  $\rho_{6030}$  i niske širine  $\rho_{3000}$ , za  $LT=8-16$  h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst, slijedom, od vrha prema dnu.



Slika B2. Funkcije poprečne korelacije na 6 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$ , srednje širine  $\rho_{6030}$  i niske širine  $\rho_{3000}$ , za LT=8-16 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst, slijedom, od vrha prema dnu.



Slika B3. Funkcije poprečne korelacije na 1 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$ , srednje širine  $\rho_{6030}$  i niske širine  $\rho_{3000}$ , za LT=20-4 h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst, slijedom, od vrha prema dnu.



Slika B4. Funkcije poprečne korelacije na 6 h rezoluciji koje opisuju odnos između neutralne gustoće za visoke širine  $\rho_{9060}$ , srednje širine  $\rho_{6030}$  i niske širine  $\rho_{3000}$ , za  $LT=20-4$  h i geomagnetskih indeksa AE, ap i Dst, slijedom, od vrha prema dnu.

## C Programi i podaci priloženi na CD-u

Popis MATLAB skripti korištenih u analizi. Skripte se zajedno s podacima nalaze se na CD-u.

1. opservatoriji.m
  - Skripta daje prostorni razmještaj opservatorija čija se mjerenja koriste u računanju Dst, ap i AE geomagnetskih indeksa. Rezultat je slika 2.3.
2. nadopuna.m
  - Skripta stavlja NaN-ove tamo gdje nedostaju podaci za promatrani vremenski period.
3. matrix\_plot\_all\_intervals.m
  - Skripta uz poziv funkcije matrixplot.m crta prostorno-vremensku razdiobu gustoće prikazanu na slikama 4.1-4.5.
4. vremenski\_nizovi.m
  - Skripta daje grafički prikaz vremenske ovisnosti geomagnetskih Dst, ap i AE indeksa. Rezultat je slika 3.1.
5. usrednjavanje.m
  - Skripta radi centrirano usrednjavanje na rezoluciji od 1 h, a kao rezultat daje i sliku 3.2.
6. 6pojasa1h.m i 6pojasa6h.m
  - Skripte rade podjelu podataka prema LT-u i podjelu na 6 latitudinalnih pojaseva na rezoluciji od 1 h i 6 h. Rezultat su slike 4.6 i 4.7.
7. usporedba1h.m i usporedba6h.m
  - Skripte grafički prikazuju vremenske nizove, na rezoluciji od 1 h i 6 h : neutralna gustoća  $\rho$  na visokim latitudama za LT=0-24 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=08-16 h, na srednjim i niskim latitudama za LT=20-04 h, AE, ap i Dst. Rezultat su slike 4.8 i 4.9.
9. 3pojasa1h.m i 3pojasa6h.m
  - Skripte rade podjelu podataka prema LT-u i podijelu na 3 latitudinalna pojasa na rezoluciji od 1h i 6 h. Rezultat su slike 4.10 i 4.11.
10. crosacor\_DOY=65\_1h.m i crosacor\_DOY=65\_6h.m
  - Skripte uz poziv funkcije lagged\_pearson2.m računaju koeficijente korelacije i pripadne vremenske posmake. Rezultati su prikazani u tablicama 4.2-4.4 i na slikama 4.12 i 4.13 te u dodatku B.