

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO – MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

**RAZDIOBA EKVATORIJALNOG ELEKTROMLAZA  
TIJEKOM SOLARNO MIRNIH DANA U 2006. g**

Diplomski rad

Bojan Markičević

Voditelj:

Dr. sc. Antun Marki

Zagreb, 2011.

**Mojoj dragoj majci!**

Ovaj rad je u potpunosti napravljen pod stručnim uputama doc. dr. sc. Giuliane Verbanac, kojoj zahvaljujem od srca na svim razgovorima, savjetima, idejama i strpljenju tijekom izrade. Također zahvaljujem na nesebičnoj pomoći Eugenu Vujić i Slaviši Živković koji su svojim vještinama i znanjem uvelike pomogli u ključnim dijelovima računa i interpretacije.

# Sadržaj

Sažetak .....	1
1. <i>Općenito o magnetskom polju Zemlje</i> .....	2
2. Mjerenja i prezentacija geomagnetskog polja.....	5
3. Magnetosfera i ionosfera.....	9
4. Geomagnetska aktivnost .....	15
4.1. K indeks.....	15
4.2. Dst indeks.....	18
4.3. Ostali geomagnetski indeksi .....	21
5. Ekvatorijalni elektromlaz .....	22
5.1. Model razdiobe strujne gustoće kao uzrok geomagnetskih varijacija mirnog dana .....	28
5.2. Longitudinalna ovisnost EEJ.....	37
6. Obrada podataka.....	40
6.1. Dnevni hod po postajama.....	43
7. Eliminacija solarno mirnih varijacija i doprinosa glavnog polja .....	59
8. Određivanje parametara po postajama .....	63
9. Prikaz ekvatorijalnog elektromlaza.....	72
10. Zaključak.....	76
Dodatak 1: Modeli.....	79
Dodatak 2: Programi .....	80
Literatura .....	82
Zahvala .....	87

## Sažetak

U ovom su radu objašnjene standardne manifestacije Zemljinoga magnetskog polja i sustava ionosferskih struja. Predmet su rada ekvatorijalni pojas i pripadajući ionosferski strujni sustav, tzv. ekvatorijalni elektromlaz (eng. *Equatorial electrojet* – EEJ), tanki strujni mlaz koji teče prema istoku na osunčanoj strani planeta. Tijekom 2006. godine izdvojeni su geomagnetski mirni dani za svaki mjesec na osnovi Dst indeksa i  $K_p$  indeksa za svako godišnje doba promatrane godine. Na osnovi površinskih mjerena sedam ekvatorijalnih opservatorija INTERMAGNET mreže modelirana je razdioba gustoće EEJ na visini 110 km. Unutar ekvatorijalnog pojasa magnetski učinak EEJ na površini Zemlje zamaskiran je utjecajem solarno mirnog (eng. *Solar quiet* –  $Sq$ ) strujnog sustava umjerenih širina. Oduzimanjem  $Sq$  doprinosa i doprinosa glavnog polja po IGRF modelu 11-te generacije, iz mjerena vrijednosti dobiven je efekt prouzročen najvećim dijelom EEJ. Upotreboom modela kvadratne distribucije guste struje ([Onwumechili, 1967.](#)) određeni su latitudinalni strujni profili iznad opservatorija, te je u kombinaciji s modelom longitudinalne ovisnosti ([Doumouya i sur., 2003.](#)) koji uključuje i ovisnost o lokalnom vremenu, određena razdioba strujne gustoće EEJ. Za određivanje vrijednosti longitudinalne razdiobe za svaki od 16 odabralih dana izračunati su parametri prezadanog sustava nelinearnih jednadžbi ([Rigoti i sur., 1999.](#)) koji slijede iz kvadratne distribucije guste struje. Priroda longitudinalnih i latitudinalnih nejednakosti ukazuje na to kako je EEJ najširi na području Južne Amerike, Atlantskog oceana i zapadne Afrike, gdje se nalazi veliko područje minimuma ukupnog glavnog polja. Najveće vrijednosti EEJ poprima zapadno od Južne Amerike te njegova širina ondje postaje najmanja. Najmanji se iznosi strujne gustoće javljaju na području jugozapadne Azije gdje se nalazi minimum u horizontalnoj komponenti glavnog polja. Iznosi strujne gustoće EEJ poprimaju više iznose u slučajevima uskog strujnog mlaza, posebno na području iznad opservatorija Huancayo u Peruu. Pokazuje se kako je jačina EEJ obrnuto proporcionalna s intenzitetom glavnog polja duž geomagnetskog ekvatora.

## **1. Općenito o magnetskom polju Zemlje**

Geomagnetsko polje magnetsko je polje planeta Zemlje i ono je istodobno prostrano i složeno. Zemljino magnetsko polje pokazuje varijabilnost na svim vremenskim skalamama; od nanosekunde do perioda od nekoliko milijuna godina. Najkraće su varijacije eksternog podrijetla, povezane s interakcijom Sunčevog vjetra sa Zemljinim vlastitim magnetskim poljem, kao i Zemljinom višom atmosferom. Stogodišnje promjene, tzv. sekularne varijacije, unutarnjeg su podrijetla. Prosječna godišnja vrijednost polja detaljno je određena satelitskim motrenjima tijekom 1980. Prijašnji su se godišnji hodovi temeljili na podatcima s geomagnetskih opservatorija, dopunjeni terenskim mjerjenjima te ispravljeni na neka određena vremena na osnovi uočenih sekularnih varijacija prethodnih godina.

Ukupno Zemljino magnetsko polje možemo razložiti na dva glavna dijela prema njihovu doprinosu: vanjsko i unutarnje.

$$\vec{M} = \vec{M}_u + \vec{M}_v = \vec{M}_g + \vec{M}_k + \vec{M}_v \quad (1)$$

Vanjsko polje  $M_v$  povezano s interakcijom Sunca i Zemlje, čini oko 10% ukupnog, vrlo je promjenljivo te uzrokuje električne struje u višim slojevima atmosfere. Unutarnje polje doprinosi s 90% totalnom polju te se dijeli na dva dijela, glavno polje  $M_g$ , čiji je uzrok u samoj unutrašnjosti planeta, i polje Zemljine kore  $M_k$ . Polje kore većim dijelom treba vezati uz električne struje u kori, dok je jedan maleni dio polja kore zastupljen zbog same strukture magnetskih stijena tj. sastava Zemlje. Struje koje nastaju unutar Zemljine kore povezane su s promjenama magnetskog polja izvan površine Zemlje, dok dio polja kojima je uzrok magnetična stijena nazivamo magnetska anomalija.

Porijeklo geomagnetskog polja još nije u potpunosti shvaćeno te zasad nijedna teorija ne objašnjava sve pojedinosti uzroka i postojanja. Općenito prihvaćena teorija samouzbudnog (samoodrživog) dinama govori kako je glavni dio polja generiran električnim strujama unutar tekuće vanjske jezgre planeta Zemlje načinjene većinom od željeza i nikla. Kombinacija rotacijskih gibanja i konvekcije u unutrašnjosti objašnjava nastanak struja, a studije magnetskih polja ostalih planeta Sunčeva sustava opravdavaju takvu teoriju. Zemlja je najbrži rotator u unutrašnjem dijelu Solarnog sustava. Zarotira oko svoje osi naspram zvijezda stajaćica svakih 23 sata i 56 minuta (u odnosu na Sunce rotaciju obavi za 24 sata).

Zemlja se sastoji od kore i plašta koji okružuju tekuću metalnu jezgru koja se, pak, zatvara oko unutrašnje krute jezgre. Unutrašnja se jezgra formira skrućivanjem vanjske jezgre, kako se Zemlja hlađi. Smatra se kako zbog toga unutarnja jezgra raste. Sada trenutačno zauzima 4 % volumena jezgre i vrlo je mala. Unatoč tome, energija oslobođena hlađenjem unutrašnje jezgre,

kako latentna toplina tako i gravitacijsko sjedinjavanje, dovoljna je, smatra se, za održavanje Zemljinoga magnetskog dinama. Dugoperiodičkim gravimetrijskim metodama izmjereno je kako unutrašnja jezgra ima prosječnu gustoću  $13 \text{ gcm}^{-3}$  dok se smatra kako je gustoća vanjske jezgre za  $0,5 \text{ gcm}^{-3}$  manja. Tako da tekuća jezgra, iako zauzima oko 16 % volumena cijelog planeta, sadrži 36% njegove mase.

Toplina oslobođena u unutrašnjosti planeta tijekom skrućivanja jezgre, bilo radioaktivnim raspadom ili općenitim hlađenjem Zemlje, prenosi se na površinu planeta kombinacijom konvektivnog gibanja i toplinske vodljivosti. Konvekcija zahtijeva gibanje materijala. U fluidu je rezultat toga uzdizanje česti tople tekućine te njen postupno hlađenje na putu do vrha. Nakon dolaska na vrh, čest ponovno tone nazad do prvobitnog izvora topline kako bi se opet ugrijala i ponovila proces. Tijekom rotacije fluida taj proces postaje komplikiraniji. Procjenjuje se kako je povratni utjecaj magnetskog polja na samo konvektivno gibanje i dinamički znakovit za gibanje te dodatno komplificira njegov opis. Proces razumijevanja suštinskog podrijetla Zemljinoga magnetskog polja je zbog složenosti toga sustava spor.

Primarno svojstvo geomagnetskog polja potječe iz aproksimacije dipolarnosti na Zemljinoj površini, tj. postojanja dvaju polova, sjevernog i južnog, koji ne koïncidiraju s polovima Zemljine rotacije, tzv. geografskim polovima. U prvoj se aproksimaciji Zemljino magnetsko polje može shvatiti kao polje zamišljenog štapnog magneta koji se nalazi u središtu Zemlje. Na osnovi te aproksimacije, model IGRF (eng. *International geomagnetic reference field*), koji je detaljnije objašnjen u daljem tekstu, definira dipolnu os koja probija Zemljinu površinu u dvije dijametalno suprotne točke. Te se točke nazivaju geomagnetski polovi, čija je os ekvivalentnog dipolnog štapnog magneta trenutačno nagnuta za  $10^\circ$  s obzirom na os rotacije Zemlje. Pojam geomagnetski je tako rezerviran za matematički dipolni model glavnog polja, dok se pojam magnetski u geoznanostima koristi obično za prezentaciju lokalnih uvjeta koji uključuju nedipolno polje i efekte geoloških uzroka i anomalija.

Mjesta na kojima je magnetska igla u vertikalnom položaju točke su koje predstavljaju magnetske polove. Jedan je od polova na sjevernoj hemisferi u blizini kanadskog Arktičkog arhipelaga te ga se naziva sjeverni magnetski pol, što je tehnički zapravo južni magnetski pol, jer magnetske silnice vertikalno poniru dolje. Drugi je pol pokraj obale Antarktika, južno od Australije, poznat pod nazivom južni magnetski pol, točka iz koje magnetske silnice izviru vertikalno gore, što ga čini sjevernim magnetskim polom, jer se prema njemu usmjerava južna strana magnetske igle.

Magnetski polovi kontinuirano se pomiču zbog fluktuacija Zemljinoga magnetskog polja. Najvjerojatniji je položaj pola za svaku godinu prosječna vrijednost, te u jednom danu, ako je

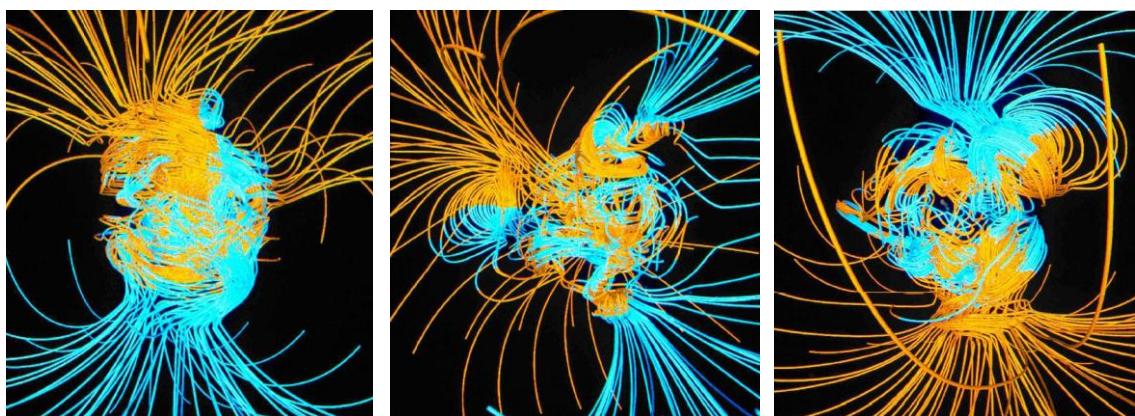
magnetsko polje poremećeno, položaj može biti pomaknut za više od 80 km. Iako je položaj pola za bilo koji dan iregularan, prosječna dnevna putanja tvori dobro definiranu ovalnu strukturu.

Tijekom ovog stoljeća ponašanje polja pokazuje tendenciju pomicanja geomagnetskog dipola prema zapadu otprilike  $0,2^\circ$  godišnje, ali ne smatra se očuvanost tog trenda koja bi bila vidljiva u geološkim sedimentima. Polje pokazuje svojstvo promjene polariteta u geološkim vremenskim skalama, s tri promjene polariteta unutar milijun godina u posljednjih 60 milijuna godina, kao i duga razdoblja, od otprilike 50 milijuna godina, s konstantnim polaritetom. Razvojem superračunala tek je u posljednjem desetljeću postalo moguće razviti numeričke modele te pomoći njih opisati dinamiku unutrašnjosti Zemlje, nastanak geomagnetskog polja te periodičke magnetske obrate. Numerički računalni modeli dinamo teorije odgovaraju na sve više donedavno neodgovorenih pitanja.

Sredinom 20. stoljeća skupilo se dovoljno dokaza o periodičkim promjenama polariteta magnetskog polja, poznatijim pod imenom magnetski obrati. Za trajanja normalnog polariteta, magnetske silnice izlaze u blizini južnog geografskog pola i ulaze u Zemlju kod sjevernog geografskog pola. Polaritet se zove normalnim, jer je trenutačni polaritet Zemljinoga magnetskog polja takav. Mnoge geološke formacije i vrste stijena u sebi sadrže dokaze o Zemljinom magnetskom polju iz doba kada su se te strukture formirale. Na takav način paleomagnetizam daje vrijednosti magnetskog polja kroz geološke epohe. Kada se pojedini mineral, npr. magnetit, kristalizira unutar tekuće lave ili magme, atomi unutar kristala odgovaraju na pobudu vanjskog magnetskog polja i tvore međusobno usmjerene magnetske domene prema sjevernom magnetskom polu. Laganim hlađenjem lave ili magme, ispod tzv. Curieve temperature, magnetizacija ostaje permanentno zarobljena unutar stijene. Magnetska svojstva stijena pružaju važne informacije o prošlosti magnetskog polja, te za proučavanje davnih vrijednosti polja i njihovih promjena daju ključne dokaze u korist kontinentalnog razdvajanja, pomaka polova, tektonike ploča i magnetskih obrata.

Glatzmaier i Roberts (1995.) razvili su trodimenzionalni vremensko ovisni računalni model te uspjeli simulirati magnetsko polje vrlo slično onome mjerrenom na površini Zemlje. Model predviđa bržu rotaciju krute unutarnje jezgre, koja svakih 150 godina učini jedan puni krug više od vanjske jezgre. Kako magnetske sile i silnice prodiru i u unutrašnjost jezgre, smatra se da njezina rotacija uvelike utječe na magnetske obrate. Bez dodatnog ubacivanja eksperimentalnih podataka Glatzmaier – Robertsov model je nakon 36000 simuliranih godina i sam producirao promjenu polariteta, kao što je prikazano na slici 1. Proces promjene polariteta je trajao 1000 godina, nakon čega je uslijedilo slično stanje kao i prije promjene, uz obrnut smjer magnetskih silnica. Na slici su

prikazane magnetske silnice prije obrata, tijekom njega i nakon obrata, gdje sekvenca modela traje 2000 godina. Sjeverni (Južni) geografski pol je na vrhu (dnu) svakog crteža.



Slika 1. Prikaz segmenata trodimenzionalnog Glatzmaier – Roberts modela geodinama. Silnice obojane u zlatnu (plavu) boju ovisno je li radikalna komponenta polja usmjerena ka planetu ili od nje. (Glatzmaier i Roberts, 1995.)

Intenzitet polja je u današnje doba od otprilike  $30 \mu\text{T}$  u blizini ekvatora do  $60 \mu\text{T}$  pokraj uočenih geomagnetskih polova. Većina polja (80 %) može biti matematički aproksimirana jednim mikrogeocentričnim dipolom, tj. geomagnetskim dipolom s magnetskim momentom od  $8,01 \times 10^{22} \text{ Am}^{-2}$ . Ostatak mikrodipolnog polja formira 12 glavnih područja, koja variraju do  $\pm 1,5 \mu\text{T}$ .

## 2. Mjerenja i prezentacija geomagnetskog polja

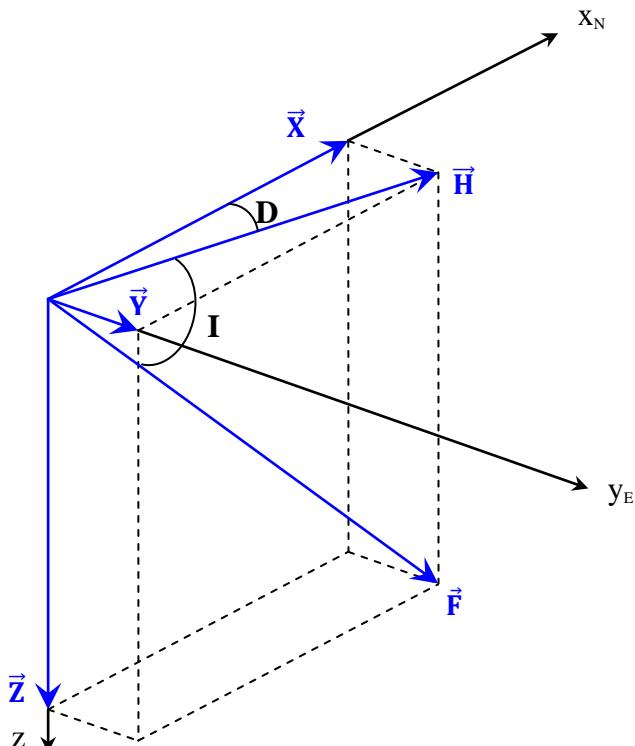
Zemljin je magnetizam poznat kao pojava puno prije nego što su to zabilježile povijesne knjige. Kineska mitologija opisuje borbu 2634. g. pr.n.e između cara Hoang-Ti i buntovnog princa Tchi-Yeoua, u kojoj je korišteno Zemljino magnetsko polje u navigacijske svrhe. Od 83. g. n. e. poznato je svojstvo minerala magnetita, tj. željezovog oksida  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , i uskih objekata (štapića) napravljenih od njega, da se nakon vrtanje na glatkim površinama uvijek zaustavljaju orijentirani u istom smjeru (Needham, 1962.). Najraniji pisani dokazi o upotrebi i objašnjenju ponašanja iglice na kompasu mogu se naći u enciklopedijama koje je napisao Shen Kua u Kini još u 11. stoljeću.

Nakon godina istraživanja, 1600. godine William Gilbert, koji kasnije postaje liječnik na dvoru kraljice Elizabete I., objavljuje svoju studiju o magnetizmu pod naslovom: "De Magnete". U njoj je iznesen prvi racionalni opis mističnog svojstva iglice na kompasu da se orijentira u smjeru sjever-jug i jedan od mnogobrojnih iznimnih zaključaka: "Zemlja sama po sebi mora biti magnetična". Gilbertov rad postaje prvi znanstveni udžbenik te je time geomagnetizam predmet najstarijeg znanstvenog istraživanja. Za razliku od navigacije i geodetskih mjerena, koja su bila proučavana iz praktičnih razloga, ili astronomije i alkemije, čije su metode u to doba bile daleko od znanstvenih, "De Magnete" uvodi sumnju u dotadašnja vjerovanja i eksperimentalno objašnjava fenomene magnetizma prateći rezultate do kojih se došlo. Ta knjiga započinje kasnije eru moderne

fizike i astronomije, te njome počinje stoljeće obilježeno velikim otkrićima Galilea, Keplera, Newtona i drugih.

Zemljino magnetsko polje možemo u bilo kojem trenutku opisati vektorskom veličinom, koja po definiciji ima iznos i smjer. Radi jednostavnijeg prikazivanja, totalni intenzitet vektora magnetskog polja  $\vec{F}$  prikazuje se preko geografskih koordinata. U tu svrhu definiraju se dvije referentne ravnine koje prolaze kroz točku u kojoj se određuje magnetsko polje Zemlje.

Prva je horizontalna ravnina, na slici 2. to je ravnina  $x$ - $y$ , gdje je  $x$ -os usmjerena prema geografskom sjeveru ( $x_N$ ) a  $y$ -os prema geografskom istoku ( $y_E$ ). Projekcija totalnog intenziteta  $\vec{F}$  na  $x$ - $y$  ravninu zove se horizontalni intenzitet  $\vec{H}$ , koji od smjera geografskog sjevera odstupa za kut deklinacije,  $D$ . Svojstvo iglice na kompasu da ne pokazuje prema pravom geografskom sjeveru primjetio je 1088. Shen Ku (Needham, 1962.). Deklinacija u Europi otkrivena je tek u 15. stoljeću te je dugo vremena pripisivana Christopheru Columbusu kao njegovo otkriće.



Slika 2. Geomagnetski elementi

- $\vec{F}$  – totalni intenzitet
- $\vec{H}$  – horizontalna komponenta
- $\vec{Z}$  – vertikalni intenzitet
- $\vec{X}$  – sjeverna komponenta
- $\vec{Y}$  – istočna komponenta
- $D$  – deklinacija
- $I$  – inklinacija

Druga je ravnina naspram koje se može odrediti položaj vektora  $\vec{F}$  ravnina geografskog meridijana, tj.  $x$ - $z$  ravnina. Na takav način deklinaciju možemo shvatiti kao kut što ga magnetski meridijan zatvara s geografskim meridijanom. Magnetska deklinacija  $D$  je istočna (+), odnosno zapadna (-), ako vektor  $\vec{F}$  leži istočno, odnosno zapadno od geografskog meridijana. Magnetskom inklinacijom  $I$ , zovemo kut što ga vektor  $\vec{F}$  zatvara s horizontalnom  $x$ - $y$  ravninom. Magnetska inklinacija je pozitivna ako je vektor  $\vec{F}$  usmjerjen ispod horizontalne ravnine, odnosno negativna ako je  $\vec{F}$  usmjerjen iznad. Magnetsku inklinaciju otkriva londonski proizvođač instrumenata Robert Norman, koji objavljuje svoje istraživanja u brošuri tiskanoj 1581. Danas je vrlo dobro poznato

kako deklinacija i inklinacija variraju u prostoru, a varijabilne su i u vremenu. Komponenta horizontalnog intenziteta u smjeru geografskog sjevera označava se s  $\vec{X}$ , dok komponenta usmjerena prema geografskom istoku nosi oznaku  $\vec{Y}$ . Totalni intenzitet  $\vec{F}$  magnetskog polja neovisan je o izboru koordinatnog sustava, te se može jednoznačno odrediti poznavajući tri od šest veličina prikazanih na slici 2. Najčešće se geomagnetski elementi prikazuju preko kombinacija triju ortogonalnih komponenata  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$  i  $\vec{Z}$ , ili preko totalnog intenziteta polja i dvaju kutova  $F$ ,  $D$  i  $I$ , te kao kombinacija  $H$ ,  $D$  i  $Z$ . Relacije koje povezuju sve komponente mogu se geometrijski odrediti iz slike 2.

$$F = \sqrt{X^2 + Y^2 + Z^2} = \sqrt{H^2 + Z^2} \quad (2)$$

$$X = H \cdot \cos D ; Y = H \cdot \sin D \quad (3)$$

$$Z = H \cdot \tan I \quad (4)$$

$$\tan D = \frac{Y}{X} \quad (5)$$

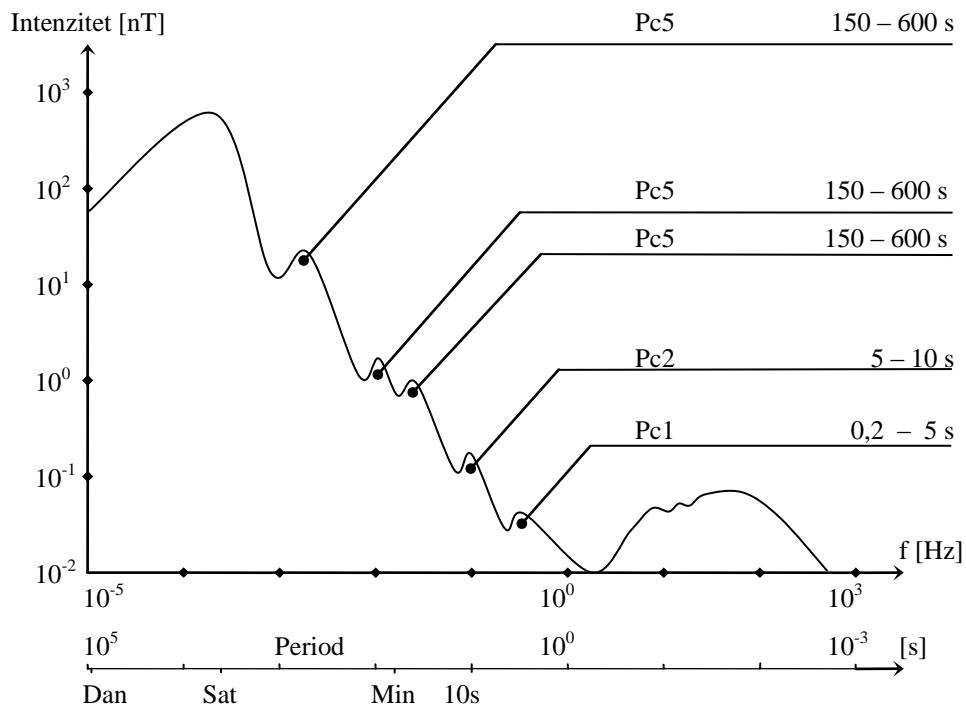
$$\tan I = \frac{Z}{\sqrt{X^2 + Y^2}} \quad (6)$$

$$H = F \cdot \cos I = \frac{X}{\cos D} = \frac{Y}{\sin D} = \frac{Z}{\tan I} \quad (7)$$

Međunarodno udruženje za geomagnetizam i aeronomiju (eng. *International association of geomagnetism and aeronomy – IAGA*) je u Kyotu (Japan) 1973. g. objedinilo dotadašnje različite sustave i različite mjerne jedinice te prihvatio međunarodni sustav mjernih jedinica (*SI*). Polje se opisuje magnetskom indukcijom  $B$  čija je *SI* jedinica 1 T (Tesla). Prema definiciji, magnetsku indukciju od 1 T ima homogeno magnetsko polje koje djeluje silom od 1 N na ravni vodič duljine 1 m, kad vodičem, okomitim na smjer polja, teče struja jakosti 1 A. Ekvivalent je u prethodno upotrebljavanom CGS-sustavu bio gauss (G) s time da 1 T odgovara  $10^4$  G. Zbog malih vrijednosti magnetskog polja Zemlje često se primjenjuje jedinica nanotesla ( $1 \text{ nT} = 10^{-9} \text{ T}$ ). Veličine  $\vec{F}$ ,  $\vec{H}$ ,  $\vec{X}$ ,  $\vec{Y}$  i  $\vec{Z}$  izražavaju se u nT dok se  $D$  i  $I$  izražavaju u stupnjevima i minutama kuta ili radijana. U jednadžbama i daljem tekstu, podebljana slova će se koristiti kako bi se naglasila vektorska svojstva, u suprotnom se samo govori o iznosu (modulu) određene vektorske veličine.

Tijekom povijesti na mnogo se različitim načina mjerilo magnetsko polje Zemlje. Već spomenuti kompas spada u najjednostavnije uređaje. Geomagnetsko je polje iznimno dinamično i podložno laganim stoljetnim promjenama kao i kratkoperiodičkim pulsacijama. Opravdano se geomagnetske varijacije mogu smatrati spektrom različitih amplituda ovisnih o frekvencijama (Slika 3.), ali magnetski podatci ne dolaze jednostavno zapakirani za trenutnu spektralnu analizu, nego se moraju strpljivo mjeriti kroz duga razdoblja.

Magnetometrijske metode spadaju u najstarije geofizičke metode, a instrumenti za mjerjenje Zemljinoga magnetskog polja mogu se kategorizirati na različite načine. Najčešće su korišteni za otkrivanje geoloških struktura s magmatskim stijenama u području primijenjene geofizike. Načelno razlikujemo magnetometre, uređaje kojima se obavljaju kvantitativna, absolutna mjerena, i variometre, kojima se mjere relativne varijacije polja oko određene referentne vrijednosti. Uređaji kojima se obavljaju relativna mjerena kontinuirano bilježe varijacije geomagnetskog polja. Takvi podatci zahtijevaju dodatnu obradu te njihovu usporedbu s podatcima dobivenih absolutnim instrumentima, kako bi se odredile referentne vrijednosti i izračunale prave vrijednosti geomagnetskih elemenata. Mjerena se mogu podijeliti u dva osnovna tipa, ovisno o njihovoj prirodi: skalarna i vektorska. Skalarnim instrumentima se mjeri polje bez informacija o smjeru, dok se vektorskima bilježi vrijednost polja u ovisnosti o smjeru. Magnetometre svrstavamo u pet kategorija ovisno o fizikalnim principima djelovanja senzora, a to su: torzija, zasićenost jezgre, indukcija, supravodljivost te nuklearna magnetska rezonanca.



Slika 3. Geomagnetski spektar amplituda-frekvencija  $10^{-5}$ - $10^3$  Hz

Općenito govoreći, mjerena u blizini površine Zemlje smatraju se površinskim mjeranjima. Ovisno o primjeni i interpretaciji podataka, kao i o osjetljivosti samog magnetometra, iz njih se mogu očitati geološke formacije, arheološke iskopine kao i lokacije strujnih vodiča. Površinska mjerena se rutinski izvode još od 16. st. ([Jackson i sur., 2000.](#)), ali se tek tijekom OGO misija (eng. *Orbiting geophysical observatories*) dobiva globalni pregled geomagnetskog polja iz svemira ([Constable i sur., 2004.](#)). OGO je niz od šest satelita lansiranih između 1964. i 1972. radi studije geomagnetskog polja. U ranim su se kampanjama koristili skalarni magnetometri, dok je [Backus \(1970.\)](#) pokazao kako su modeli polja izvedeni na osnovu mjerena s fiksiranih nadmorskih visina suštinski različiti, što dovodi do konstrukcije prvog vektorskog magnetometra postavljenog na

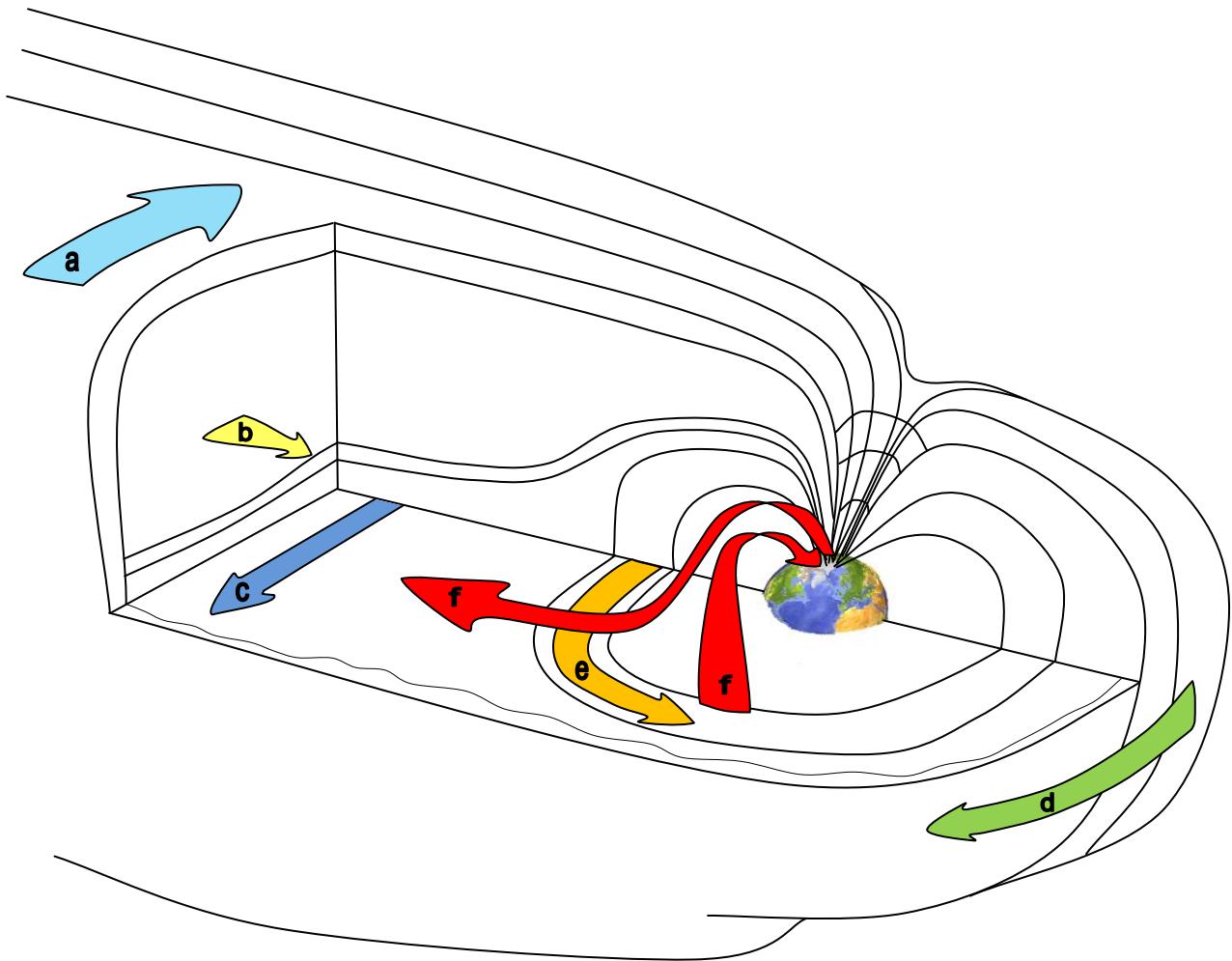
satelit Magsat. Taj satelit bio je aktivan od studenoga 1979. do svibnja 1980., nakon čega slijedi dvadesetogodišnja stanka u satelitskim mjerjenjima. Površinska se mjerena, s druge strane, obavljaju sustavno i kontinuirano preko trajno postavljenih opservatorija. Od 1987. su nastojanja umrežavanja opservatorija radi jednostavnije razmjene podataka stvorila međunarodnu mrežu Intermagnet koju sada čini 113 opservatorija iz 43 države svijeta. Godine 1999. lansiran je danski satelit Ørsted kojim se obnavlja interes za istraživanje geomagnetskog polja, te se nakon njega lansiraju još dva satelita, CHAMP i Ørsted-2/SAC-C, koja su i danas u operativnom pogonu. Osim opservatorija i satelitskih mjerena organiziraju se po potrebi i kampanje radi detaljnije izmjere i terena i posebnih efekata geomagnetskog polja. Primjeri takvih vremenski ograničenih kampanja, koje su relevantne i za potrebe ovog rada, guste su mreže magnetometara postavljene u Brazilu (Rigoti i sur., 1999.), Indiji (Arora i sur., 1993.) i zapadnoj Africi (Doumouya i sur., 1998.).

### 3. Magnetosfera i ionosfera

Vanjsko geomagnetsko polje Zemlje čini oko 10 % doprinosa ukupnom geomagnetskom polju. Porijeklo vanjskog polja rezultat je kompleksnih uvjeta stvorenih u Zemljinoj okolini tijekom interakcije Sunčevog vjetra, Sunčeve radijacije, Zemljinoga unutrašnjeg polja i Zemljine više atmosfere. Zbog ekstremno visokih temperatura unutar Sunčeve korone ( $\tau \sim 10^6$  K), regije neposredno iznad površine Sunca, elektroni i protoni vodika tvore plazmu. Zbog vrlo visokih brzina, takve čestice nadvladavaju Sunčevu gravitacijsko polje te kontinuirano bježe iz korone radijalno prema van. Neprekidni tok Sunčeve plazme u svemir, koji dostiže brzine i do  $400 \text{ kmh}^{-1}$ , zove se Sunčev vjetar. Sunčev vjetar se izvija oko prepreka na njegovu putu, kao što su planeti, kometi i drugi objekti u Sunčevu sustavu. Prvi su dokazi postojanja Sunčevog vjetra omogućeni kroz postojanje repa kometa, koji je uvjek okrenut od Sunca. Oblik magnetskog polja planeta, generiranog u njegovoj unutrašnjosti, zbog Sunčevog je vjetra deformiran. Njihovom je interakcijom planetarno magnetsko polje opkoljeno i komprimirano na strani prema Suncu, tj. na spojnici Sunce-planet, a izvučeno na strani suprotnoj od Sunca. To se područje, u kojem je planetarno magnetsko polje ograđeno, zove magnetosfera, te se slikovito može reći kako tvori oblik kapljice pri slobodnom padu u homogenom gravitacijskom polju (slika 4.). Njezin magnetski efekt u okruženjima blizu Zemlje može biti velik, mjereći pritom stotine nanotesla. Zemljino magnetsko polje djeluje tako kao štit od roja štetnih, visokoenergetskih nabijenih čestica koje tvore Sunčev vjetar.

Magnetopauza je tanki sloj i granica koja razdvaja plazmu Sunčevoga vjetra od Zemljine magnetosferske plazme. Sama površina magnetopauze ima prilično kompleksan oblik. Unutrašnjost magnetopauze, te gibanje plazme unutar magnetosfere, određeni su Zemljinim magnetskim poljem. U sklopu tih slojeva javljaju se struje magnetopauze, koje odvajaju magnetosferu unutar šupljine

Sunčevog vjetra. Magnetsko polje prouzročeno strujama na površini spomenute šupljine uočljivo je na površini Zemlje. To je posebno točno kada je magnetopauza komprimirana prema Zemlji, što uzrokuje povećanje mjerenog Zemljinoga magnetskog polja na površini. Ovaj efekt može prouzročiti i povećanje indeksa geomagnetske aktivnosti Dst na početku geomagnetske podolje, dok naknadno povećanje prstenaste struje vodi do značajnog smanjenja površinskog polja. Prstenasta struja nastaje unutar magnetosfere, a uzrokuju ju zarobljene nabijene čestice u regijama poznatima pod imenom Van Allenovi prstenovi. Spomenuti indeks Dst bit će detaljnije objašnjen kasnije.

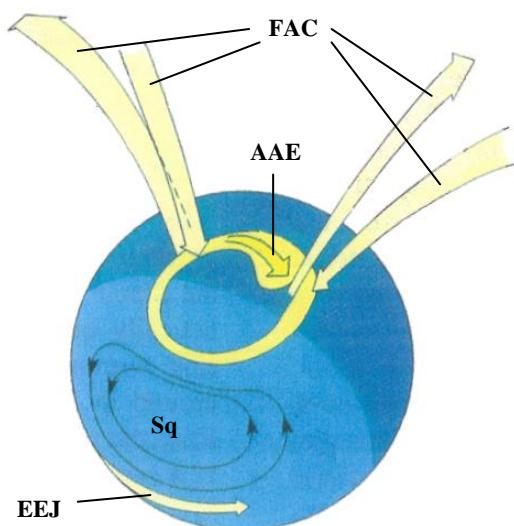


Slika 4. Topološki 3D presjek Zemljine magnetosfere. Prikazani su najvažniji strujni sustavi: a) Noćna struja magnetopauze (eng. *Nightside magnetopause current*), b) Struja graničnog plazmenog sloja (eng. *Plasma sheet boundary layer current*), c) Struja repa (eng. *Cross-tail current*), d) Dnevna struja magnetopauze (eng. *Dayside magnetopause current*), e) Prstenasta struja (eng. *Ring current*), f) Struja usporedna s poljem (eng. *Field-aligned current*). (Autor slike B. Markičević.)

Struja koja postoji unutar magnetopauze primarno je usmjerena ka zapadu u blizini ekvatora na strani okrenutoj prema Suncu. Nakon toga okreće ispod/iznad ekvatora te u smjeru istoka zatvara petlju. Sa Sunčeve strane, ta se struja zove dnevna struja magnetopauze (slika 4., (d)) dok je sa strane repa ta struja poznata pod imenom noćna struja magnetopauze (slika 4., (a)). Osim prstenaste struje i struje magnetopauze, postoji i struja repa, tj. treći strujni sustav koji teče od jutarnje do večernje strane kroz centralni plazmeni sloj repa (slika 4., (c)). Granični plazmeni sloj nerijetko je

najaktivnije plazmeno područje repa magnetosfere, te u sklopu njega također postoji struja (slika 4., (b)).

Ionosfera je regija koja se proteže od  $\sim 60$  km visine pa do gornjih granica atmosfere gdje se još nalaze nabijene čestice. Gustoća elektrona do  $\sim 1000$  km visine dovoljno je velika kako bi utjecala na širenje elektromagnetskih valova na radijskim frekvencijama. Na tim je visinama sadržaj atmosfere električki provodljiv, stoga te regije reflektiraju određene valne duljine radiovalova. Duge valne duljine, kao one upotrebljavane u AM modulaciji signala (eng. *Amplitude modulation*), reflektiraju se na nižim razinama, za razliku od kraćih valnih duljina koje često upotrebljavaju radioamateri. Vrlo kratke valne duljine, upotrebljavane za televizijski ili FM radio signal (eng. *Frequancy modulation*), uopće se ne reflektiraju. Refleksija određenih valnih duljina na visokim slojevima atmosfere znači da je prijam istih moguć na većim udaljenostima, zbog zakrivljenog oblika ionosfere, te se AM signal može poslati do udaljenijeg prijamnika. Ionosfera služi kao apsorber štetnog ultraljubičastog zračenja i visokoenergetskih čestica emitiranih sa Sunca. Dotok ultraljubičastih fotona sa Sunca zapravo producira ionosferu. Ionizirane čestice plazme pod utjecajem su Zemljiniog magnetskog polja te atmosferskih cirkulacija prouzročenih zagrijavanjem od Sunca, Zemljinom rotacijom i plimnim efektima, uslijed čega nastaju različiti cirkulacijski oblici. Godine 1882. Stewart je objasnio da tok tih nabijenih čestica stvara električne struje te, posljedično, magnetsko polje unutar ionosfere.



Slika 5. Dominantni strujni sustavi Zemljine ionosfere. FAC – struje usporedne s poljem (eng. *Field aligned currents*); AAE – auroralni elektromlaz (eng. *Auroral electrojet*); EEJ – ekvatorijalni elektromlaz; Sq – solarno mirne vremenske varijacije (prema Lanzetti i sur., (1993.)).

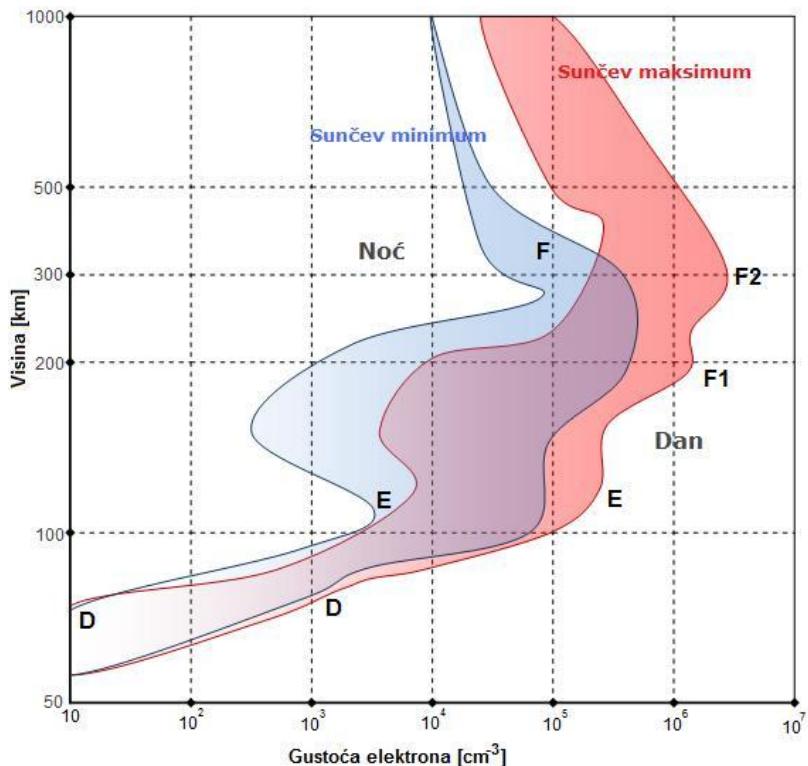
Tijekom normalne Sunčeve aktivnosti, mogu se izdvojiti dva magnetska efekta u ekvatorijalnim područjima i regijama srednjih širina. Jedan se zove solarno mirno, *Sq* (eng. *Solar quiet*), a drugi ekvatorijalni elektromlaz, *EEJ* (eng. *Equatorial electrojet*). Oba su efekta najjača u vrijeme lokalnog podneva (slika 5.). Centar *Sq* struje se nalazi u blizini  $30^\circ$  magnetske dip latitude na obje hemisfere i struji anticiklonalno (ciklonalno) na sjevernoj (južnoj) hemisferi. Njezini magnetski efekti dosežu vrijednosti i do 40 nT u blizini Zemljine površine. S druge strane, u uskom

pojasu geografskih širina uzduž magnetskog dip ekvatora, koji će biti objašnjen kasnije, ekvatorijalni elektromlaz teče prema istoku, tijekom dana, te je ograničen u visinama na otprilike 105 km iznad Zemlje. Njegovi efekti na Zemljinoj površini dosežu vrijednosti do 100 nT. Ekvatorijalni elektromlaz je intenzivna električna struja koja uvelike pojačava površinske komponente magnetskog polja mjerene oko dip ekvatora, te se čini kako je stabilnija od drugih ionosferskih strujnih sustava.

Prateći magnetske silnice, nabijene čestice u Sunčevom vjetru ubrzavaju se uz pomoć magnetskog polja Zemlje, dosežući brzine veće od  $1000 \text{ kms}^{-1}$  za vrijeme Sunčevih oluja. Njihovo slijevanje u Zemljin polarni dio ionosfere obilježeno je šarenom svjetlucavom svjetlošću zvanom polarna svjetlost, što je najspektakularniji dio geomagnetskog fenomena. Na sjevernoj hemisferi naziva se Aurora Borealis dok je isti efekt na južnoj hemisferi poznat pod imenom Aurora Australis. Kada nabijene čestice Sunčevog vjetra dopru u atmosferu, sudaraju se s atomima i molekulama raznih plinova pri čemu se atmosfera zagrijava, a atomi unutar nje ioniziraju (pobuđuju). U nekom trenutku atomi se ohlade, deioniziraju tj. dobiju neke elektrone natrag, i tijekom tog procesa emitiraju fotone vidljive svjetlosti, u procesu koji je gotovo posve suprotan onome koji prouzročuje ionizaciju u ekvatorijalnom pojusu.

Ovisno o njihovoj energiji, nabijene čestice prodiru do različitih slojeva atmosfere, ionizirajući različite plinove tijekom tog procesa, te tako proizvode različite boje polarne svjetlosti. Unatoč aurori, u polarnim dijelovima se događaju kompleksne interakcije između magnetosfere i ionosfere. Bujice nabijenih čestica proizvode struje usporedne s poljem (eng. *Field aligned currents* – FAC, slika 5.), ili Birkeland struje, koje pri kontaktu s ionosferom i atmosferskom polarnom cirkulacijom uzrokuju intenzivne struje zvane auroralni elektromlaz (eng. *Auroral electrojet* – AAE, slika 5.). AAE može proizvesti magnetske efekte na površini Zemlje čak i do 1000 nT. Ionosfera apsorbira najveći dio štetnog ultraljubičastog zračenja i visokoenergetskih čestica, na visinama od 100 do 300 km, gdje je najintenzivnija visoka koncentracija iona i slobodnih elektrona. Jedan dio štetnog zračenja ipak prođe ionosferu, ali ozon u stratosferi na visinama od 10 do 50 km uspješno taj dio zračenja zaustavlja. Ionosfera se proteže od gornjih granica atmosfere i prelazi duboko u međuplanetarni prostor, čiji je početak na temelju satelitskih mjerena određen na  $118 \pm 3 \text{ km}$  ([Sangalli i sur., 2009.](#)).

Radi lakšeg razmatranja, ionosfera je podijeljena u četiri jednostavnije regije, koje su prikazane na slici 6., ovisno o raspodjelama gustoće elektrona. Na slici su crvenom bojom prikazane minimalne i maksimalne vrijednosti gustoće elektrona, ovisno o dobu dana tijekom maksimalne Sunčeve aktivnosti.



Slika 6: Ovisnost gustoće elektrona o visini. Plavom je bojom prikazan raspon podataka tijekom minimalne Sunčeve aktivnosti, a desni tj. lijevi dio grafa predstavlja dnevne odnosno noćne vrijednosti, istim redoslijedom.

- D regija je najniža i nalazi se između 70 i 90 km iznad Zemljine površine. Razlikuje se od ostalih (E i F regija) po tome što slobodni elektroni u potpunosti nestaju tijekom noći, jer se rekombiniraju s kisikovim ionima tvoreći molekule kisika. Na svojim gornjim granicama spaja se s E regijom.
- E regija se proteže od 90 pa sve do 150 km iznad Zemlje, što označava visinu regularne dnevne E regije. Poznata je također pod nazivom Kennelly-Heaviside sloj. Za razliku od D regije, ionizacija je tijekom noći u E regiji održana, iako je značajno smanjena. Gustoća ionizacije je obično  $10^5 \text{ ecm}^{-3}$  tijekom dana, iako su ponekad uočljivi isprekidani komadići jače ionizacije. Horizontalne ionosferske struje, kao polarni elektromlaz, ekvatorijalni elektromlaz i  $Sq$  (solarno mirni) strujni sustav pretežito su zatočene unutar E regije. Tijekom noći, kada je vodljivost E regije niska, struje u višoj F regiji mogu imati značajnu ulogu. Ovo je posebice istinito za dijelove tropskog ionosfere. U blizini ekvatora silnice magnetskog polja imaju duge dijelove unutar F regije.
- F regija je najviša te počinje na visinama od otprilike 150 km i doseže maksimalnu visinu oko 600 km. Ekstremno ultraljubičasto zračenje apsorbira se u njoj. U ovom je pojasu najveća koncentracija slobodnih elektrona. Iako se stupanj ionizacije previše ne mijenja tijekom noći, postoji promjena u distribuciji iona. Tijekom dana mogu se izdvojiti dva sloja unutar F regije: plitki sloj poznat kao F1 te iznad njega visoko ioniziran dominantni sloj F2. Područje F od primarne je važnosti za radiokomunikaciju, jer ona reflektira radiovalove s

frekvencijama do otprilike 32 MHz, ovisno o vršnim vrijednostima koncentracije elektrona, koja je obično,  $\sim 10^6 \text{ ecm}^{-3}$  i s velikim varijacijama u ovisnosti o ciklusu sunčevih pjega.

- Gornji sloj ionosfere je dio koji počinje na visinama maksimalne gustoće F2 regije. Proteže se prema Svemiru s padajućom gustoćom prema prijelaznim visinama gdje  $\text{O}^+$  ioni postaju manje brojni od  $\text{H}^+$  i  $\text{He}^+$ . Prijelazne visine variraju s nerijetkim padovima ispod 500 km tijekom noći ili 800 km tijekom dana, iako mogu ići sve do 1100 km.

## 4. Geomagnetska aktivnost

U doba kada su počela redovita mjerena komponenata magnetskog polja mogli su se primijetiti karakteristični uzorci dnevnog hoda unutar varijacija polja. Superponirana s regularnim varijacijama pokazuju se perturbacije malih i velikih skala. Dani kada su kratkotrajne dnevne varijacije glatke, mogu se kategorizirati kao magnetski „mirni“, dok se oni obilježeni fluktuirajućim poljem kategoriziraju kao magnetski „poremećeni“ dani. Harmonijska je analiza podataka tijekom mirnih varijacija polja pokazala kako je njihov uzrok vanjskog podrijetla. Takve promjene, kao što je prvo pretpostavio **Stewart (1882.)**, rezultat su električnih struja na ionosferskim visinama sa sunčane strane hemisfere, većinom iz E regije, kao rezultat dinamo strujanja vodljivog zraka kroz Zemljino magnetsko polje. U blizini dip ekvatora, ove su ionosferske struje sadržajno pojačane i prouzročuju stvaranje EEJ. One se javljaju uslijed pojačane istočne komponente vodljivosti koja je horizontalna i normalna na Zemljino električno polje. Planet Zemlja u prvoj aproksimaciji ima svojstva velikog sferičnog kondenzatora, gdje je jedna ploha kondenzatora ionosfera, dok je druga sama površina Zemlje. Kako je ionosfera pozitivno nabijena, zbog oslobađanja elektrona iz njezinih atoma tijekom interakcije sa Sunčevim vjetrom, a površina Zemlje negativno, javlja se razlika potencijala te su silnice Zemljinoga električnog polja usmjerene radijalno prema središtu Zemlje.

Informacije vezane uz stanje geomagnetskog polja, posebno njegova vanjskog dijela koji je sklon čestim i naglim promjenama, vrlo su važne radi korekcije magnetskih izvješća, dobivenih površinskim, avionskim ili satelitskim mjeranjima. Važno je prepoznati opasnosti naglih promjena polja, radi preventivnog djelovanja na prijenos električne energije preko električnih vodova, distribucije plina kroz cjevovode na visokim nadmorskim visinama, radi korištenja pouzdane navigacije u avionskom prometu i sl. Generiranje jakih induciranih struja uzrokovanih magnetskim poljem može uvelike utjecati na ljudsko djelovanje. Kako je mjereno polje iznimno ovisno o latitudi i longitudi, i manifestacija različitih strujnih sustava na različitim je lokacijama drugačija, pa je nemoguće imati jedinstvenu mjeru koja bi obuhvaćala sve. Obično se kreiraju indeksi koji karakteriziraju jednu specifičnu varijablu. **Mayaud (1980.)** je primijetio: „Indeksu je cilj dati sveobuhvatnu kontinuiranu informaciju u vezi više-manje kompleksnog fenomena koji je varijabilan u vremenu.“

### 4.1. K indeks

Kako bi se okarakterizirala iregularna geomagnetska aktivnost porijeklom od strujanja plazme sa Sunca, **Bartels i sur., (1939.)** uvode *K* indeks, te navode: „Svrha *K* indeksa je omogućiti homogeno snimanje zemaljskih efekata solarne čestične radijacije mjereći intenzitet geomagnetske aktivnosti uzrokovane električnim strujama stvorenim u okolini Zemlje tom radijacijom“. Radi razlikovanja regularnih i iregularnih geomagnetskih varijacija, Bartels i suradnici predlažu

promatranje kraćih vremenskih intervala unutar jednog dana, a zbog potrebe za izdvajanjem iregularne geomagnetske aktivnosti koja je većinom posljedica čestične radijacije sa Sunca i koja je kratkog trajanja.

Lokalne se razine poremećaja određuju mjerjenjem razlike između najnižih i najviših vrijednosti, za trosatne vremenske intervale najporemećenije horizontalne komponente magnetskog polja. Najprije se subjektivno uklanja varijacija mirnog dana s magnetograma. Raspon se nakon toga prebacuje u lokalni  $K$  indeks, koji je uveden 1938. Konverzijska tablica maksimalnih fluktuacija (u nT) u  $K$  indeks varira od opservatorija do opservatorija i to tako da je povjesno pojavljivanje određenih vrijednosti  $K$  indeksa približno jednako na svim opservatorijima, te poprima vrijednosti od 0 do 9 u kvazi-logaritamskoj skali. Amplitudni je raspon vertikalna udaljenost između dviju glatkih krivulja, od kojih jedna dodiruje magnetogram s gornje strane, dok druga s donje strane unutar trosatnog intervala.

U praksi to znači da postaje na višim geomagnetskim širinama za određeni  $K$  indeks imaju veće razine fluktuacija, što te konverzije čini specifičnima za pojedine postaje, te su ih **Bartels i sur., (1939.)** generirali statističkim metodama. Tijekom izračuna amplitudnog raspona, regularne dnevne varijacije, prouzročene solarno-mirnim ( $Sq$ ) i lunarnim ( $L$ ) strujama, kao i postpertubacijski efekti trebaju biti eliminirani. Uzorci dnevnih varijacija  $K$  indeksa zbog  $Sq$  i  $L$  ovise o sezoni, solarnom ciklusu te Mjesečevim fazama. Za magnetogram na postaji Boulder (Colorado, SAD) konverzijska tablica je prikazana u tablici 1. Na takav način se normaliziraju frekvencije pojavljivanja različitih razina poremećaja, ali  $K$  ostaje lokalni indeks koji opisuje poremećaje u blizini svakog pojedinog opservatorija. Definiciju  $K$  varijacija daje **Siebert (1971.)**:

- $K$  varijacije su svi nepravilni poremećaji geomagnetskog polja uzrokovani Sunčevim čestičnim zračenjem unutar određenih trosatnih perioda. Svi drugi pravilni i nepravilni poremećaji nisu  $K$  varijacije. Pojavljivanje  $K$  varijacija ukazuje na geomagnetsku aktivnost.

Svaki od opservatorija ima godišnji ciklus dnevnih varijacija, ovisno o njegovim geografskim i geomagnetskim koordinatama. Lakšom dostupnošću  $K$  indeksa s više postaja može se izračunati tzv. planetarni indeks  $Kp$  geomagnetske aktivnosti (njem. *Planetarische kennziffer – Kp*). Korištenjem  $Kp$  indeksa najlakše se može odrediti ako postoje poremećaji Zemljinoga magnetskog polja te koliko su intenzivni ti poremećaji bili. Geomagnetski poremećaji mogu se promatrati preko opservatorija postavljenih na površinu Zemlje koji mjere tri komponente magnetskog polja. Globalni  $Kp$  indeks dobiva se na osnovi usrednjavanja razine poremećaja dviju horizontalnih komponenata, zabilježene na 13 odabralih postaja između  $44^\circ$  i  $60^\circ$  sjeverne ili južne geografske širine, koji spadaju u tzv. subauroralni pojas.

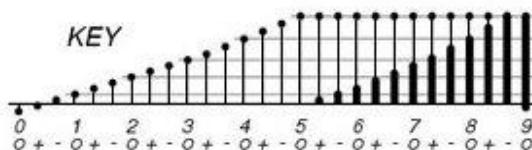
Tablica 1. Konverzijska tablica za opservatorij Boulder, Colorado, SAD (Lat:  $40,14^{\circ}$ ; Long:  $254,76^{\circ}$ ; n.v. 1682 m), koja se koristi za preračunavanje razina fluktuacija u K indeks.

K	Razina fluktuacije (nT)
0	0 – 5
1	5 – 10
2	10 – 20
3	20 – 40
4	40 – 70
5	70 – 120
6	120 – 200
7	200 – 330
8	330 – 500
9	> 500

Samo usrednjavanje logaritma aktivnosti ne može se smatrati dovoljnim ako postaje nisu gusto i ravnomjerno raspoređene po Zemlji. Dodatni postupak standardizacije razvio je **Bartels (1949.)** uvođenjem Ks indeksa, radi eliminacije spomenutih efekata godišnjih ciklusa dnevnih varijacija. Primjenjujući konverzijske tablice može se odrediti standardizirani Ks indeks za svaku od 13 odabralih postaja. Indeks Ks izražen je u trećinama vrijednosti te ih sveukupno ima 28, na takav način da se *K* redefinira u smislu da su mu dane trećinske vrijednosti.

Glavna je svrha standardiziranog Ks indeksa određivanje globalnog geomagnetskog indeksa, koji je prosječna vrijednost izvornih 11 *Kp* postaja. Za dvije postaje Brorfelde i Lovö, kao i za Eyrewell i Canberra, Ks vrijednosti kombiniraju se tako da prosječna vrijednost uđe u konačnu, ali istodobno djelitelj ostaje isti, tj. 11. Ako se Ks shvati kao kontinuirana varijabla koja poprima vrijednosti između 0,0 i 9,0, onda se npr. interval 1,5 – 2,5 dijeli ravnomjerno na trećine s oznakama  $2_{-}$ ,  $2_0$  i  $2_{+}$ . Rubni simboli  $0_0$  i  $9_0$  sadrže tada samo jednu šestinu cijelog intervala.

Kvantitativne vrijednosti *Kp* indeksa mogu se zorno prikazati preko glazbenog dijagrama koji omogućuje brzu orijentaciju o geomagnetskoj aktivnosti pomoću sredstava duljine i širine simbola.



Slika 7. Prikaz trosatnih *Kp* indeksa preko glazbenog dijagrama (**Bartels, 1949.**). Notne glave su krugovi promjera 2mm te su simboli međusobno udaljeni 2 mm.

Za kvantitativnu mjeru magnetskih aktivnosti uslijed pojačanih ionosferskih struja unutar auroralnog područja uveden je indeks auroralnog elektromlaza (eng. *Auroral electrojet index*) AE. Od uvođenja, indeks AE uspješno je upotrebljavan kako kvalitativno, tako i kvantitativno za studije morfologija podolja, ponašanja komunikacijskih satelita, rasprostiranja radio valova te međudjelovanja međuplanetarnih magnetskih polja sa Zemljom magnetosferom.

## 4.2. Dst indeks

Indeks Dst posebno je dizajniran kako bi mjerio intenzitet prstenaste struje tijekom magnetske oluje. Računa se na osnovi satnih srednjaka, za razliku od SYM-H indeksa (eng. *Symmetric disturbance field in H*) koji se temelji na osnovi jednominutnih srednjaka. SYM-H indeks računa iste intenzitete s većom razlučivošću podataka. **Wanliss i sur., (2006.)** pokazali su kako rezultati pomoću oba spomenuta indeksa pokazuju vrlo dobru usporedivost, s ne više od 20 nT devijacije u razdoblju od 20 godina promatranja, te za vrijeme intenzivnih geomagnetskih oluja. Satne vrijednosti Dst indeksa izvedene su iz podataka s opservatorija u blizini ekvatora, ali ne i na samom ekuatoru kako bi ekvatorijalni elektromlaz, podrijetlom iz E-regije dominirao magnetskim perturbacijama zabilježenima na površinskim opservatorijima (Slika 8.). Prva egzaktna definicija satnog Dst indeksa dana je 1964. te Dst vrijedi za poremećaje u doba oluje (eng. *Storm-time disturbance*).

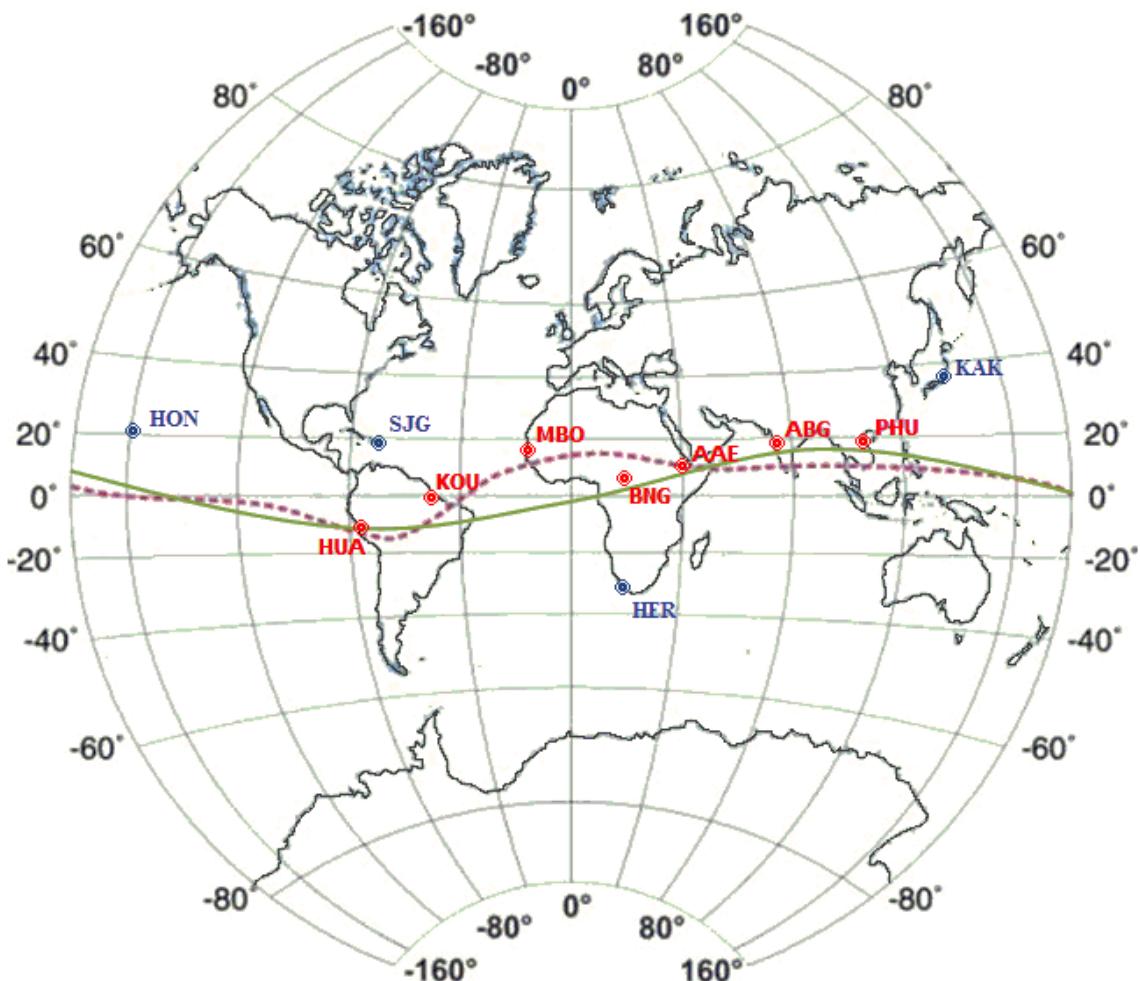
Definicija magnetskih oluja datira s početka 20. stoljeća, kada je primijećen jedinstven oblik promjene  $H$  komponente polja na osnovi usrednjениh oluja opaženih na opservatorijima niskih geografskih širina. Općenito prihvaćen model izvora olujnog polja kao magnetosferske prstenaste struje dokazan je prije otprilike 40 godina u vrijeme početka satelitskih mjerjenja. Tada su otkriveni i Van Allenovi pojasevi čestica koji okružuju Zemlju.

Globalni indeks geomagnetskih poremećaja Dst, formuliran je u doba otkrića prstenaste struje i još uvijek predstavlja definitivnu reprezentaciju geomagnetskih oluja. Dst nije samo indeks povezan isključivo s prstenastom strujom (**Campbell, 1996. a, b**). Danas je poznato kako je Dst indeks pod utjecajem simetrične prstenaste struje, djelomične (asimetrične) prstenaste struje, struje u blizini repa (eng. *Near tail current*), dnevnih struja u magnetopauzi te struja usporednih s poljem (FAC) koje povezuju magnetosferu s visokim ionosferskim strujama i strujama magnetopauze.

Analize magnetskih oluja jasno su pokazale kako je prosječni poremećaj  $D$ , kompozicija globalnog Dst poremećaja i poremećaja dnevnih varijacija povezanih s lokalnim uvjetima  $DS$ :

$$D = \text{Dst} + DS \quad (8)$$

Za jednoliku longitudinalnu razdiobu postaja, lociranih na približno jednakim udaljenostima od dipolnog ekvatora, srednja vrijednost  $D$ , u bilo kojem trenutku univerzalnog (UTC) vremena neće biti promijenjena zbog utjecaja komponente lokalnih uvjeta  $DS$ . Definicije Dst i  $DS$  su ravnopravno primjenjive za sva tri magnetska elementa, no kako je magnetsko polje zbog simetrične zonalne struje u ekvatorijalnoj ravnini, paralelno s dipolnom osi, većinom se računaju iz  $H$  komponenti.



Slika 8. Karta s geomagnetskim postajama INTERMAGNET mreže. Na osnovi postaja označenih plavom bojom se računa Dst indeks, dok crvena boja predstavlja postaje ekvatorijalnog pojasa. Crvene ispunjene oznake predstavljaju kontinentalne postaje s čijim je podacima radena analiza. **AAE** – Adis Abeba, Etiopija; **ABG** – Alibag, Indija; **BNG** – Bangui, Srednjoafrička Republika; **HER** – Hermanus, Južnoafrička Republika; **HON** – Honolulu, Sjedinjene Američke Države; **HUA** – Huancayo, Peru; **KAK** – Kakioka, Japan; **KOU** – Kourou, Francuska Gvajana; **MBO** – Mbour, Senegal; **SJG** – San Juan, Puerto Rico; **PHU** - Phu Thuy, Vijetnam

Dst nije indeks „raspona“, kao što je to slučaj sa  $K_p$  ili  $AE$  indeksom. Osim regularne dnevne varijacije, potrebno je eliminirati i kritično očuvavanu odgovarajuću referentnu razinu. Ako bi podaci bili homogeni u vremenu, određeni napor mora biti učinjen radi eliminacije stogodišnje varijacije  $H$  vrijednosti na svakoj postaji. U tablici 2. su prikazane koordinate postaja niskih latituda iz kojih se podaci horizontalnog intenziteta koriste za izračun Dst indeksa, dok je njihov položaj prikazan na slici 8.

Bazna linija za  $H$  definira se za svaki opservatorij posebno tako da sekularna varijacija utječe na konačnu vrijednost. Za svaku postaju dugoročne se sekularne varijacije eliminiraju pomoću odgovarajućeg polinoma ubačenog u godišnje izvedene vrijednosti mirnih dana. Varijacije solarno mirnih dana,  $Sq$ , računaju se za svaku postaju posebno, tako da se prosječna  $Sq$  varijacija svakog pojedinog mjeseca određuje iz vrijednosti  $H$  međunarodno odabranih pet najmirnijih dana u mjesecu. Najmirniji dani se određuju po UTC vremenu.

Tablica 2. Koordinate geomagnetskih opservatorija unutar Dst mreže

Postaja	IAGA kod	Geografski		Geomagnetski	
		Lat. [°]	Long. [°]	Lat. [°]	Long. [°]
Honolulu	HON	21,32	-158,00	21,36	267,97
San Juan	SJG	18,12	-66,15	29,41	4,65
Hermanus	HER	-34,42	19,23	-33,59	81,99
Kakioka	KAK	36,23	140,18	26,31	207,25

Da bi se definirala prosječna vrijednost  $Sq$  varijacije lokalnog vremena za svaku postaju, potrebno je usrednjiti lokalne sate koristeći pet lokalnih dana koji imaju maksimalno preklapanje s međunarodnih pet najmirnijih dana. Srednjak mjesecnih satnih vrijednosti mirnih dana u godini zamjenjuje se dvostrukim Fourierovim redom,

$$S_q(T, M) = \sum_{n=1}^6 \sum_{m=1}^6 A_n^m \cos(mT + \alpha_m) \cdot \cos(nM + \beta_n) \quad (9)$$

gdje je  $T$  lokalno vrijeme, a  $M$  mjesec. Izraz obuhvaća 48 nepoznatih koeficijenta  $A_n^m$ ,  $\alpha_m$  i  $\beta_n$ , koji se mogu odrediti iz  $12 \times 24$  eksperimentalnih podataka primjenom metode najmanje sume kvadrata odstupanja. Ovakva reprezentacija omogućuje računanje  $Sq(T)$  u bilo kojem UTC satu  $T$ , tijekom godine, te se ovaj postupak primjenjuje za svaki opservatorij posebno.

Slično kao i glazbeni dijagram, crtanje satnih Dst vrijednosti daje mogućnost jednostavne identifikacije faza magnetskih poremećaja te geomagnetski mirne intervale. Dst indeks reprezentira osno simetrične poremećaje magnetskog polja kod dipolnog ekvatora na Zemljinoj površini. Glavni su poremećaji kod Dst-a negativni, pogotovo smanjenja u geomagnetskom polju, koja su većinski proizvod ekvatorijalne magnetosferske struje, poznatije pod imenom prstenasta struja. Iako je Dst primarno indeks ekvatorijalne prstenaste struje, pozitivne vrijednosti  $Dst_+$  koje se mogu naći u podacima, vjerojatno su uzrok magnetosferskog kompresijskog efekta ili neodgovarajuće eliminacije varijacija mirnih dana indirektnim metodama.

Povećanje  $Dst_+$  nastupa za vrijeme početka aktivnog perioda, dok Sunčev vjetar stiše magnetsku šupljinu.  $Dst_+$  prepostavlja pozitivne vrijednosti, ali obično malene. Suprotno od toga, negativne vrijednosti Dst. indeksa traju nekoliko dana i označavaju oporavak magnetosfere tijekom neporemećenih uvjeta. Efekti djelomične prstenaste struje, iako su zadovoljavajuće minimizirani tijekom izvoda, nisu u potpunosti eliminirani zbog malog broja postaja unutar mreže, što povlači za sobom snižavanje Dst vrijednosti kada je ona velikih iznosa. Također, postoji dominacija postaja sa sjeverne hemisfere u postojećoj Dst mreži, koja unosi godišnju varijaciju indeksa. Idealna mreža postaja, na osnovi koje bi se izvodio Dst indeks, zahtjevala bi ravnomjernu raspodjelu postaja na obje hemisfere.

### 4.3. Ostali geomagnetski indeksi

$K_p$  skala od 28 podioka je kvazilogaritamska u polju amplituda. Prikladno se prebacivanje natrag u usporedive jačine polja za ekvivalentne amplitude srednjih širina u nanoteslama čini preko tablica i zove se  $ap$  indeks. Indeks dnevne aktivnosti, zvan ekvivalentna dnevna amplituda,  $Ap$  (eng. *Equivalent daily amplitude*), aritmetička je sredina osam dnevnih  $ap$  vrijednosti. Mjesečne, sezonske i godišnje  $Ap$  vrijednosti mogu se izračunati iz izračunatih  $ap$  srednjaka, jer su takvi indeksi linearne mjera. Korelacije između  $ap$  indeksa i lokalnog polja magnetskih oluja u principu su loše, većinom zato što se  $ap$  i  $K_p$  računaju iz poremećaja unutar satnog intervala, time zanemarujući promjene polja dužih perioda. Za poremećaje unutar posljednja 24 h u blizini opservatorija promatra se  $A$  indeks, koji je dobiven usrednjavanjem osam  $K$  indeksa i njihovom konverzijom uz pomoć tablice. Raspon indeksa  $A$  je od 0 do 400, s time da je iznimno rijetko da njegove vrijednosti porastu iznad 75 ili 100. Često su vrijednosti između 4 i 50, dok su vrijednosti ispod 10 poželjne radi visokofrekventne komunikacije. Veće vrijednosti indeksa  $A$  mogu značiti neumjerenu apsorpciju visokofrekventnih radiovalova zbog povećane olujne aktivnosti u ionosferi.

Na osnovi objavljene literature i odgovora na upitnike, znanstvenici koji se bave proučavanjem geomagnetskog polja, ionosfere i magnetosfere identificirali su nekoliko različitih metoda za izbor mirnih uvjeta baziranih na geomagnetskim mjeranjima kao i na proučavanju drugih parametara. Upozorenja na primjenu geomagnetskih indeksa radi odabira perioda mirnih uvjeta uključuju sljedeće (Joselyn, 1989.):

- Geomagnetski poremećaji su iznimno lokalnog karaktera. Čak i kada podaci sa svih opservatorija ukazuju na mirno ponašanje, postoji velika mogućnost da drugi lokaliteti, koji nisu uzeti u razmatranje budu poremećeni.
- Geomagnetski indeksi su pogodni, ali nesavršeni indikatori geomagnetske aktivnosti. Indeksi bazirani na nivoima mirnih dana imaju nepouzdanosti usporedive s graničnim vrijednostima mirnih uvjeta. Indeksi koji predstavljaju prosječnu vrijednost uvjeta za vrijeme 24-satnog UTC dana moguće nisu adekvatni.
- Geomagnetska aktivnost u potpunosti ne reflektira raspon mogućih faktora koji utječu na ionosferu ili magnetosferu.

## 5. Ekvatorijalni elektromlaz

Područje ekvatora je jedinstveno u geomagnetskim studijama, jer su u njemu silnice magnetskog polja gotovo paralelne s površinom Zemlje, dok je Zemljina atmosfera najviše izložena Sunčevu zračenju. Podsjetimo da je geomagnetski dip ekvator linija duž koje je vertikalna komponenta geomagnetskog polja nula, često ga zovu samo geomagnetskim ekvatorom. Linija duž koje vertikalna komponenta magnetskog polja ekvivalentnog dipola ne postoji zove se dipolni ekvator. Na takav način je ekvatorijalna zona definirana kao područje u kojem se nalaze geografski, dip i dipolni ekvator.  $Sq$  struja na postaji funkcija je udaljenosti te postaje od ekvatora. Međutim, relativni odnosi geografskog, dipolnog i dip ekvatora razlikuju se duž longitude, tako da  $Sq$  struje pokazuju različita svojstva na postajama usporedivih longitudea. Ekvatorijalni elektromlaz je jedinstveno svojstvo ionosfere. To je usko područje jake električne struje, često opisivane kao „intenzivna trakasta električna struja“ koja teče duž magnetskog ekvatora na osunčanoj strani planeta u ionosferskom E sloju (slika 6.), koji se nalazi na visinama od 90 do 130 km.

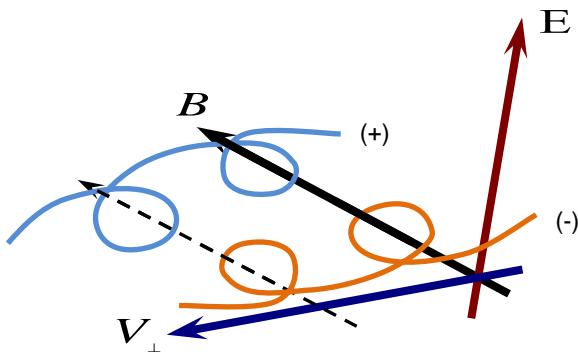
Sunce i Mjesec prouzročuju plimne sile u atmosferi, čiji je konačni rezultat vertikalno gibanje čestica zraka koje je inače primarno horizontalno. Gibanje zraka kroz geomagnetsko polje inducira elektromotornu силу, koja pogoni električne struje na ionosferskim visinama gdje je zrak električki provodljiv, te tako prouzročuje dnevne varijacije geomagnetskog polja. Takav proces objašnjava teoriju atmosferskog dinama. Čestice emitirane sa Sunca također međudjeluju sa Zemljinom magnetosferom i time proizvode dodatne perturbacije geomagnetskog polja koje se zovu geomagnetski poremećaji. Tijekom vrlo mirnih dana, kada su geomagnetski poremećaji gotovo zanemarivi, dominantni dio uočljivih geomagnetskih varijacija je funkcija Sunčevog vremena, tj. geomagnetski solarno mirne varijacije,  $Sq$ . Maleni dio nje je geomagnetski lunarno mirna dnevna varijacija L, funkcija Mjesečevog vremena. Ionosferske struje povezane s L pridonose samo 5% normalnoj varijaciji geomagnetskog polja. Činjenica da je L doprinos vrlo malen, objašnjava težinu njegovog izračuna na osnovi zabilježenih dnevnih geomagnetskih varijacija.

Ekvatorijalni elektromlaz (EEJ) je također rezultat ionosferskog dinama. Vodljive čestice u ionosferi, elektroni i ioni, gibaju se brzinama  $\vec{v}$  u prisutnosti geomagnetskog polja  $\vec{B}$ , što rezultira silom  $q\vec{v} \times \vec{B}$  na tok struje u ionosferi. Rezultirajuće dinamo struje se primarno pojavljuju u E sloju ionosfere, gdje je električna vodljivost pogodna. Ionosferu možemo aproksimirati beskonačnim, slabo ioniziranim plinom u kojem se nalazi  $n_r$  nabijenih čestica  $r$ -toga tipa po kubičnom centimetru, gdje  $r$  predstavlja elektrone ili ione bilo pozitivne ili negativne.

Neka čestica tipa  $r$  ima naboj  $e_r$ , masu  $m_r$ , frekvenciju sudaranja s električno neutralnim česticama  $v_r$  i kutnu frekvenciju nabijene čestice u magnetskom polju

$$\omega_r = \frac{e_r B}{m_r} \quad (10)$$

gdje je  $B$  jakost magnetskog polja u mediju. Takvu vrstu žiro-frekvencije nabijena čestica ima u slučaju kad se nalazi u rijetkoj plazmi, gdje je mogućnost interakcije s drugim česticama zanemarivo mala te se sudaranje može zanemariti. Kada se takva plazma nalazi u magnetskom polju, nabijena čestica  $q$  kruži oko silnica magnetskog polja  $B$  kao na slici desno.



Zemljino električno polje može također biti paralelno s magnetskim poljem pa je tada brzina strujanja usporedna s njima, kao na slici desno.

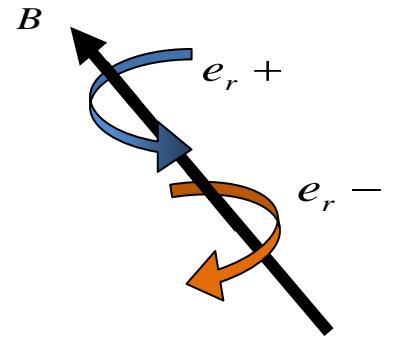
Pogledajmo ipak najopćenitiji slučaj u kojem električno polje  $\vec{E}$  nije ni paralelno niti okomito na geomagnetsko polje  $\vec{B}$ , nego se može prikazati preko dviju komponenata, od kojih je prva komponenta paralelna dok je druga okomita na  $\vec{B}$ . Tada je i brzina strujanja nabijenih čestica kombinacija paralelnog i okomitog električnog polja na magnetsko polje, tj. doprinosu dviju brzina. Brzinu strujanja možemo u tom slučaju pisati kao:

$$V = V_{\perp} + V_{\parallel} \quad (11)$$

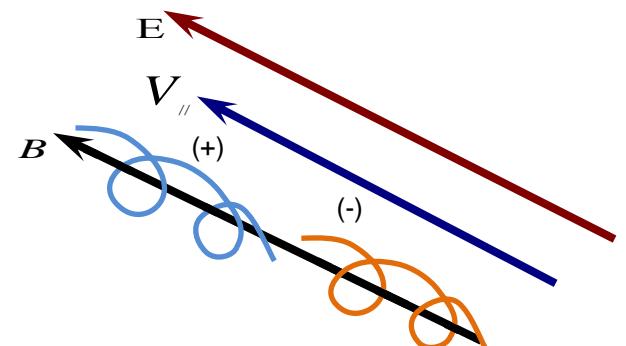
U daljem tekstu vektorske veličine bit će prikazane podebljanim fontom. Za električno polje koje djeluje paralelno na magnetsko polje, vodljivost koja se još zove longitudinalna ili paralelna vodljivost, neovisna je o  $B$ , te se može pisati kao:

$$\sigma_0 = e^2 \left( \frac{n_e}{m_e v_e} + \frac{n_-}{m_- v_-} + \frac{n_+}{m_+ v_+} \right) = \sum_r \frac{n_r e_r^2}{m_r v_r} = \frac{1}{B} \sum_r \frac{n_r \omega_r}{v_r} e_r \quad (12)$$

gdje je  $n$  brojčana gustoća nabijenih čestica,  $m$  masa,  $e$  naboj dok indeksi  $+,-$  i  $e$  predstavljaju pozitivne i negativne ione te elektrone, tim redoslijedom, koje općenito prikazujemo kao  $r$  tip



Kada je električno polje okomito na  $B$  unutar nekolizjske plazme ne postoji struja. Ioni i elektroni su nošeni u istom smjeru, kao što je prikazano na slici lijevo. Brzina strujanja nabijenih čestica je tada  $V_d = E \times \frac{B}{B^2}$  te je u smjeru okomitom i na električno i na magnetsko polje.



čestice kroz označavanje u indeksima. U slučaju kada električno polje djeluje okomito na magnetsko polje, transverzalna ili Pedersonova vodljivost je:

$$\begin{aligned}\sigma_1 &= e^2 \left( \frac{n_e}{m_e} \frac{\nu_e}{\nu_e^2 + \omega_e^2} + \frac{n_-}{m_-} \frac{\nu_-}{\nu_-^2 + \omega_-^2} + \frac{n_+}{m_+} \frac{\nu_+}{\nu_+^2 + \omega_+^2} \right) \\ &= \sum_r \frac{n_r \nu_r e_r^2}{m_r (\nu_r^2 + \omega_r^2)} = \frac{1}{B} \cdot \sum_r \frac{n_r \nu_r \omega_r}{(\nu_r^2 + \omega_r^2)} \cdot e_r\end{aligned}\quad (13)$$

U posljednjem slučaju može postojati tok električne struje okomit i na  $\mathbf{E}$  i na  $\mathbf{B}$ . Takva vrsta struje zbog relativne mobilnosti elektrona i iona ima smjer vektorskog produkta  $\mathbf{B} \times \mathbf{E}$ . Struja se u ovom smjeru naziva Hallova struja te je ona:

$$\begin{aligned}\sigma_2 &= -e^2 \left( \frac{n_e}{m_e} \frac{\omega_e}{\nu_e^2 + \omega_e^2} + \frac{n_-}{m_-} \frac{\omega_-}{\nu_-^2 + \omega_-^2} + \frac{n_+}{m_+} \frac{\omega_+}{\nu_+^2 + \omega_+^2} \right) \\ &= -\sum_r \frac{n_r \omega_r e_r^2}{m_r (\nu_r^2 + \omega_r^2)} = -\frac{1}{B} \cdot \sum_r \frac{n_r \omega_r^2}{(\nu_r^2 + \omega_r^2)} \cdot e_r\end{aligned}\quad (14)$$

Ako označimo  $\omega_r = \frac{e_r B}{m_r}$ ,  $\tan \alpha_r = \frac{\omega_r}{\nu_r}$  i  $A = \frac{n_r e_r}{B}$ , tada paralelnu, Pedersonovu i Hallovu vodljivost možemo pisati:

$$\sigma_0 = \sum_r A_r \tan \alpha_r \quad (15)$$

$$\sigma_1 = \sum \frac{n_r e_r}{B} \frac{\omega_r}{\nu_r \left( 1 + \frac{\omega_r}{\nu_r} \right)} = \frac{1}{2} \sum A_r \cdot \tan 2\alpha_r \quad (16)$$

$$\sigma_2 = -\sum \frac{n_r e_r}{B} \frac{\omega_r^2}{\nu_r^2 \left( 1 + \frac{\omega_r}{\nu_r} \right)} = -\frac{1}{2} \sum A_r \cdot \tan 2\alpha_r \cdot \tan \alpha_r \quad (17)$$

U općenitom slučaju,  $E$  možemo rastaviti na dvije komponente, od kojih je jedna paralelna, a druga okomita na  $B$  (slika 9.). Gustoću ionosferskih struja možemo pisati kao linearну kombinaciju triju doprinosa:

$$\mathbf{J} = \sigma_0 \mathbf{E}_0 + \sigma_1 \mathbf{E}_1 + \sigma_2 (\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E}) \quad (18)$$

Ionosferu možemo promatrati kao tanku sferičnu vodljivu plohu koja okružuje Zemlju. Dosad je bila razmatrana vodljivost beskonačnog medija, dok odsad raspravu usmjeravamo na ionizirane slojeve, u kojima je tok struja ograničen na ravnine slojeva, iako će obično biti prisutna komponenta  $\mathbf{E}$  koja je okomita na sloj. Zamislimo ravnicu koja leži u  $x$ - $y$  ravnini i magnetsko polje koje prolazi prema dolje pod kutom  $I$  s obzirom na tu ravninu, dok  $x$  i  $y$  osi koincidiraju s magnetskim jugom tj. istokom, u istom redoslijedu. Ako uzmemo da je  $z$  os usmjerena vertikalno prema gore, sloj možemo smatrati kao dio ionosfere na sjevernoj hemisferi. Ako jedinične vektore  $\mathbf{i}$ ,  $\mathbf{j}$  i  $\mathbf{k}$  označimo tim redoslijedom u smjeru  $x$ ,  $y$  i  $z$  onda se električno polje može napisati kao:

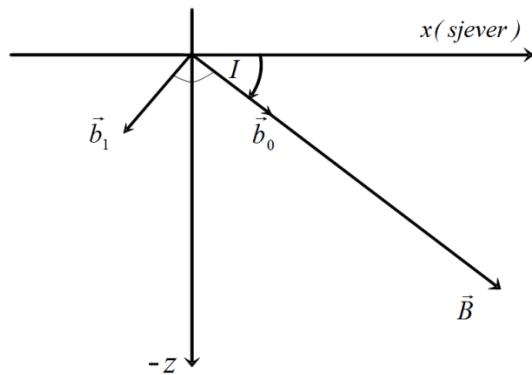
$$\mathbf{E} = E_x \mathbf{i} + E_y \mathbf{j} + E_z \mathbf{k} \quad (19)$$

dok je magnetsko polje:

$$\mathbf{B} = |\mathbf{B}| \cdot \mathbf{b}_0 = B \cdot \mathbf{b}_0 = -B \cos I \cdot \mathbf{i} - B \sin I \cdot \mathbf{k}. \quad (20)$$

Također se može električno polje raščlaniti na komponentu paralelnu  $\mathbf{E}_0$  i okomitu  $\mathbf{E}_1$  na magnetsko polje, te u skladu s tim definiramo jedinične vektore u tim smjerovima kao  $\mathbf{b}_0$  koji je paralelan s magnetskim poljem i  $\mathbf{b}_1$  koji je okomit na magnetsko polje (Slika 9.). Indukcija geomagnetskog polja dana je jednadžbom (20) gdje jedinične vektore možemo pisati

$$\begin{aligned} \mathbf{b}_0 &= -\cos I \cdot \mathbf{i} - \sin I \cdot \mathbf{k} \\ \mathbf{b}_1 &= \sin I \cdot \mathbf{i} - \cos I \cdot \mathbf{k}. \end{aligned} \quad (21)$$



Slika 9. Ravnina magnetskog meridijana s jediničnim vektorima usmjerenima paralelno  $\mathbf{b}_0$  i okomito  $\mathbf{b}_1$  na geomagnetsko polje  $\mathbf{B}$ . Os Z vertikalno je prema gore.

U bilo kojoj točki strujna gustoća je razmjerna električnom polju na tom mjestu, a konstanta razmjernosti ovisi samo o tvari, te se može napisati:

$$\mathbf{J} = \bar{\sigma} \cdot \mathbf{E} \quad (22)$$

gdje je faktor razmjernosti  $\bar{\sigma}$  tenzor vodljivosti koju nazivamo električna vodljivost tvari te je možemo prikazati u generalnom matričnom obliku:

$$\bar{\sigma} = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & \sigma_{xz} \\ \sigma_{yx} & \sigma_{yy} & \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} & \sigma_{zy} & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad (23)$$

$x$ ,  $y$  i  $z$  predstavljaju magnetski smjer prema jugu, istoku te vertikalno prema gore istim redoslijedom.

Da bismo mogli izračunati  $\mathbf{J}$ , moramo odrediti vektore  $\mathbf{E}_0$ ,  $\mathbf{E}_1$  i  $(\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E})$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0 &= (\mathbf{E}_0 \cdot \mathbf{b}_0) \cdot \mathbf{b}_0 = \\ &= (E_x \cos^2 I + E_z \cos I \sin I) \cdot \mathbf{i} + (E_x \cos I \sin I + E_z \sin^2 I) \end{aligned} \quad (24)$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_1 &= (\mathbf{E} \cdot \mathbf{b}_1) \cdot \mathbf{b}_1 + E_y \cdot \mathbf{j} = \\ &= (E_x \sin^2 I - E_z \cos I \sin I) \cdot \mathbf{i} + (-E_x \cos I \sin I + E_z \cos^2 I) \end{aligned} \quad (25)$$

$$\mathbf{b}_0 \times \mathbf{E} = E_y \sin I \cdot \mathbf{i} + (E_z \cos I - E_x \sin I) \cdot \mathbf{j} - E_y \cos I \cdot \mathbf{k} \quad (26)$$

Ako se gornje jednadžbe stave u izraz za gustoću struje (jednadžba 22), dobiva se:

$$\begin{aligned} \mathbf{J} = & [(\sigma_0 \cos^2 I + \sigma_1 \sin^2 I) + \sigma_2 E_y \sin I + (\sigma_0 - \sigma_1) E_z \cos I \sin I] \cdot \mathbf{i} \\ & + [\sigma_1 E_y - (E_x \sin I - E_z \cos I)] \cdot \mathbf{j} \\ & + [(\sigma_0 - \sigma_1) E_z \cos I \sin I - \sigma_2 E_y \cos I + (\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)] \cdot \mathbf{k} \end{aligned} \quad (27)$$

Vertikalna komponenta struje ne postoji, jer bi bila okomita na vodljivu plohu. Zbog toga je opravdano taj dio izjednačiti s nulom, i na takav način jednostavno izračunati koliko iznosi  $z$  komponenta električnog polja

$$E_z = \frac{(\sigma_0 - \sigma_1) E_z \cos I \sin I - \sigma_2 E_y \cos I}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)} \quad (28)$$

Ako iz jednadžbe za strujnu gustoću eliminiramo  $E_z$  komponentu, dobiva se:

$$J_x = \sigma_{xx} E_x + \sigma_{xy} E_y \quad (29)$$

$$J_y = -\sigma_{xy} E_x + \sigma_{yy} E_y \quad (30)$$

gdje su

$$\sigma_{xx} = \frac{\sigma_0 \sigma_1}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)}, \quad (31)$$

$$\sigma_{xy} = \frac{\sigma_0 \sigma_2 \sin^2 I}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)}, \quad (32)$$

$$\sigma_{yy} = \frac{\sigma_0 \sigma_1 \sin^2 I + (\sigma_1^2 + \sigma_2^2) \cos^2 I}{(\sigma_0 \sin^2 I + \sigma_1 \cos^2 I)} \quad (33)$$

Za specijalni slučaj kada je  $I = 0$ , što vrijedi na geomagnetskom dip ekvatoru, gornje jednadžbe prelaze u jednostavniji oblik:

$$\sigma_{xx} = \sigma_0, \quad \sigma_{xy} = 0, \quad \sigma_{yy} = \frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{\sigma_1} \quad (34)$$

dok je na polu kut inklinacije  $I = 90^\circ$  pa jednadžbe poprimaju drugačiji izgled:

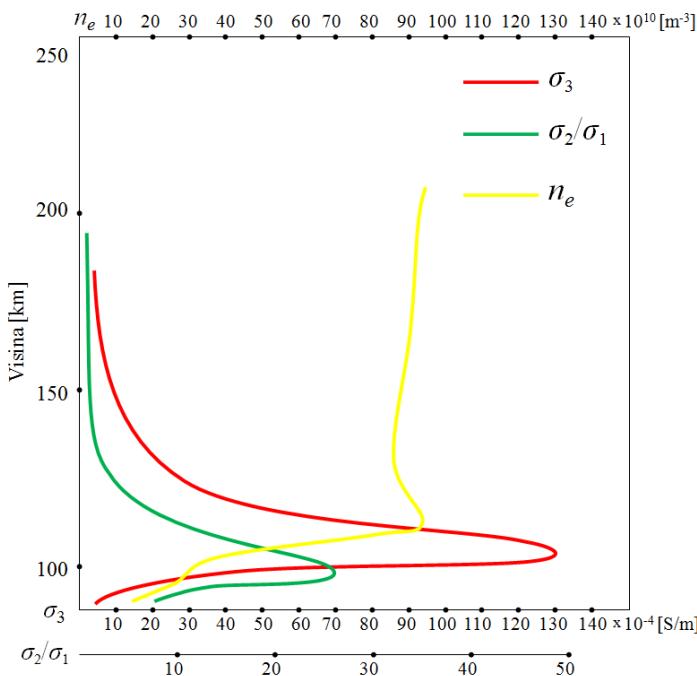
$$\sigma_{xx} = \sigma_{yy} = \sigma_1, \quad \sigma_{xy} = \sigma_2. \quad (35)$$

Kako su  $\sigma_{xx}$ ,  $\sigma_{xy}$ , i  $\sigma_{yy}$  ovisni o kutu inklinacije, njihovi iznosi ovise o položaju. Procjenjuje se da vodljivost integrirana po visini kroz cijelu Zemlju poraste od 5 do 10 puta svog iznosa zahvaljujući isključivo Pedersonovoj vodljivosti  $\sigma_1$ . Doprinos Hallove vodljivosti  $\sigma_2$  u tom pojačanju zanemariv je na većini mjesta (**Onwumechili, 1967.**). Ono što je od posebnog interesa za promatranje jest utjecaj specijalne vrste vodljivosti:

$$\sigma_3 = \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1} \quad (36)$$

koja se naziva Cowling vodljivost i ovisi o visini, jer je gustoća elektrona  $n$  ovisna o frekvenciji sudaranja  $\nu_r$ . S obzirom na to da je  $\sigma_2$  veća od  $\sigma_1$  na visini od približno 100 km, Cowling vodljivost predstavlja zapravo pojačanje Pedersonove vodljivosti (slika 10.).

U blizini dip ekvatora Cowling vodljivost je povećana od 2 do 5 puta jer je doprinos Hallove struje na tom području potpun. Takvo pojačanje je uočeno tijekom nekoliko neovisnih raketnih mjerena ([Subbaraya i sur., 1972.](#)). Na osunčanoj strani ionosfere, plimni vjetrovi prouzročuju polarizacijsko električno polje koje je pretežno usmjerenog prema istoku. Silnice magnetskog polja na dip ekvatoru su horizontalne i kombinacija toga s polarizacijskim električnim poljem uzrokuje  $E \times B$  strujanje elektrona prema gore, čime se generiraju negativni naboji iznad i pozitivni naboji ispod ionosferske E regije (slika 6.) zbog rekombinacije. Rezultirajuće električno polje sprečava dodatno strujanje elektrona prema gore. Umjesto toga, oni se sada gibaju prema zapadu uz pomoć električnog polja usmjerenog prema istoku. Proces rekombinacije ili neutralizacije suprotan je ionizaciji, te se oba procesa kontinuirano odvijaju unutar cijele ionosfere. Polarizacija ima za posljedicu dodatno razdvajanje naboja, što povećava potencijal i pogoduje vodljivosti. Takvo pojačanje vodljivosti u smjeru istok-zapad događa se u tankoj traci po dip ekvatoru i smanjuje se što se više udaljavamo od njega.



Slika 10. Visinski profil elektronske gustoće  $n_e$ , omjer Halllove i Pedersonove vodljivosti  $\sigma_2/\sigma_1$  i Cowling vodljivosti  $\sigma_3$  na osnovi raketnih mjerena iznad Thumbe, Indija, na  $-0,47$  dip latitudi, kao što je prikazano u [Subbaraya i sur. \(1972.\)](#).

Gustoća elektrona, omjer Hallove i Pedersonove vodljivosti  $\sigma_2/\sigma_1$  te Cowlingove vodljivosti kao funkcije visine, koje poprimaju slične hodove i u drugim mjerjenjima obavljanima na područjima dip ekvatora, prikazan je na slici 10. Upravo takva pojačana vodljivost pogoduje električnoj struji prema istoku koja se sastoji od gibanja elektrona prema zapadu unutar ekvatorijalnog pojasa koji se zove ekvatorijalni elektromlaz.

## 5.1. Model razdiobe strujne gustoće kao uzrok geomagnetskih varijacija mirnog dana

Cilj je iskoristiti funkciju, koja s najmanjim brojem parametara ima svojstva slična onima što se očekuju od struja koje prouzročuju varijacije mirnog dana. Tri su važna čimbenika uzeta u obzir:

1. glavni dio struje teče u ionosferi, s obzirom na vodljivost ionosfere, te se očekuje da će njezin iznos biti najveći na određenoj visini,
2. poznato je da je struja ograničena po visini, no nije vjerojatno da ona naglo poprima nullu vrijednost,
3. svaka struja mora imati zatvorenu putanju.

Povijesno, različiti su oblici strujne razdiobe upotrebljavani za izračun EEJ polja koje bi odgovaralo mjerjenjima. Pretpostavka da je struja koncentrirana u tankom sloju i usmjerena prema istoku te da varira isključivo po latitudi implicira model tanke ljske. S druge strane, mjerena na površini Zemlje nemaju potrebnu osjetljivost za odvajanje različitih oblika strujne distribucije ([Famitakoye i Mayaud, 1976.](#)) ili mogućnost za prepoznavanje različitih vertikalnih profila ([Duhau i Romanelli, 1979.](#)). Također, mjerena na površini ne mogu odrediti dijelove struje koji su uzrokovani vertikalnim tokom. Izbor ekvivalentnog modela strujne distribucije za ekvatorijalni elektromlaz stoga treba biti baziran s obzirom na:

- a) reprezentacija latitudinalne varijacije strujne gustoće treba biti najbliža moguća realnoj situaciji te
- b) jednostavnost modela treba omogućiti generiranje magnetskog polja u zatvorenom obliku kako bi dopustio praktičnu inverziju Zemaljskih mjerjenja.

Izravna je posljedica gore spomenutog uvjeta a) da parametri intenziteta i širine EEJ trebaju biti određeni s prihvatljivom razinom točnosti u procesu inverzije. Za potrebe ovog rada odabran je model koji je predložio [Onwumechili \(1967.\)](#). Onwumechili je izveo dvodimenzionalnu kontinuiranu distribuciju modela strujne gustoće sa širinom i debljinom. Jedna od jednostavnih funkcija koja zadovoljava gore spomenuta tri čimbenika je

$$\mathbf{c} = \mathbf{c}_0 \frac{b^2(b^2 + \beta\zeta^2)}{(b^2 + \zeta^2)^2}. \quad (37)$$

gdje su  $\mathbf{c}$  i  $\mathbf{c}_0(\xi, \eta)$  vektori strujne gustoće u  $\text{Akm}^{-2}$ ,  $b$  je konstantna duljina,  $\beta$  je bezdimenzionalna konstanta, dok su osi Kartezijevog koordinatnog sustava  $(\xi, \eta, \zeta)$  usmjerene prema sjeveru, istoku i vertikalno dolje u tom poretku. Ovaj sustav označa bit će upotrebljavan za struju, dok će isto postavljeni koordinatni sustav  $x, y, z$  biti upotrebljavan isključivo za magnetsko

polje. Kako  $Sq$  struje teku uglavnom u sferičnoj ljsuci oko Zemlje, njihova radijalna ili vertikalna komponenta može biti zanemarena. Zbog toga,  $\mathbf{c} = \mathbf{c}(i, j)$ , gdje je  $i$  sjeverna, a  $j$  istočna komponenta strujne gustoće.

Ovdje je glavna preokupacija ekvatorijalni elektromlaz koji teče od zapada prema istoku tijekom velikog dijela dana, te se zbog toga koncentriramo na istočnu komponentu strujne gustoće,  $j$ . Os struje je u blizini ekvatora, te njezin intenzitet polagano opada s udaljavanjem od te osi, te je dio povratne struje funkcija latitude. Zbog toga se može pisati

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_0 \frac{a^2(a^2 + \alpha\xi^2)}{(a^2 + \xi^2)^2} \cdot \frac{b^2(b^2 + \beta\zeta^2)}{(b^2 + \zeta^2)^2} \cdot f(\eta) \quad (38)$$

gdje je  $f(\eta)$  funkcija longitude ili funkcija vremena,  $a$  je konstantna udaljenost,  $j_0$  je gustoća na  $(0, \eta, 0)$ , dok je  $\alpha$  bezdimenzionalna konstanta. Ukoliko se zbog jednostavnosti stavi  $f(\eta) \equiv 1$ , tada se dobija

$$\mathbf{j} = \mathbf{j}_0 \frac{a^2(a^2 + \alpha\xi^2)}{(a^2 + \xi^2)^2} \cdot \frac{b^2(b^2 + \beta\zeta^2)}{(b^2 + \zeta^2)^2}. \quad (39)$$

Ovo je učinilo gustoću konstantnom vrijednošću duž bilo koje linije paralelne s  $\eta$  smjerom. Ove jednadžbe prepostavljujaju kako je a) strjuna os oblika ravne linije umjesto očekivanog luka, b) osi  $\xi = \zeta = 0$  su ujedno i osi simetrije, te c) varijable je moguće separirati.

Jedino sonde u izravnom kontaktu sa strujom mogu najizravnije mjeriti gustoću struje  $c$  [ $\text{Akm}^{-2}$ ]. Vrlo je važno jednostavno definirati veličinu koja se najlakše mjeri. Definirajmo strujni intenzitet u  $\text{Akm}^{-1}$ , u točki P, kao ukupnu struju koja teče paralelno s pravokutnikom širine 1 km čije je duža stranica 0,5 km udaljena od P i prolazi kroz strujnu plohu. Važno je izraziti usmjerenje širine od 1 km kao i smjer intenziteta, koji je normalan na plohu pravokutnika.

Razmatram struju usmjerenu prema istoku te intenzitet preko sjever-jug udaljenosti od 1 km označavam  $J_\xi$  [ $\text{Akm}^{-2}$ ], dok intenzitet preko vertikalne udaljenosti od 1 km označavam  $J_\zeta$  [ $\text{Akm}^{-2}$ ]. Tijekom cijelog rada uzimat ćeu kako strujni sloj postoji na udaljenostima od  $-L_1$  do  $+L_1$  u  $\xi$  smjeru, tj. sjever-jug smjer, te od  $-L_2$  do  $+L_2$  u  $\zeta$  tj. vertikalnom smjeru. Po definiciji,  $J_\xi$  je ukupna struja koja teče kroz vertikalni pravokutnik duljine  $2L_2$  km čija širina od 1 km leži u smjeru  $\xi$  osi na udaljenosti  $\xi$  od izvorišta struje. Na osnovi takvog razmatranja može se pisati

$$J_\xi = \int_{-L_2}^{L_2} j d\zeta = j_0 b \left[ \frac{(1 - \beta)bL_2}{(b^2 + L_2^2)} + (1 + \beta) \cdot \tan^{-1} \frac{L_2}{b} \right] \cdot \frac{a^2(a^2 + \alpha\xi^2)}{(a^2 + \xi^2)^2}. \quad (40)$$

Ovu jednadžbu mogu napisati kao

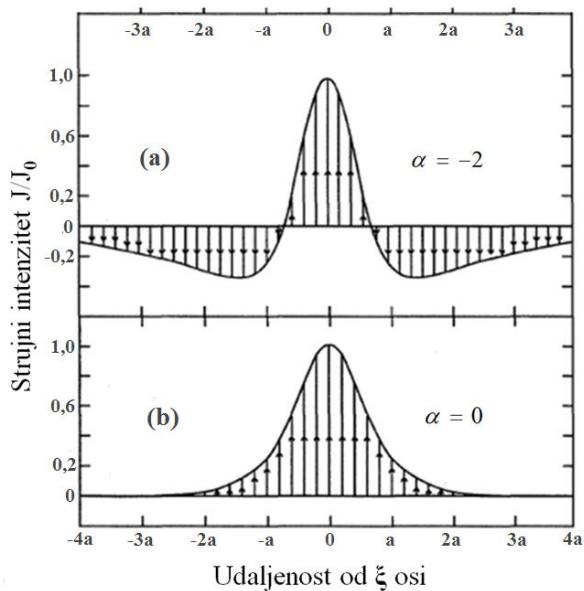
$$J_\xi = J_{\xi 0} \cdot \frac{a^2(a^2 + \alpha \xi^2)}{(a^2 + \xi^2)^2} \quad (41)$$

gdje je

$$J_{\xi 0} = j_0 b \left[ \frac{(1 - \beta) b L_2}{(b^2 + L_2^2)} + (1 + \beta) \cdot \tan^{-1} \frac{L_2}{b} \right] \quad (42)$$

istočna komponenta intenziteta po kilometru duž sjever-jug linije, centrirane u izvorištu. Slično razmatranje vrijedi za  $J_\zeta$  struju kroz pravokutnik duljine  $2L_1$  u  $\xi\zeta$  ravnini čija je širina od 1 km položena vertikalno na  $\zeta$  udaljenosti od izvorišta struje. Analitički izraz za tu struju može se dobiti iz jednadžbi (40) - (42) uz jednostavnu zamjenu  $\alpha$  i  $\beta$  te parametara  $a$  i  $b$ .

Slika 11. prikazuje smjerove struje na osnovi jednadžbe (41) za intenzitete usmjerene ka istoku. Iz ovoga se može doći do zaključaka u vezi sa smjerom struje predstavljenom jednadžbom (39). U blizini  $\eta$  osi struja uvijek teče paralelno s osi i zadržava takvo usmjerenje svugdje kao što je prikazano na slici (11.b), ako su  $\alpha$  i  $\beta$  parametri veći ili jednaki od 0.



Slika 11. Ilustracija dviju vrsta strujnog toka obuhvaćenih trodimenzionalnim Onwumechilli modelom. (a) Za negativne vrijednosti  $\alpha$  povratna struja je paralelna i suprotnog smjera. (b) za pozitivne vrijednosti  $\alpha$  struja je potpuno u istom smjeru. Slika preuzeta i prilagođena iz [Onwumechilli, \(1966.\)](#).

Ako  $\alpha$  i  $\beta$  poprime negativne vrijednosti, struja na određenoj udaljenosti od  $\eta$  osi poprimi suprotan smjer (slika 11.a) i stoga omogućuje povratnu struju bez potrebe promjene smjera struje. U ovom slučaju, s odmicanjem od osi, jačina pozitivne (usmjerene prema naprijed) struje postupno opada i poprima nulte vrijednosti. Tada se smjer mijenja i postaje negativan (usmjerena prema natrag) te po intenzitetu jača do određenog maksimuma i postupno konvergira u beskonačnosti ka nuli. Ako se izbaci indeks  $\xi$  u jednadžbi (41), može se napisati

$$J = J_0 \cdot \frac{a^2(a^2 + \alpha \xi^2)}{(a^2 + \xi^2)^2} \quad (43)$$

što u sebi sadrži tri tipa strujne distribucije:

- i.  $\alpha < 0$ . Intenzitet je nula na

$$\xi^2 = -\frac{a^2}{\alpha}. \quad (44)$$

Postoji maksimalna vrijednost  $J_0$  na  $\xi = 0$  i dvije jednake minimalne vrijednosti

$$J_m = \frac{1}{4} J_0 \cdot \frac{a^2}{(a-1)} \quad \text{na} \quad \xi^2 = \frac{a^2}{\alpha}(\alpha-2). \quad (45)$$

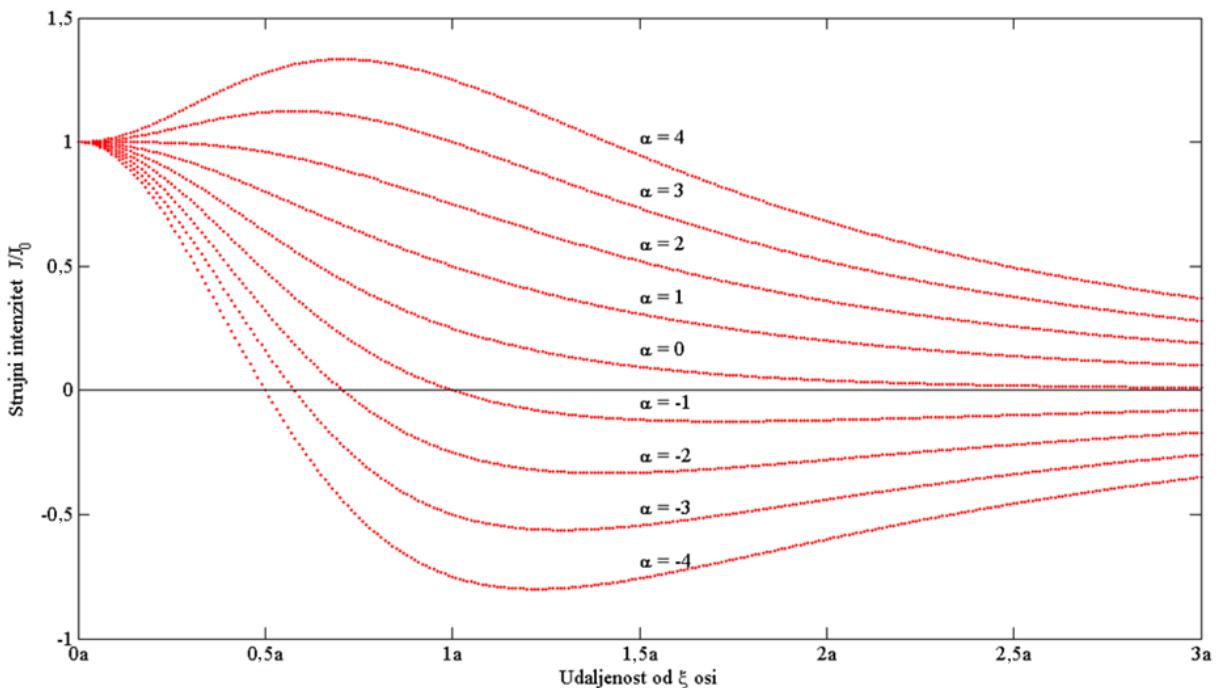
Zbog toga,

$$-J_m/J \geq 1 \quad \text{u suglasnosti s} \quad -\alpha \geq 2(1 + \sqrt{2}). \quad (46)$$

- ii.  $0 \leq \alpha \leq 2$ . Postoji samo jedna maksimalna vrijednost  $J_0$  na  $\xi = 0$ .
- iii.  $\alpha > 2$ . Minimalna vrijednost  $J_0$  se nalazi na  $\xi = 0$ , dok se dvije jednake maksimalne vrijednosti

$$J_M = \frac{1}{4} J_0 \cdot \frac{a^2}{(a-1)} \quad \text{nalaze na} \quad \xi^2 = \frac{a^2}{\alpha}(\alpha-2). \quad (47)$$

Varijacija intenziteta usmjerenog prema istoku, kao funkcija udaljenosti od osi, prikazana je na slici 12. Na osnovi mjerjenih podataka određuje se predznak od  $\alpha$ . Ako  $\alpha$  poprima negativne vrijednosti, tada povratne struje pridonose promatranom polju, suprotno dovodi do pozitivnih vrijednosti  $\alpha$ .



Slika 12. Strujni intenzitet kao funkcija udaljenosti od osi na osnovi strujnog modela (43) za neke vrijednosti parametra  $\alpha$

Za  $Sq$ , jednadžba (46) sugerira  $0 > \alpha > -4,8$ . Druga dva raspona vrijednosti  $\alpha$  mogu biti spomenuta, iako nije vjerojatno kako će oni odgovarati  $Sq$  i EEJ. Za negativne vrijednosti  $\alpha$ , koje su

puno veće od  $-5$ , minimalne vrijednosti strujnog intenziteta, mogu numerički biti puno veće od maksimalne vrijednosti  $J_0$  na osi. Slično, za pozitivne vrijednosti  $\alpha$ , koje su puno veće od  $2$ , maksimum s obje strane osi veći je od numeričke vrijednosti  $J_0$  na osi. Ukratko, ovaj model uključuje velik izbor strujnih distribucija, no struktura strujnog sustava nije u potpunosti određena dok god se mjereni podaci ne upotrijebe za prilagodbu distribucijskih konstanti  $\alpha$  i  $\beta$ .

Definirajmo širinu struje kao udaljenost dviju točaka gdje je gustoća nula duž  $\zeta$  osi, te slično definiramo debljinu struje duž  $\zeta$  osi. Ovo pretpostavlja kako su mjerena obavljana duž osi simetrije struje s ishodištem u točki maksimuma strujne gustoće, gdje je  $\zeta$  os usmjerena vertikalno dolje. Ako se poluširina označi s  $w$  a poludebljina s  $d$ , onda iz jednadžbe (39) proizlazi da su

$$w = \frac{a}{-\alpha^{1/2}}, \quad (48)$$

$$d = \frac{b}{-\beta^{1/2}}. \quad (49)$$

Očito je kako  $w$  i  $d$  poprimaju realne vrijednosti ako su  $\alpha$  i  $\beta$  negativni. Kada oni nisu realni, o lateralnom dosegu može se govoriti u terminima prividna širina  $2a$ , a za vertikalni doseg može se upotrebljavati termin prividne debljine  $2b$ . U tom slučaju, udaljenost između dviju točaka gdje je  $j = \frac{1}{2}j_0$  duž  $\xi$  osi može biti upotrebljavan kao parametar širine, i slično vrijedi za parametar debljine. Poludebljina na pola visine maksimalne vrijednosti,  $d_{1/2}$  je tada dana s

$$d_{1/2}^2 = b^2 [(\beta - 1) + \sqrt{(1 + (\beta - 1)^2)}]. \quad (50)$$

Ukupna struja sustava je

$$I = \int_{-L_1}^{L_1} \int_{-L_2}^{L_2} j \cdot d\xi \cdot d\zeta = \int_{-L_1}^{L_1} J_\xi \cdot d\xi. \quad (51)$$

Upotrebom jednadžbi (40) i (41), može se dobiti

$$I = J_{\xi_0} \cdot a \left[ \frac{(1-a)aL_1}{(a^2 + L_{21}^2)} + (1+\alpha) \cdot \tan^{-1} \frac{L_1}{a} \right] = \frac{J_{\xi_0} \cdot J_{\zeta_0}}{j_0}. \quad (52)$$

Budući da povratna (negativna) struja mora poništiti struju prema naprijed (pozitivnu),  $I$  nestaje. Takvo razmatranje zahtijeva da je ili  $J_{\xi_0}$  ili  $J_{\zeta_0}$  nula. Slučaj sa  $J_{\zeta_0} = 0$  istodobno sa  $J_{\xi_0} \neq 0$  je istinit za sve visine, te zbog toga struja teče u potpunosti u ravnicama  $\zeta = \text{const}$ . Ukupna je struja u bilo kojoj plohi ograničenoj s takve dvije ravnine nula. Ovo je isključiva posljedica separiranih varijabli. Postoje i drugi načini kako se može taj uvjet poništenja ukupne struje  $I$  jednadžba (51) zadovoljiti, no s obzirom da su  $Sq$  struje pretežno povezane s horizontalnim

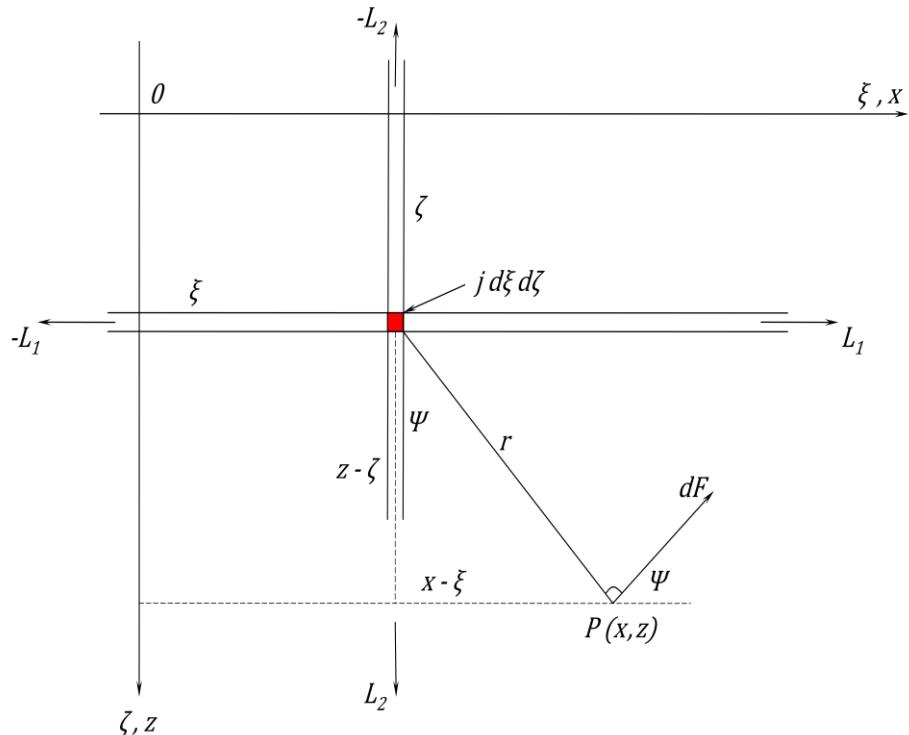
tokovima, može se prihvati  $J_{\zeta 0} = 0$ . Kada  $\alpha$  poprima negativne vrijednosti, ukupna pozitivna struja, usmjerena prema naprijed, tada je:

$$I_+ = \int_{-\omega}^{\omega} J_\xi \cdot d\xi = \left[ (-\alpha)^{1/2} + (1 + \alpha) \cdot \tan^{-1} \left( \frac{1}{-\alpha} \right)^{1/2} \right]; \quad (53)$$

S druge strane, ako je  $\alpha$  pozitivan, tada je struja  $I$  jednaka onoj iz jednadžbe (52).

Ono što je u ovom trenutku zanimljivo pogledati jest upravo magnetsko polje koje nastaje takvom strujom te njen utjecaj na površini. Budući da se ekvatorijalni elektromlaz nalazi na visini od 110 km, njegov je doprinos na magnetogramima za mirnih dana nezanemariv. U tu svrhu koristim Kartezijev koordinatni sustav  $(\xi, \eta, \zeta)$  za struju gdje je  $\xi$  usmjerena prema sjeveru,  $\eta$  prema istoku a  $\zeta$  dolje, dok je ishodište sustava postavljeno u središte osi struje. Slično postavljen koordinatni sustav  $(x, y, z)$  korišten je isključivo za magnetsko polje.

Gustoća struje (jednadžba (39)) neovisna je o  $\eta$ , stoga prikazuje strujni sustav koji teče u smjeru istok-zapad s konstantnom gustoćom duž bilo koje linije tog smjera. Zbog toga se može pretpostaviti da je struja beskonačno duga u tom smjeru te se povratna struja ne javlja okretanjem struje nego tokom paralelne struje istog smjera, ali suprotne orientacije, na određenoj udaljenosti od strujne osi. Takav model ne daje polje u  $y$  smjeru. Zbog toga će se računati isključivo sa  $X$  i  $Y$  komponentama polja. Štoviše, model također zanemaruje zakrivljenost Zemlje prilikom integracije, te se zbog toga može reći kako struja teče u ravnini umjesto u sferičnoj ljudsci. Takve aproksimacije su iznimno podobne za uske strujne sustave, kakav je upravo ekvatorijalni elektromlaz.



Slika 13. Ilustracija koordinata struje i polja

Razmotrimo sada elementarni strujni segment jakosti  $j d\xi d\zeta$  u točki  $(\xi, \zeta)$  koji teče iz ravnine papira kao beskonačna linijska struja (slika 13.). Polje koje takva struja stvara u točki  $P(x, z)$  je

$$dF = 0,2 j \frac{1}{r} d\xi d\zeta, \quad (54)$$

gdje su

$$r^2 = (x - \xi)^2 + (z - \zeta)^2, \quad (55)$$

gustoća struje  $j$  u  $\text{Akm}^{-2}$ , udaljenosti u kilometrima, a polje u nT. U toj istoj točki, komponente polja  $X$  i  $Z$  iznose:

$$dX = 0,2 j \frac{(z - \zeta)}{r^2} d\xi d\zeta \quad (56)$$

$$dZ = 0,2 j \frac{(x - \xi)}{r^2} d\xi d\zeta. \quad (57)$$

Uobičajeni način razmatranja strujnog intenziteta umjesto strujne gustoće ekvivalentan je ako se stavi  $\zeta = 0$  u izrazu za  $r$  te se integrira  $j$  iz (54) s obzirom na  $\zeta$  kako bi se dobio izraz za  $J_\xi$  iz (41) te se dobivene jednadžbe uvrste u (54). Rezultat toga je ograničavanje i koncentracija struje u ravnini  $\zeta = z = 0$ . Polje se tada dobiva daljom integracijom po  $\xi$ , uzimajući u obzir i granice integracije koje idu od  $-L_1$  do  $L_1$ . Obje struje, ona usmjerena prema naprijed te povratna struja, prema pretpostavci teku unutar tih granica.

Ako se prepostavi da je  $L_1$  puno veći od prividne poluširine  $a$  te od udaljenosti od točke gdje se želi promatrati polje, te da je  $b/L_2$  puno manji u usporedbi s okolinom, tada se sjeverna  $X$  i vertikalna  $Z$  komponenta magnetskog polja, generiranog od strujne distribucije iznad ([Rigoti i sur., 1999.](#)), mogu napisati kao:

$$(sign_\zeta)X = Ka \frac{(h + \alpha h + 2\alpha a)(u - u_0 + b) + (h + \alpha h + 2a)(h + a)^2}{2 \cdot [(u - u_0 + b)^2 + (h + a)^2]^2} \quad (58)$$

$$-(sign_\xi)Z = Ka \frac{(u + b)[(1 + \alpha)(u - u_0 + b)^2 + (h + \alpha h + 3a - \alpha a)(h + a)]}{2 \cdot [(u - u_0 + b)^2 + (h + a)^2]^2} \quad (59)$$

gdje su:

$\xi$  udaljenost prema sjeveru od centralne osi strujne distribucije,

$\zeta$  vertikalna udaljenost (pozitivna prema dolje) od strujne distribucije,

$sign_{\xi, \zeta}$  je predznak koordinate  $\xi$  ili  $\zeta$ ,

$b$ , visina vertikalnog profila, povezana s poludebljinom,

$u$ , magnituda udaljenosti prema sjeveru  $\xi$ ,

$u_0$ , centar strujne distribucije,

$h$ , iznos vertikalne udaljenosti  $\zeta$ ,

$K$  je magnetsko polje beskonačne strujne plohe konstantnog intenziteta  $J_0$ ,  $K = 0,2 \pi J_0$ ,

$\alpha$ , bezdimenzionalna konstanta koja određuje omjer povratne struje na bokovima strujne distribucije

$a$ , konstanta meridionalne skale, povezana s poluširinom  $w$  kao  $a = w(-\alpha)^{1/2}$  jdžba. (48).

Ovdje treba posebnu pozornost obratiti na predznak koordinata  $\xi$  i  $\zeta$ . Zbog toga se može podrobniјe definirati predznak, kao:

$$sign_{\zeta} = \frac{\zeta}{|\zeta|} \quad \text{dok je } \pm 1 \text{ za } \zeta = 0 \quad (60)$$

$$sign_{\xi} = \frac{\xi}{|\xi|} \quad \text{dok je } \pm 1 \text{ za } \xi = 0$$

$$u = |\xi|, \quad v = |\zeta|. \quad (61)$$

Jednadžbe (58) i (59) bit će korištene kao progresivne jednadžbe podešavanja (*eng. forward model*) pri inverziji izmjerениh  $H$  i  $Z$  komponenti polja ekvatorijalnog elektromlaza. Takvim se modeliranjem set teorijskih jednadžbi i podataka koristi kao predikcija vrijednosti koje određeni senzori mijere uz danu konfiguraciju okoliša.

U ovom je radu prihvaćena visina elektromlaza EEJ od 110 km (**Davis i sur., 1967.**). To postavlja struju iznad točaka u kojima se mjeri njezin efekt na površini Zemlje, i kako je  $\zeta$  os pozitivna prema dolje slijedi  $sign_{\zeta} = 1$ . S druge strane, predznak od  $\xi$  ovisit će o geomagnetskim koordinatama opservatorija i njihovoj udaljenosti od dip ekvatora. Za sve osim jedne postaje,  $sign_{\xi}$  bit će pozitivan, jer su one i sjevernije od dip ekvatora, dok je za račun vrijednosti polja na postaji Huancayo u Peruu potrebno uzeti  $sign_{\xi} = -1$  jer se nalazi  $2,08^{\circ}$  južnije od dip ekvatora, naravno gledajući u geomagnetskim koordinatama. Važno je spomenuti kako na osnovi prepostavki učinjenih u izvodu ovih jednadžbi jedino paralelni profili sa osi strujne distribucije za vrijeme maksimuma oko lokalnog podneva mogu biti modelirani. Parametri koji trebaju biti procijenjeni su  $K, a, \alpha$  i centar strujne distribucije  $u_0$ . Parametar  $b$ , povezan s poludebljinom mlaza (49), postavljen je na nulu, kao da je struja koncentrirana u beskonačno tankom sloju. Mlaz će biti izračunat također i za  $b = 9,47$  km kako su **Onwumechili i sur., (1989.)** na osnovi raketnih mjerena predložili. Zgodno je izračunati i visinski profil mlaza jer ipak ovaj model uključuje i latitudinalnu i visinsku strukturu, te zbog toga spada u modele tzv. debelih struja. **Fambitakoye i Mayaud (1976.)** pokazali su da modeli kvadratne distribucije vrlo dobro koreliraju s magnetskim podatcima guste mreže opservatorija.

Cilj je teorijske vrijednosti modela koje daju jednadžbe (58) i (59), odnosno  $X_m$  i  $Z_m$ , gdje m označava model, usporediti s mjeranim vrijednostima na opservatoriju  $X_o$  i  $Z_o$ . Zbog toga će se gledati da vrijednost omjera  $X_m/Z_m$  bude što bliža omjeru mjerene vrijednosti na opservatoriju  $X_o/Z_o$ . Takoder, za svaki će opservatorij posebno biti potrebno dodatno namjestiti vrijednosti intervala parametara, kako bi mjerene vrijednosti ušle u područje djelovanja modela. Model je nelinearan, pa je iznimno osjetljiv na varijaciju parametara, te je potrebno zadovoljiti točnost u svakom od parametara.

Postavljanjem omjera kao kriterija usporedbe teorijske i mjerene vrijednosti, uz oznake

$$f_X(a, \alpha, u_0) = a \frac{(h + ah + 2\alpha a)(u - u_0 + b) + (h + ah + 2a)(h + a)^2}{2 \cdot [(u - u_0 + b)^2 + (h + a)^2]^2} \quad (62)$$

$$f_Y(a, \alpha, u_0) = a \frac{(u + b)[(1 + \alpha)(u - u_0 + b)^2 + (h + ah + 3a - \alpha a)(h + a)]}{2 \cdot [(u - u_0 + b)^2 + (h + a)^2]^2}. \quad (63)$$

prikladno je jednadžbe (58) i (59) napisati u drugačijoj formi,

$$(sign_\zeta)X = K \cdot f_X(a, \alpha, u_0) \quad (64)$$

$$-(sign_\xi)Z = K \cdot f_Y(a, \alpha, u_0). \quad (65)$$

Na takav način, kada se odrede vrijednosti parametara  $a, \alpha$  i  $u_0$ , može se postaviti uvjet da totalni intenzitet teorijskog polja koje daje model mora biti jednak totalnom mjerrenom polju na opservatoriju:

$$\mathbf{F}_o = \mathbf{F}_m \quad (66)$$

gdje  $\mathbf{F}_o$  označava intenzitet mjerenog polja a  $\mathbf{F}_m$  teorijsku vrijednost koju daje model. Totalni intenzitet modela je u tom slučaju jednostavno izračunati preko:

$$\mathbf{F}_m = \sqrt{X^2 + Z^2} \quad (67)$$

gdje su vrijednosti  $X$  i  $Z$  izračunate pomoću (64) i (65), te treba imati u vidu kako je jedna od pretpostavki modela da struja ne proizvodi polje u  $Y$  smjeru. Uvrste li se (64) i (65) u (67) i nakon toga u (66), može se dobiti parametar  $K$  kao omjer mjerenog intenziteta na opservatoriju i totalnog intenziteta koji daje model:

$$K = \frac{\mathbf{F}_o}{\sqrt{f_X^2(a, \alpha, u_0) + f_Y^2(a, \alpha, u_0)}}. \quad (68)$$

Sada preostaje odrediti vrijednosti parametara  $a, \alpha$  i  $u_0$ . To je riješeno metodom varijacije parametara unutar određenih intervala u kojima se očekuju njihove vrijednosti ([Onwumechili i Agu, 1982.](#)), posebno za svaku postaju i za svaki dan. Problem je nelinearan s obzirom na parametre  $a$  i  $u_0$  te je sistem prezadan, što znači da je broj podataka veći od broja parametara.

Parametar  $\alpha$  je postavljen tako da varira oko vrijednosti  $-1,8$ , no njegova je maksimalna vrijednost ograničena na  $-1$ . Takvim se ograničavanjem ispunjava jedan od važnih čimbenika modela, njegova sposobnost za izračunom povratne struje EEJ, tzv. povratni elektromlaz CEJ (eng. *Counter electrojet*).

## 5.2. Longitudinalna ovisnost EEJ

**Onwumechili (1967.)** u model guste strujne distribucije uključuje i ovisnost o geografskoj širini i ovisnost o visini. Taj je model vrlo dobar za opis ponašanja EEJ u okolini lokalnog podneva. Treba spomenuti i postojanje još nekoliko različitih modela, koji opisuju samo latitudinalnu ovisnost EEJ, gdje su parametri uključeni u razmatranje latituda centra ( $c$ ), maksimalni strujni intenzitet ( $I$ ) u centru te poluširina EEJ ( $a$ ). Poznate strujne modele možemo sažeti kroz sljedeće jednadžbe ako označimo s  $I(x)$  strujni intenzitet na određenoj latitudinalnoj udaljenosti ( $x$ ) od ekvatora:

- Jednolika strujna distribucija

$$I(x) = I_0 \quad (69)$$

- Parabolična **Chapman (1951.)** distribucija

$$I(x) = I_0 \left( 1 - \frac{(x - c)^2}{a^2} \right) \quad (70)$$

- Kvadratna distribucija četvrtog reda **Fambitakoye i Mayaud (1976.)**

$$I(x) = I_0 \left( 1 - \frac{(x - c)^2}{a^2} \right)^2. \quad (71)$$

U jednadžbama (69) - (71)  $x$  je definiran unutar raspona:  $c - a \leq x \leq c + a$ , gdje je  $a$  poluširina, a  $c$  položaj centra EEJ.

**Onwumechili (1967.)** je zbog ograničenja ovih tankih strujnih modela predložio gustu strujnu distribuciju (43) kao ovisnost o geografskoj širini zajedno s visinskom strukturom. Prikladnost modela tanke struje određena je time kako dobro izračunate vrijednosti odgovaraju latitudinalnom hodu na osnovi uočenih magnetskih mjerena. Posebno je pokazano kako model kvadratne distribucije vrlo dobro odgovara magnetskim mjerjenjima guste mreže opservatorija (**Fambitakoye i Mayaud 1976.**). Magnetski efekti dnevne varijacije povezani s EEJ horizontalne  $\Delta H$  i vertikalne  $\Delta Z$  komponente pojavljuju se oko 06 h po lokalnom vremenu, dostižući maksimum (ili minimum za  $\Delta Z$  sjeverno od dip ekvatora) u blizini lokalnog podneva te nestaju nakon 18 h po lokalnom vremenu. Tijekom Međunarodne godine ekvatorijalnog elektromlaza (eng. *International*

*equatorial electrojet year* – IEEY) od 1992. do 1994. bilo je postavljeno više gušćih mreža magnetometara u Brazilu (Rigoti i sur., 1999.), Indiji (Arora i sur., 1993.) te u području zapadne Afrike (Amory-Mazaudier i sur., 1993.; Doumouya i sur., 1998.; Vassal i sur., 1998.), što je zajedno činilo mrežu od 26 opservatorija. Empirijski model EEJ, koji uključuje ovisnost o lokalnom vremenu kao i ovisnost o longitudi, razvili su Doumouya i sur., (2003.). Vremenski model reproducira karakteristične hodove magnetske horizontalne i vertikalne komponente povezane s utjecajem EEJ na površini. Ovisnost EEJ o lokalnom vremenu može se prikazati preko Gaussove funkcije  $G(t)$ , kao (Doumouya i sur., 2003.):

$$G(t) = \exp\left(-\frac{(t-T)}{t_m^2}\right). \quad (72)$$

$T$  je lokalni sat kada nastupa maksimum  $\Delta H$  dnevne varijacije pod utjecajem EEJ. U prosjeku,  $T = 12$  h po lokalnom vremenu, s mogućim odstupanjima od  $\pm 1$  h. Ovaj se parametar može mijenjati od dana do dana, kao i ovisno o godišnjem dobu. Parametar  $t_m$  kontrolira vremenski okvir Gaussove funkcije dnevnog hoda komponenata  $\Delta H$  i  $\Delta Z$ . Prosječno iznosi  $t_m = 4$  h za dnevne varijacije zapadnoafričke regije. Doumouya i sur., (2003.) pokazali su kako je ta vrijednost parametra  $t_m$  odgovarajuća i za dnevne varijacije u Indiji i Brazilu. Zbog odabira opservatorija u ovom radu, te njihova geografskog položaja koji je usporediv s longitudinalnim regijama u modeliranju funkcije  $G(t)$ , ista je vrijednost za  $t_m$  prihvaćena. Zbog toga dnevne varijacije strujne gustoće u središtu EEJ možemo ekvivalentno prikazati kao

$$J_0(t) = J_{max} e^{\left(-\frac{(t-T)}{t_m^2}\right)} \quad (73)$$

gdje je  $J_0(t)$  gustoća EEJ u središtu za vrijeme promatranog sata ( $t$ ), dok je  $J_{max}$  vrijednost  $J_0$  za vrijeme nastupa maksimuma  $H$  komponente određena na osnovi  $J_o = K/(0,2 \cdot \pi)$  što slijedi iz jednadžbi (58) i (59). Sada se može napisati izraz

$$J(x, t) = J_{max} \cdot \frac{a^2(a^2 + \alpha x^2)}{(a^2 + x^2)^2} \cdot e^{\left(-\frac{(t-T)}{t_m^2}\right)} \quad (74)$$

koji predstavlja gustoću struje kao funkciju latitudo i vremena. Kako ta jednadžba ujedno i predstavlja jednadžbu koja se koristi za finalni izračun gustoće struje EEJ, zgodno je ponovno napomenuti što su pojedine varijable:

$J_{max}$  maksimalna vrijednost strujne gustoće EEJ u središtu raspodjele koja prati geomagnetski ekvator, određena je uz pomoć parametra  $K$  preko:  $J_{max} = K/(0,2 \cdot \pi)$ ,

$K$  magnetsko polje beskonačne strujne plohe konstantnog intenziteta  $J_{max}$ , određuje se preko omjera iz jednadžbe (68),

- $\alpha$ , bezdimenzionalna konstanta koja određuje omjer povratne struje na bokovima strujne distribucije, te kontrolira iznos CEJ,
- $a$ , konstanta meridionalne skale, povezana s poluširinom  $w$  kao  $a = w(-\alpha)^{1/2}$ ,
- $x$  udaljenost pozitivna prema sjeveru od centralne osi strujne distribucije, računata kao  $u - u_0$ , gdje je  $u$  udaljenost opservatorija od geomagnetskog ekvatora, dok je  $u_0$  korekcija za centar strujne distribucije.

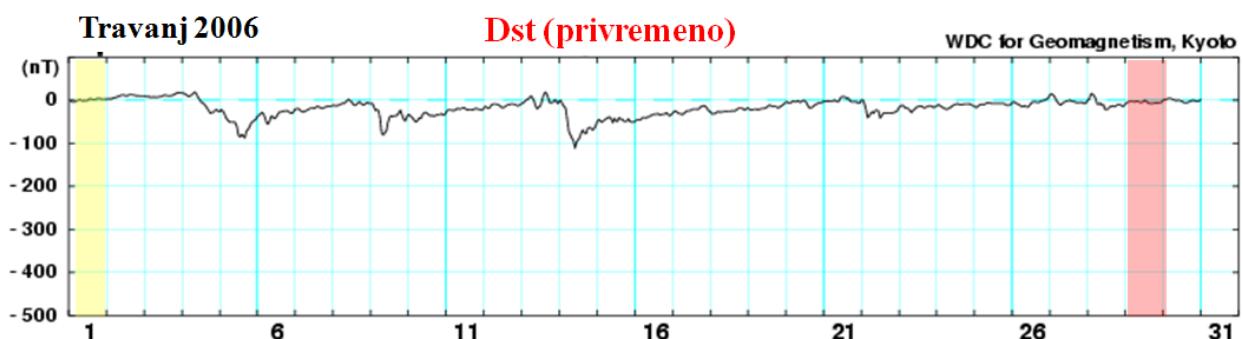
Na takav se način uz određene vrijednosti parametara  $K, \alpha, a$  i  $u_0$  može izračunati gustoća struje za svaki odabrani dan. Radi detaljnijeg prikaza EEJ treba imati u vidu da empirički model, koji daje parametre EEJ na osnovi površinskih mjerena, može biti iskorišten za određivanje vrijednosti izravno iznad opservatorija s kojeg su preuzeta mjerena. Onwumechili model daje i visinski i latitudinalni profil. Linearna kombinacija s Doumouya – Gaussovom raspodjelom daje satnu ovisnost na pojedinom opservatoriju i longitudinalni profil. Iako je vremenski korak Doumouya doprinosa  $t_m = 4$  h dovoljno širok kako bi obuhvatio opservatorije i njihova vremena s obzirom na vremensku razliku, ipak je zbog diskretne raspodjele opservatorija unutar ekvatorijalnog pojasa potrebno pretpostaviti hod parametara u onim mjestima po longitudi gdje nema mjerena. Longitudinalna ovisnost parametara EEJ izračunata je numerički po dijelovima kubične Hermiteova interpolacije duž geomagnetskog ekvatora. Kako je ta interpolacija sastavni dio Matlab programa, ovdje neće biti posebno objašnjavana.

## 6. Obrada podataka

Za obradu podataka korišteni su jednominutni srednjaci sa sedam kontinentalnih ekvatorijalnih postaja INTERMAGNET mreže, uključujući četiri postaje na osnovi kojih se računa Dst indeks (Slika 8.). Odabrana je 2006. godina, iako njoj ne pripada lokalni minimum Sunčevih pjega, ali za odabранe postaje u toj godini raspoloživi su definitivni podaci s geomagnetskih opservatorija. Sljedeće, 2007., bilo je više postaja unutar ekvatorijalnog pojasa koji imaju još uvijek preliminarne podatke, te bi na takav način analiza bila nepotpuna. Konačni podaci s opservatorija predstavljaju vrijednosti koje su ispravljene na varijacije bazne linije i u kojima su veći skokovi uklonjeni. Takva se vrsta konačnih podataka objavljuje u godišnjim izvještajima, te su na raspolaganju svjetskim centrima za obradu podataka i čine sastavni dio INTERMAGNET DVD-a. Od svih geomagnetskih varijacija vanjskog podrijetla, one najglađe,  $Sq$ , snimljene su na magnetogramima.

Za odabir mirnih, neporemećenih, dana korišten je geomagnetski indeks Dst. Kako je predložio [Campbell \(1979.\)](#), pozitivne ( $Dst_+$ ) i negativne ( $Dst_-$ ) vrijednosti razmatrane su odvojeno. Pozitivne i negativne vrijednosti Dst karakteriziraju različite faze magnetskog poremećaja, te se mogu razmatrati kao dva različita geomagnetska indeksa. Nulte vrijednosti Dst indeksa su također uzete u razmatranje u korist  $Dst_+$ . Samo individualni pregled magnetograma i njihovih pripadnih dnevnih varijacija Dst indeksa može dati općenitu ideju o najpoželjnijim razinama za konačni odabir mirnih dana. Primjer hoda vrijednosti Dst indeksa za travanj 2006. prikazan je na slici 14. Karakteristični je interval koji je najprije uzet u razmatranje  $Dst_+ \leq 1$ ,  $Dst_- \geq -20$ , kao što su predložili [Torta i sur. \(1997.\)](#).

Na ovakav način određeni broj dana odabran je uz zahtjev da su sve dnevne satne vrijednosti indeksa unutar tih granica. Račun povoljnih dana po Dst indeksu u spomenutom intervalu je dao 76 dana za koje je Dst vrijednost unutar zadanog intervala. Matlab program, koji računa pogodne dane po Dst indeksu, spremljen je pod nazivom: "[Kriterij za dane.m](#)", i nalazi se na CD-u u prilogu ovog rada.



Slika 14. Hod vrijednosti Dst indeksa za travanj 2006. gdje je svjetložutom trakom prikazan 1.travnja, a svjetlocrvenom trakom prikazan 29.travnja.

Mirni dani u 2006. kriterij  $+1 \geq Dst \geq -20$ :

- siječanj: 7., 8., 28., 29., 30.
- veljača: 3., 7., 17., 23., 25.
- ožujak: 11., 28.
- travanj: 12., 20., 25., 29.
- svibanj: 11., 13., 14., 15., 19.
- lipanj: 2., 3., 11., 12., 19., 20., 29., 30.
- srpanj: 1., 9., 13., 30.
- kolovoz: 2., 3., 10., 11., 12., 24., 25., 29.
- rujan: 3., 11., 13., 20., 21., 26., 27.
- listopad: 2., 3., 4., 5., 8., 17., 18., 23., 25.
- studeni: 1., 5., 13., 14., 15., 16., 18., 19., 20., 25., 26., 27., 28.
- prosinac: 1., 10., 11., 25., 26., 27.

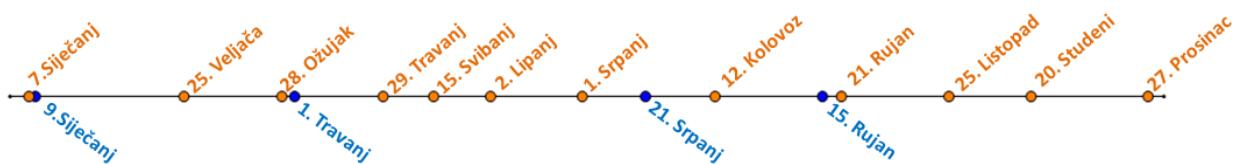
Zbog velikog broja pogodnih dana u intervalu  $Dst_+ \leq 1$ ,  $Dst_- \geq -20$  kriteriji su postroženi, te je interval smanjen na  $Dst_+ \leq 1$ ,  $Dst_- \geq -12$ . Na takav način, za 2006. dobiven je 21 dan.

Mirni dani u 2006. kriterij  $+1 \geq Dst \geq -12$ :

- siječanj: **7.**, 29., 30.
- veljača: 3., **25.**
- ožujak: **28.**
- travanj: **29.**
- svibanj: 14, **15.**
- lipanj: **2.**, 3.
- srpanj: **1.**, 9., 30.
- kolovoz: **12.**, 25.
- rujan: 3., **21.**
- listopad: **25.**
- studeni: **20.**
- prosinac: **27.**

Jače otisnuti brojevi pripadnih mjeseci su datumi koji su izabrani za konačnu analizu. Ako je u pojedinom mjesecu bio više od jedan dan koji ispunjava stroži kriterij Dst indeksa, odabran je upravo dan u kojem je Dst indeks unutar manjeg intervala. U tablici 3. s desne strane mogu se pročitati pripadne vrijednosti  $Dst_{min}$  i  $Dst_{max}$  za određene dane u mjesecu. U siječnju, dva dana ulaze u isti interval, te je zbog veće vremenske udaljenosti od veljače uzet u razmatranje 7. siječnja, umjesto 30. siječnja. U srpnju dva dana imaju jednak interval Dst indeksa po samoj duljini intervala, ali je 1. srpnja odabran jer je interval bliži pozitivnim vrijednostima Dst indeksa. Isto razmatranje je utjecalo na odabir 12. kolovoza nauštrb, 25. kolovoza.

Nakon odabira pogodnih dana, podaci s geomagnetskih opservatorija preuzeti su s INTERMAGNET mreže za postaje koje se nalaze u ekvatorijalnom području. Odabrane ekvatorijalne postaje obilježene su na slici 8 crvenom bojom. U dalje razmatranje uzete su postaje koje su najbliže geomagnetskom ekvatoru ili leže na njemu. Te postaje su redom: Huancayo, Peru (HUA); Kourou, Francuska Gvajana (KOU); Mbour, Senegal (MBO); Bangui, Srednjoafrička Republika (BNG); Adis Abeba, Etiopija (AAE); Alibag, Indija (ABG); Phu Thuy, Vijetnam (PHU). Datoteke s magnetometara koji se prikupljaju na odabranim geomagnetskim opservatorijima formatirane su prema protokolu INTERMAGNET mreže. Kao takve, za dalju ih je obradu potrebno prilagoditi i spremiti na poseban način. Svaka datoteka ima u zaglavlju informacije o opservatoriju koji nam govore o geografskoj lokaciji opservatorija, nadmorskoj visini, načinu prikupljanja podataka, intervalu digitalnog uzorkovanja, tipu intervala koji je po protokolu jednominutni srednjak, orientaciji senzora te je uključena informacija o tome jesu li podaci definitivni ili relativni. Zaglavje sadrži 26 redaka, od kojih je potreban samo posljednji u kojem su informacije o tome što se nalazi u sljedećim retcima. Zbog toga je napravljena matlab funkcija „[ReadMinB.m](#)“ koja je detaljnije objašnjena u dodatku 2. Osim odabranih 12 dana, za svaki mjesec po jedan dan na osnovi Dst indeksa, za svako godišnje doba odabran je po jedan dan koji ulazi u razmatranje na osnovi  $K_p$  indeksa. Ti dani su redom: 9. siječnja, 1. travnja, 21. srpnja i 15. rujna. Konačni je izbor dana odabranih za dalju analizu 16, od čega su 4 odabrana na osnovi  $K_p$  indeksa. Ako cijelu 2006. prikažem na brojevnom pravcu od 0 do 1, gdje svaki dan u godini dobiva pripadnu decimalnu oznaku, i ako se odabrani dani označe na pravcu, može se uočiti da odabranih 16 dana prilično dobro i ravnomjerno obuhvaća cijelu godinu (slika 15.).



Slika 15. Odabrani dani 2006. prikazani u skaliranom omjeru na brojevnom pravcu [0 , 1]. Plava boja označava dane po  $K_p$  indeksu, dok narančasta označava odabrane dane unutar Dst intervala.

Tablica 3:  $Dst_{min}$   $Dst_{max}$  predstavljaju minimalnu i maksimalnu satnu vrijednost Dst indeksa za odabrane dane u 2006. g. Dani su odabrani pomoću kriterija :  $+1 \geq Dst \geq -12$ . Odabrani dani za analizu su oni za koje je interval po Dst indeksu manji ili bliži nultim vrijednostima te su ti dani obilježeni podebljano i sa zvjezdicom.

Dan	$Dst_{min}$	$Dst_{max}$
7*	-12	1
29	-12	-2
30	-12	1
	veljača	
3	-8	1
25*	-7	1
	ožujak	
28	-9	-3
	travanj	
29	-8	0
	svibanj	
14	-10	-3
15*	-9	-1
	lipanj	
2*	-10	-1
3	-11	-1
	srpanj	
1*	-11	0
9	-11	1
30	-12	-1
	kolovoz	
12*	-10	0
25	-12	-2
	rujan	
3	-11	0
21*	-9	-2
	listopad	
25	-11	0
	studeni	
20	-6	0
	Prosinac	
27	-11	-3

Uočljivi su nepokrivenost u prvom dijelu godine i relativno veći vremenski razmak između odabralih dana u siječnju i veljači. Potkraj prve polovine godine, od travnja do lipnja, odabrani su dani u prosjeku 15 dana udaljeni jedan od drugog, dok je na razini cijele godine prosječno odabran svaki 21. dan za promatranje.

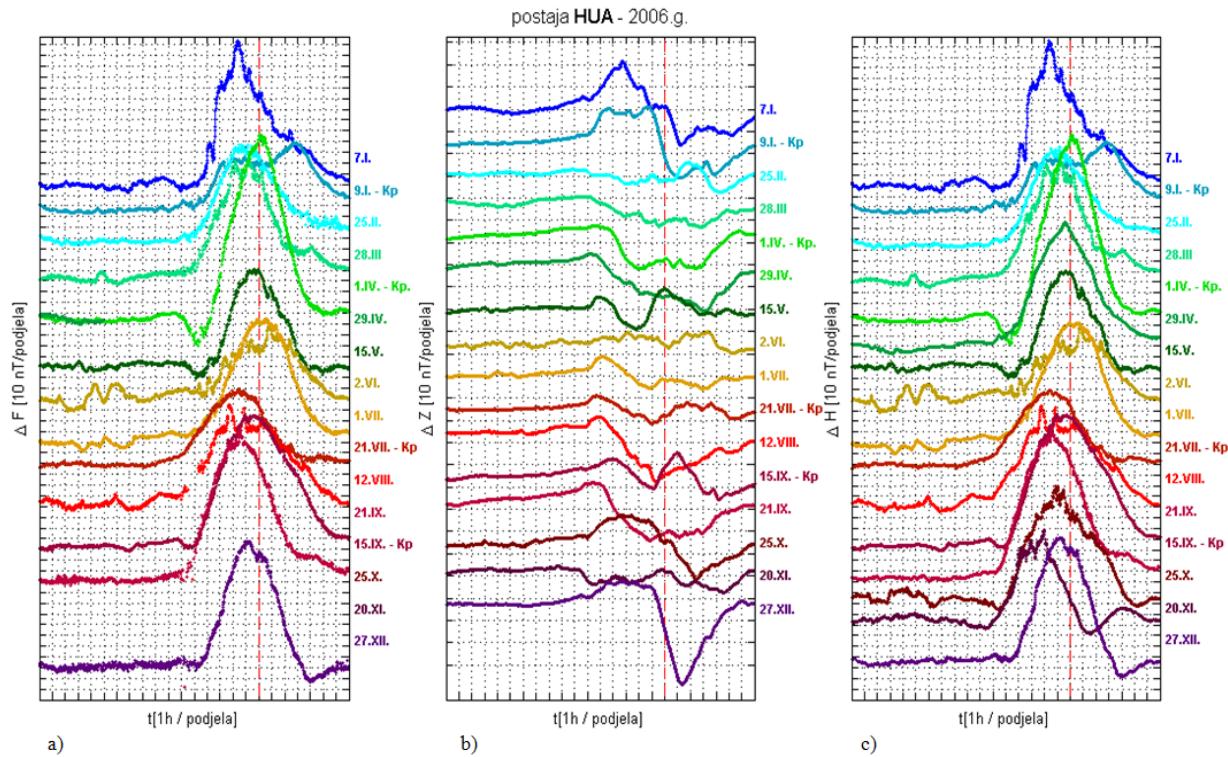
## 6.1. Dnevni hod po postajama

Nakon pripreme podataka izrađeni su grafovi dnevnih hodova po pojedinim postajama. Iz njih će se moći odrediti prikladnost pojedinih podataka te provjeriti odgovara li uistinu dnevni hod odabralih dana očekivanom hodu mirnog dana. Na grafovima koji slijede treba uzeti u obzir da su podjele na y-osi za  $H$  i  $F$  komponentu usporedive, dok za  $Z$  komponentu zbog njezinih amplituda i uočljivosti, iako je podjela 10 nT po segmentu, nešto drugačija.

Dnevni su hodovi na osnovi podataka preuzetih s INTERMAGNET službenih stranica crtani pomoću Matlab programa „[XYZ–kroz\\_godinu-sve-stacked.m](#)“, koji je objašnjen podrobnije u dodatku 2 te se može naći na priloženom CD-u. Svi grafovi su centrirani, što znači da je od stvarnih vrijednosti oduzet srednjak, kako bi ti podaci bili lakše usporedivi.

Radi preglednijeg prikaza varijacija, godina 2006. je podijeljena u četiri dijela sukladno s godišnjim dobima. Zimski su mjeseci prikazani nijansama plavih boja, proljetni nijansama zelenih boja, ljetni crvenih, a jesenski ljubičastima. Dani su na grafovima koji slijede (slike 16.1. – 16.7.) poredani kronološki i na svakom grafu nacrtani od gore prema dolje. Crvena isprekidana crta prikazuje lokalno vrijeme podneva radi lakše orientacije, jer je svaki dan crtan naspram UTC vremenskog niza. Stoga su na vremenskoj osi podjele učinjene na svaki sat i predstavljaju promjene tijekom jednog promatranog dana.

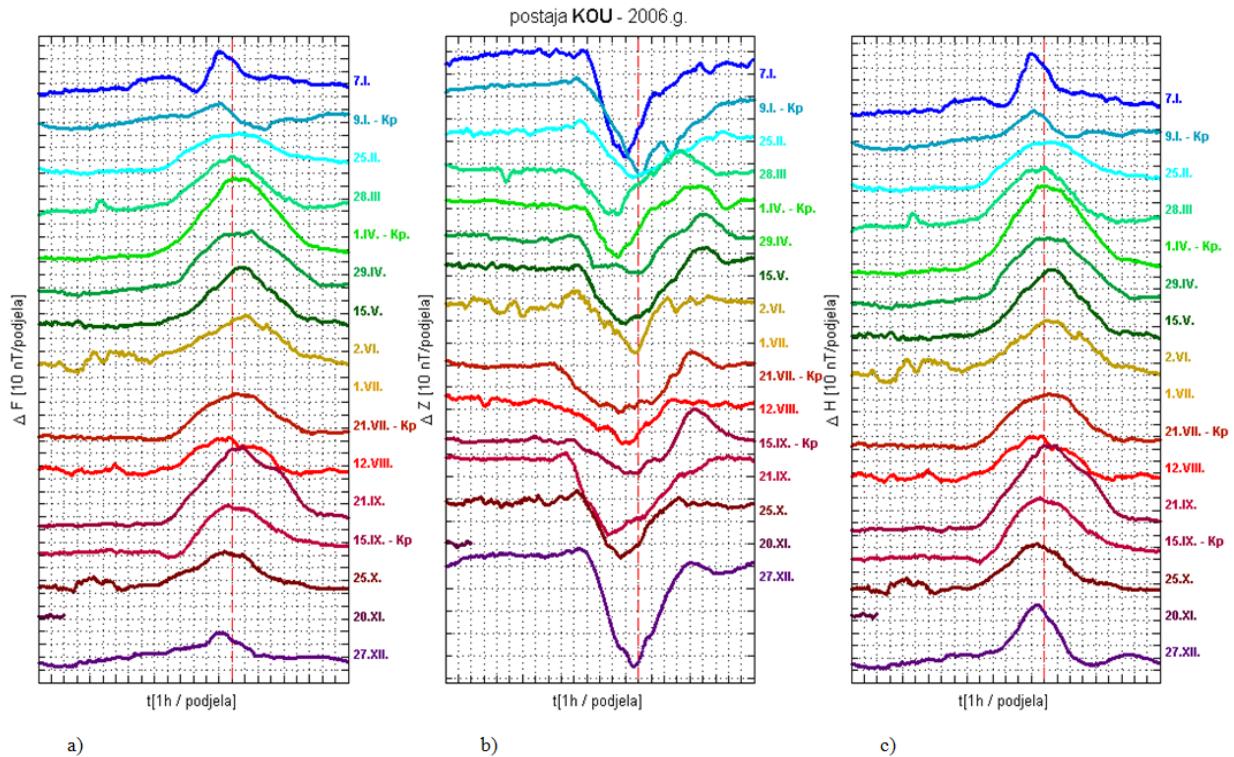
## Huancayo (HUA), Peru



Slika 16.1. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji **HUA**. Slika prikazuje stekirajuće centrirane razlike odabranih 16 mirnih dana u 2006. Prikazana je  $\Delta F$  komponenta a),  $\Delta Z$  komponenta b) te  $\Delta H$  komponenta c), gdje  $\Delta$  predstavlja centrirane razlike, tj. dnevni hod od kojeg je oduzet srednjak promatranog dana.

Za postaju HUA u  $F$  komponenti (Slika 16.1. a) grafički prikaz otkriva nedostatak podataka za rujan, koji je ušao u razmatranje zahvaljujući  $Kp$  indeksu, i listopad. Za kolovoz se mogu uočiti određene anomalno malene vrijednosti koje se pojavljuju oko 11 h UTC koje će biti potrebno kasnije ručno ukloniti iz podataka. Također se vidi kako dnevni hod za 9. siječnja nema reprezentativan uzorak jer se maksimum pojavljuje oko 20 h UTC, što nije očekivano. Za 29. travnja podaci su, iako je to malo teže primijetiti, nepotpuni te niz prestaje oko 05 h UTC. Prikaz dnevnih varijacija  $H$  komponente (slika 16.1. c) pokazuje kako 9. siječnja i 2. lipnja nemaju očekivani hod mirnog dana. Za 9. siječnja vrijeme nastupa maksimuma je pomaknuto, kao i za  $H$  komponentu pa nastupa oko 20 h UTC, te zbog toga na taj dan treba posebnu pozornost obratiti pri izračunu odgovarajuće struje koja bi to polje mogla uzrokovati. Za centrirane vrijednosti  $Z$  komponente (Slika 16.1. b) na gornjem grafu može se reći kako 25. veljače, 15. svibnja, 2. lipnja, 21. srpnja, 15 rujna i 20. studenoga ne ispunjavaju očekivani dnevni hod mirnog dana. Podnevna vrijednost  $Z$  komponente bliska je nultoj vrijednosti, što je i očekivano jer se postaja HUA nalazi na geomagnetskom ekvatoru (slika 8). Podnevni se iznosi  $Z$  komponente povećavaju kako se odmičemo južnije od ekvatora, odnosno smanjuju kako se točka mjerjenja pomiče sjevernije od ekvatora.

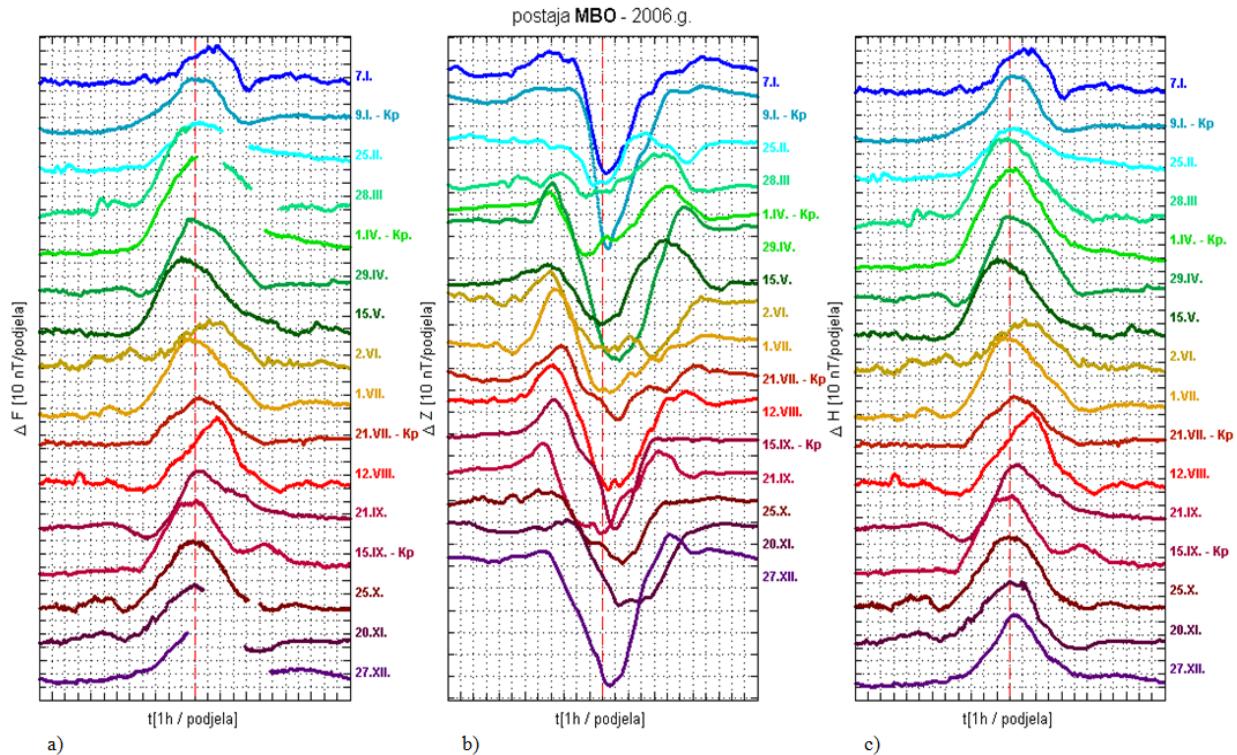
## Korou (KOU), Francuska Gvajana



Slika 16.2. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji **KOU**. Ostale karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabranih dana kao na slici 16.1.

Postaja KOU (Slika 16.2. a) za 1. srpnja 2006. nema podataka, a podaci su nepotpuni i za 20. studenoga te mjereni niz prestaje oko 02 h UTC. Zbog toga ti dani ne mogu biti promatrani u daljoj analizi, jer neće dati realnu sliku. Također se vidi kako su svi odabrani danu u siječnju, konkretno 7. i 9. siječnja, od kojih je ovaj potonji ušao u analizu na osnovi  $K_p$  indeksa, nezadovoljavajućeg oblika dnevnog hoda. Podaci za 7. siječnja, iako su potpuni te je jednostavno uočljiv maksimum ipak netom prije 11 h UTC, imaju nenadani skok u amplitudi te ne predstavljaju očekivani hod mirnog dana. Za 9. siječnja također je uočljiv nagli pad u amplitudi nakon 11 h UTC te se ne može jednoznačno odrediti je li vrijeme nastupa maksimuma kao što je zabilježeno na opservatoriju, ili je zbog nekakvog poremećaja vrijednost  $F$  komponente naglo pala. Na kraju za postaju KOU će dalje gledati samo 14 dana od prvobitno odabralih 16. Komponenta  $Z$  na grafu (16.2.b) centriranih razlika otkriva nedostupnost podataka za 1. srpnja i 20. studenoga te zbog toga ti dani ne mogu biti analizirani. Isti će dani zbog nedostatka podataka biti izbačeni iz analize za  $H$  komponentu, jer se može primijetiti na slici 16.2. c) kako nedostaju mjerena i za tu komponentu. Vrijeme nastupa maksimalne vrijednosti  $H$  komponente može se odčitati za sve dane, osim spomenutih, te njihovi maksimumi nastupaju  $\pm 1$  h od podneva. S početkom godine, u zimu, maksimumi nastupaju ranije, da bi se tijekom proljetnih i ljetnih dana pomaknuli na kasnije od podneva te u jesen, potkraj godine, ponovno pojavili prije lokalnog podneva.

## Mbour (MBO), Senegal

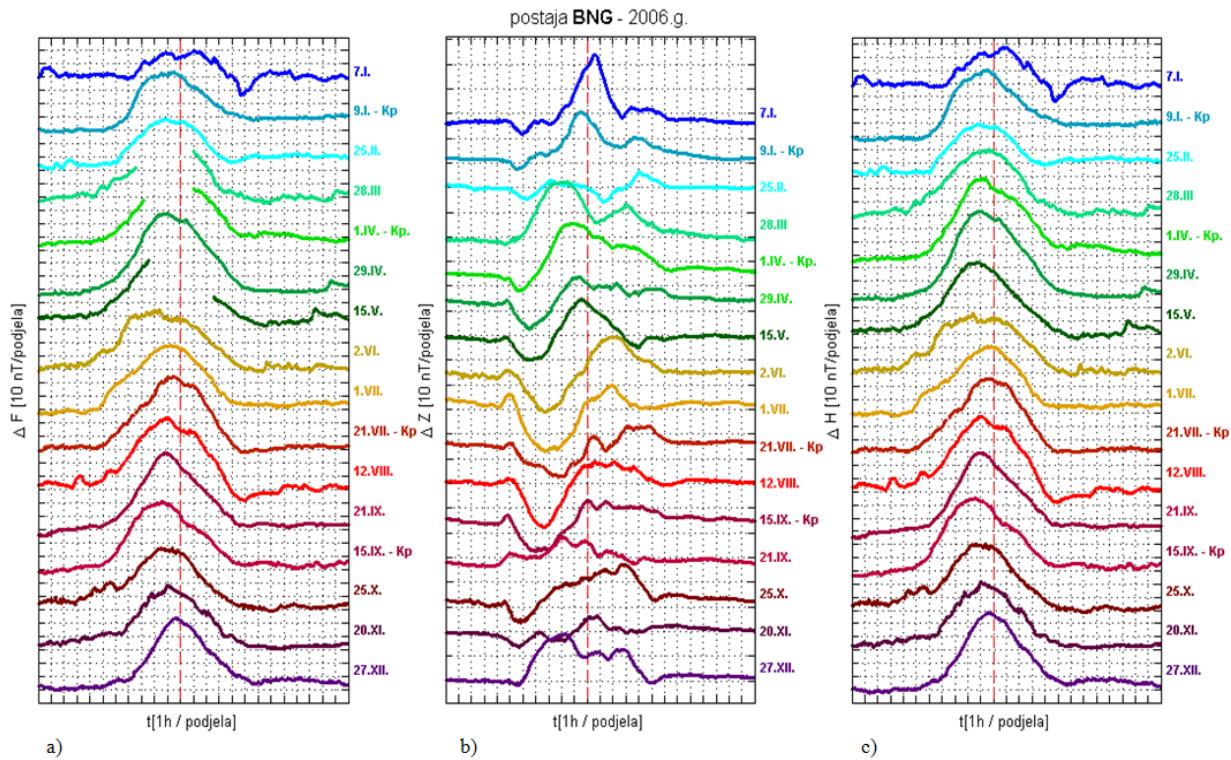


Slika 16.3. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji **MBO**. Ostale su karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabralih dana kao na slici 16.1.

Slika 16.3. a) pokazuje dnevne hodove centriranih razlika za  $F$  komponentu odabralih dana za 2006. Podaci za 28. ožujka, 1. travnja i 27. prosinca su nepotpuni i to u ključnim dijelovima dana, te se iz njih ne mogu odčitati nastupi maksimalnih vrijednosti. Kako je za potrebe analize dovoljno odčitati nastup maksimuma  $H$  komponente, iz slike 16.3.c) može se vidjeti kako ti dani mogu biti dalje razmatrani. Dnevni su podaci za 20. studenoga također nepotpuni, ali iz njih se može odčitati vrijeme nastupa maksimalne vrijednosti kao i dnevna amplituda pa zbog toga i taj dan ostaje u daljem razmatranju. Dan 2. lipnja u  $H$  komponenti, kao što se vidi na slici 16.3.c), odudara po hodu s amplitudom, no svejedno ispunjava očekivani dnevni hod te ima potpuni niz mjerena.

Na centriranim vrijednostima  $Z$  komponente slika 16.3. b) može se uočiti kako 28. ožujka nema prikladan dnevni hod za miran dan, te minimalna vrijednost ne može biti jednoznačno odčitana. Budući da će se odčitavati iznos  $Z$  komponente u trenutku nastupa maksimuma  $H$  komponente, taj dan također može ući u dalju analizu, jer je tu vrijednost  $H$  komponente moguće odrediti.

## Bangui (BNG), Srednjoafrička Republika

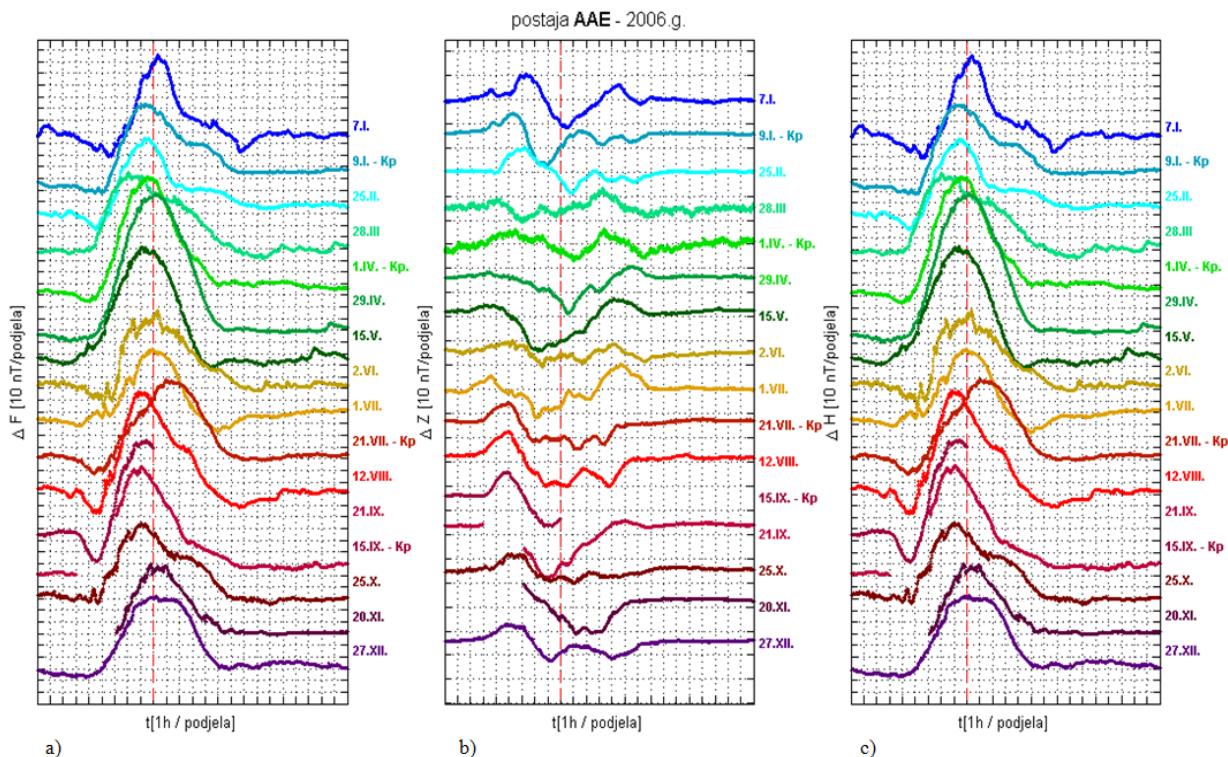


Slika 16.4. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji BNG. Ostale su karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabranih dana kao na slici 16.1.

Komponenta  $F$  (Slika 16.4. a), kao i  $H$  komponenta (Slika 16.4. c) na postaji BNG, tijekom cijele godine za sve odabrane dane ima izrazito karakteristične dnevne hodove; 7. siječnja, doduše, ima malo manju amplitudu te malene fluktuacije od očekivanog hoda. Nezgodno je također što 28. ožujka, 1. travnja te 15. svibnja nemaju potpuni niz mjerena  $F$  komponente na opservatoriju te se iz njih ne može pročitati nastupanje maksimalne vrijednosti. Ipak se na prikazu hoda  $H$  komponente vidi karakteristični hod pa činjenica da  $F$  komponenta nema jasne nastupe maksimuma ne smeta toliko.

Komponenta  $H$ , osim spomenutog 7. siječnja, za sve odabrane dane pokazuje vrlo lijep primjer dnevnog hoda geomagnetski mirnih dana.  $Z$  komponenta (slika 16.4.b) 25. veljače, 21. rujna i 20. studenoga ne pokazuje prikladne hodove karakteristične za miran dan, te su fluktuacije polja koncentrirane oko srednje vrijednosti. Može se uočiti iz dnevnih hodova  $Z$  komponente da se opservatorij Bangui nalazi južno od geomagnetskog ekvatora, po tome što u vrijeme lokalnog podneva ne nastupa minimum u  $Z$  komponenti kao i u svim ostalim odabranim postajama. Može se primijetiti kako hod  $Z$  komponente ima uzlaznu putanju ili se nalazi u pozitivnijim iznosima u odnosu na noćne vrijednosti. BNG postaja ima iznimno zanimljivu lokaciju, istodobno je sjevernije od dipolnog ekvatora i južnije od geomagnetskog dip ekvatora (slika 8.), te je nakon postaje HUA najbliže dipolnom ekvatoru.

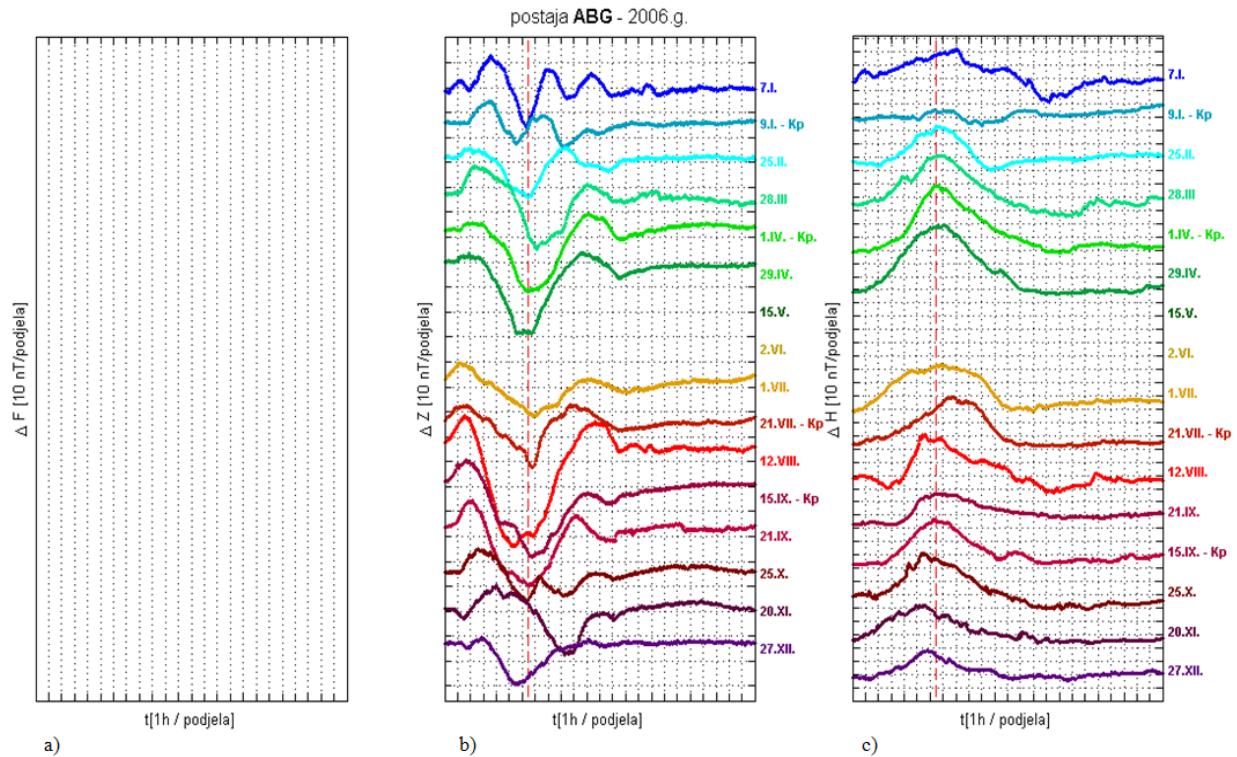
## Addis Abeba (AAE), Etiopija



Slika 16.5. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji AAE. Ostale su karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabralih dana kao na slici 16.1.

Može se primijetiti na slici 16.5.a) i c) kako su podaci za 15. i 21. rujna kao i za 20. studenoga nepotpuni, no iz njih se svejedno može odčitati vrijeme nastupa maksimuma te će zbog toga postaja AAE imati svih 16 dana za komponente  $F$  i  $H$  u daljoj analizi.  $Z$  komponenta, s druge strane, ne zadovoljava za dane 28. ožujka i 1. travnja, iako su za te dane vrijednosti Dst indeksa bile povoljne, da bi ušli u razmatranje mirnih dana. Ipak, vizualnom je analizom iz slike 16.5. b) vidljivo da i nisu reprezentativan uzorak za mirni dan. Mjerenja  $Z$  komponente pokazuju nagle promjene na 20-minutnoj skali. Radi smanjivanja efekata kratkoperiodičkih fluktuacija, uobičajeno je dodatno filtrirati podatke kroz niskopropusni filter uz pomoć izračuna satnih srednjaka. U ovom radu odčitavat će se isključivo vrijednost  $X$  i  $Z$  komponente za vrijeme nastupa maksimuma horizontalne komponente, a dnevna promjena EEJ bit će izračunata preko modela koji su predložili **Doumouya i sur., (2003.)** (jednadžba 72). Zbog toga nije nužno filtrirati podatke. Iz istog se grafa vidi da mjerenja 2. lipnja i 1. srpnja imaju također neadekvatan dnevni hod. Stoga ću kasnije detaljnije pratiti što se događa i vidjeti ponašanje nakon eliminacije glavnog polja i SQ korekcije. S druge strane, na 20. studenoga će biti potrebno dodatno obratiti pozornost pri eliminiranju noćnih vrijednosti jer na taj dan nedostaju jutarnji podatci do nešto iza 06 h UTC. Noćna je vrijednost krajem tog dana prilično konstantna, tako da neće biti učinjena prevelika greška ako se taj iznos u kasnijoj analizi eliminira.

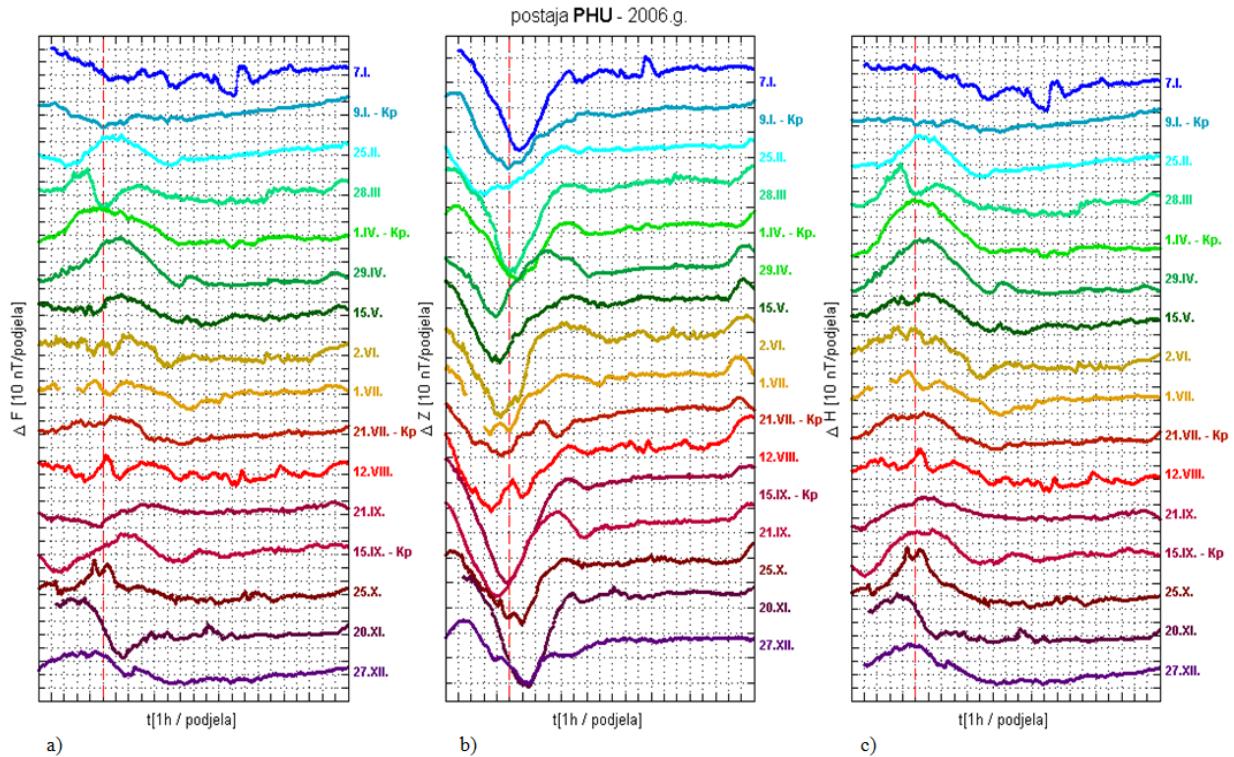
## Alibag (ABG), Indija



Slika 16.6. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji ABG. Ostale su karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabralih dana kao na slici 16.1.

Alibag postaja u Indiji zbog meni nepoznatog razloga, kojem je najvjerojatnije uzrok kvar na opservatoriju, nema uopće podatke za  $F$  komponentu. Budući da  $F$  komponenta služi kao kontrolna komponenta za razmatranje, te se ona može jednostavno izračunati iz mjerene  $X$ ,  $Y$  i  $Z$  komponente, za koje postoje mjerjenja na ABG postaji, njen nedostatak neće previše utjecati na konačan rezultat. Unatoč tome, iz slike 16.6.b) i 16.6.c) može se vidjeti kako podaci za siječanj promatrane godine ne odgovaraju, jer su u  $Z$  komponenti (slika 16.6.b) hodovi izuzetno nepravilnog oblika. Minimum za 7. siječnja nastupa u vrijeme lokalnog podneva, no za taj isti dan  $H$  komponenta nema maksimum u usporedivo vrijeme. Stoga će za sve odabrane dane u siječnju, prilikom izračuna parametara modela EEJ, o čemu ću pisati kasnije puno detaljnije, trebati kao vrijeme odčitanja komponenata  $Z$  i  $X$  uzeti vrijeme nastupa lokalnog podneva umjesto vremena nastupa maksimuma  $H$  komponente. Posebno za 9. siječnja koji je ušao u razmatranje zahvaljujući  $Kp$  indeksu, jer je njegov maksimum pri samom kraju promatranog dana, što je u potpunosti pogrešno. Takoder se iz slike 16.6. može vidjeti kako za 15. svibnja i 2. lipnja ne postoje mjerena s opservatorija, te se ti dani ne mogu razmatrati u potpunosti. Pri izračunu iznosa gustoće EEJ u kasnijim poglavljima postoji opcija kako se vrijednosti EEJ za taj dan uopće ne računaju, ili se s obzirom na vrijednosti parametara iz ostalih postaja napravi interpolacija. Budući da ABG nije najistočnija postaja, nego je to opservatorij u Vijetnamu, interpolacija može biti učinjena.

## Phu Thuy (PHU), Vijetnam



Slika 16.7. Dnevni hod jednominutnih vrijednosti na postaji PHU. Ostale su karakteristike grafičkog prikaza centriranih razlika odabralih dana kao na slici 16.1.

Najistočnija postaja u ovom razmatranju PHU ima nepravilne dnevne hodove za dane koji su ispunili kriterij Dst i  $K_p$  kao mirni. Budući da je noćna vrijednost, s obzirom na UTC vrijeme, početkom dana preblizu lokalnom podnevnu, za eliminaciju noćnih vrijednosti koristit će se četverosatni srednjak počevši od 20 h do 24 h UTC. Radi očitanja vrijednosti  $Z$  i  $X$  komponente svi odabrani dani u siječnju promatrane godine bit će odčitavani za lokalnog podneva. Razlog je toga u činjenici kako 7. siječnja mjerena pokazuju da se maksimum  $H$  komponente pojavljuje u ranim jutarnjim satima po UTC vremenu, dok se za 9. siječnja, slično kao i na postaji ABG potkraj promatranog dana naspram UTC vremena. Osim tih dana, može se očekivati kako će 28. ožujka i 25. listopada nastupiti određena pogreška prilikom odčitanja vremena nastupa maksimuma horizontalne komponente. Prvog spomenutog dana vidljiv je nagli pad, nešto više od 1 h prije lokalnog podneva, te je opravdano prepostaviti kako maksimum ne nastupa u to doba, što mjerena pokazuju. Slično vrijedi i za dan u listopadu, kada su uočljiva dva odvojena maksimuma, koje niskopropusni filter ne može eliminirati. Zbog toga će u te dane vrijednosti  $X$  komponente biti odčitane u trenutku nastupa minimuma vertikalne  $Z$  komponente. Time se sprečava nedostatak podataka pri izračunu gustoće EEJ, a može se primjetiti sa slike 16.7.b) kako minimumi vertikalne komponente 28. ožujka i 25. listopada mogu biti jednoznačno odčitani. Kako je postaja PHU najistočnija u mreži promatralih opservatorija za izračun EEJ, potrebno ju je maksimalno koristiti.

Na svim se prikazima dnevnih varijacija komponenata magnetskog polja primjećuje promjena vremena nastupa maksimuma horizontalne komponente ovisno o godišnjem dobu. U pravilu početkom godine maksimum nastupa ranije, pa se tijekom sredine godine pojavljuje kasnije, a prema kraju godine vrijeme nastupa maksimuma se pomiče ponovno ranije. Kako ta pojava nije vezana isključivo za obasjanost Suncem i godišnje doba, nego ovisi i o trenutačnoj vodljivosti atmosfere, očekivano je da postoje i odstupanja koja su vidljiva na nekim od prikazanih hodova.

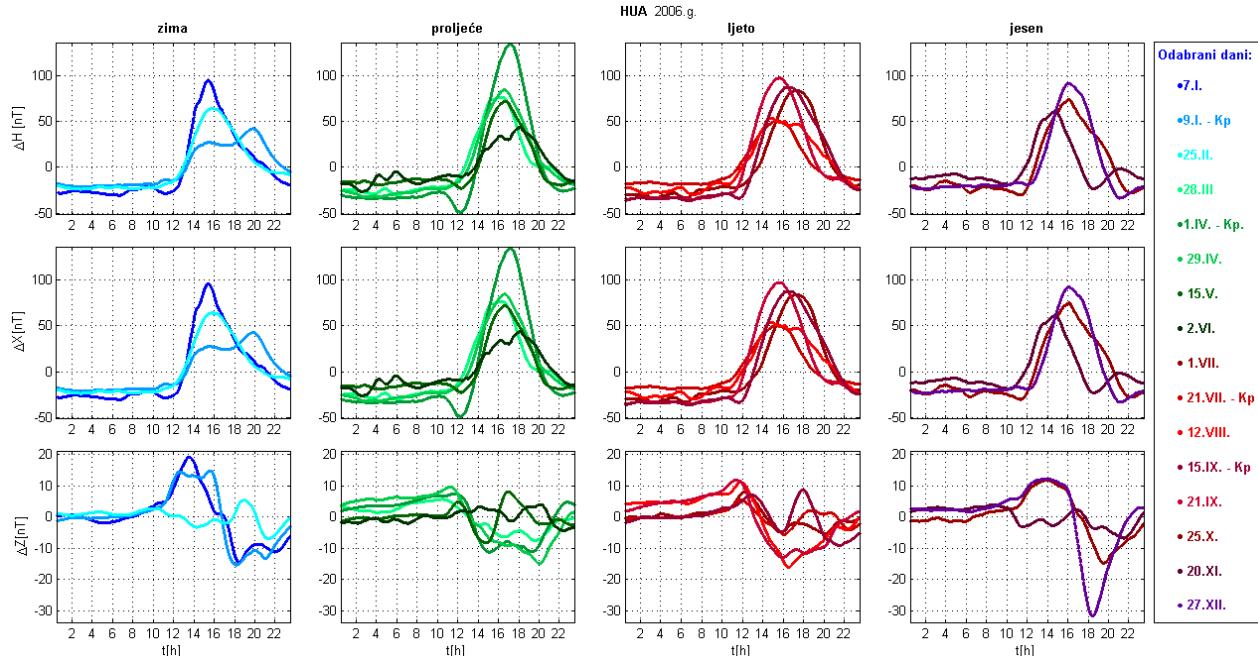
Bez obzira na Dst i  $K_p$  indeks, tek na osnovi nacrtanih dnevnih hodova mogu se uočiti hodovi koji zapravo ne odgovaraju mirnom danu ili u sebi sadrže određene nedostatke zbog kojih ti dani mogu biti dodatno izbačeni iz razmatranja. Potencijalni bi razlozi dodatnog izbacivanja nekog dana iz razmatranja mogli biti nekontinuirani hod podataka, nagle perturbacije i iznenadni skokovi magnetskih komponenti, neočekivano niske amplitude i sl. Izbor mirnog dana isključivo na osnovi indeksa geomagnetske aktivnosti daje 16 zadovoljavajućih dana. U tablici 4 može se vizualno predočiti po postajama koji bi dani zadovoljili i dodatnu vizualnu analizu te se može primijetiti odstupanje od zadovoljavajućeg kriterija prema određenim komponentama, koje se uočava preko neobojenih kvadratića. Dani čije polje nije obojano ili nisu imali podatke ili su podaci bili nepotpuni ili njihov dnevni hod nije bio reprezentativan predstavnik mirnog dana.

	HUA	KOU	MBO	BNG	AAE	ABG	PHU
1	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
$1_{K_p}$	R	R	R	R	R	R	R
2	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
3	R	R	R	R	R	R	R
4	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
$4_{K_p}$	R	R	R	R	R	R	R
5	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
6	R	R	R	R	R	R	R
7	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
$7_{K_p}$	R	R	R	R	R	R	R
8	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
9	R	R	R	R	R	R	R
$9_{K_p}$	R	R	R	R	R	R	R
10	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
11	R	R	R	R	R	R	R
12	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y
	Z H F	Z H F	Z H F	Z H F	Z H F	Z H F	Z H F

Tablica 4. Retci predstavljaju odabrane dane po Dst indeksu, dok su četiri dodatna dana po  $K_p$  indeksu označena pripadajućom oznakom, s time da je označen samo redni broj mjeseca. Crvena, žuta i zelena boja predstavljaju informaciju ako za pojedini dan Z, H i F komponenta vizualno zadovoljavaju očekivani dnevni hod.

Kako je informacija o hodu Z i H komponente dovoljna, dok F komponenta nije nužna, uz ispunjavanje jednog od Dst ili  $K_p$  indeksa, mirnim se danima uz vizualnu analizu mogu u potpunosti proglašiti 29. travnja, 12. kolovoza i 27. prosinca. Na takav se način od prvobitno odabranih 16 dana taj broj svodi na 3. Za te dane, na svih sedam ekvatorijalnih postaja postoje kvalitetni podatci na osnovi kojih se može odrediti EEJ profil. Na grafovima koji slijede prikazani su satni srednjaci koji uklanjaju kratkotrajne pulsacije te je dnevni hod bez njih glađi. Dani su podijeljeni u skupine od četiri godišnja doba, te su u skladu s bojama određenih godišnjih doba prikazani drugačijim nijansama, kao što je napomenuto ranije. Sve je prikazano naspram UTC vremenskog niza. Stoga su na vremenskoj osi podjele učinjene na svaka dva sata i predstavljaju promjene kroz jedan promatrani dan.

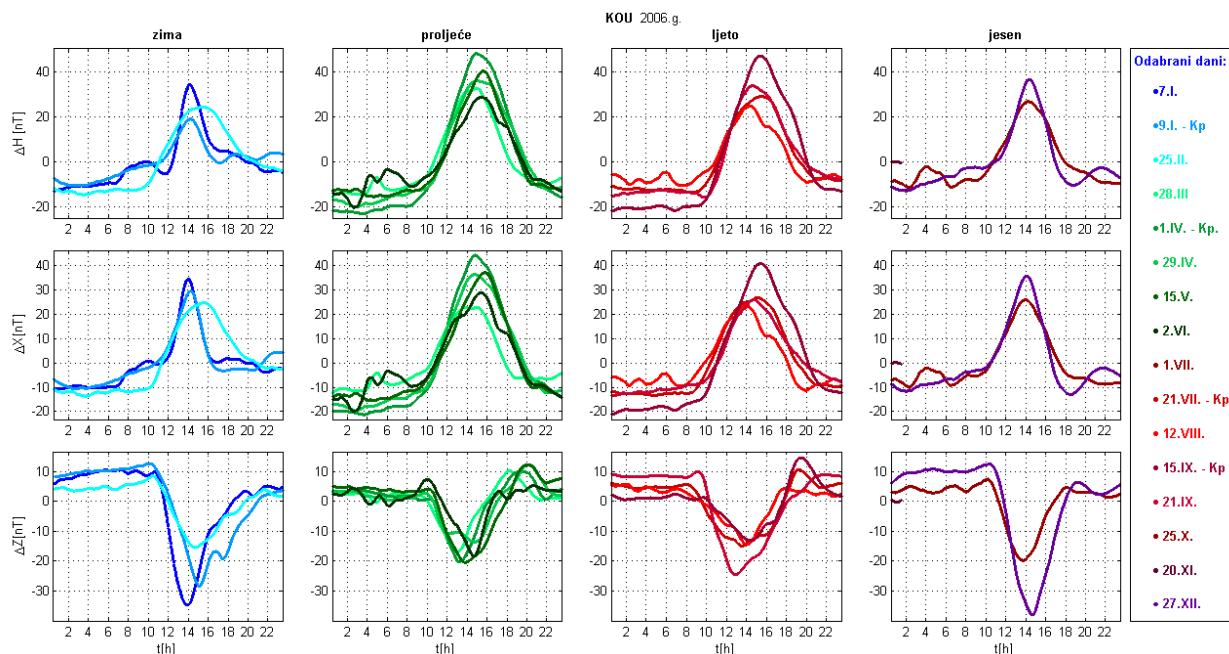
HUA	Latituda $\delta$ [ $^{\circ}$ ]	Longitude $\theta$ [ $^{\circ}$ ]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Huancayo, Peru	-12,05	284,67	-5	3 313



Slika 17.1. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji HUA. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Prikazani su u retcima:  $\Delta H$ ,  $\Delta Z$ . i  $\Delta X$ , gdje  $\Delta$  predstavlja centrirane razlike.

**HUA:** Posebnu pozornost treba obratiti na podjele skale, pogotovo Z komponente. Kako su amplitude  $H$  i  $X$  komponente usporedive, one su i prikazane s istim podjelama na ordinati, dok je  $Z$  komponenta, koja ima manje amplitude, prikazana s manjom podjelom na ordinati. Za sve sljedeće prikaze satnih srednjaka vrijedi isto. Maksimalna se amplituda  $\Delta H$  i  $\Delta X$  komponente uočava za 1. travnja, koji je zahvaljujući zadovoljavajućem  $Kp$  indeksu ušao u razmatranje. Treba napomenuti kako je 17 h UTC zapravo lokalno podne. Relativno velike razlike između maksimalne i minimalne amplitute mogu se razumjeti ako primijetimo da je postaja Huancayo na nadmorskoj visini većoj od 3 300 m. Može se primijetiti odstupanje nastupa maksimuma  $\Delta H$  i  $\Delta X$  komponente za 9. siječnja na 20 h UTC, dok se očekuje pojava maksimuma  $\pm 2$  h od lokalnog podneva. Također na taj dan vertikalna komponenta  $\Delta Z$  pokazuje prilično ravnomjeran hod oko srednje vrijednosti bez jasno izraženog maksimuma ili minimuma. Minimalna vrijednost  $\Delta H$  i  $\Delta X$  ne prelazi ispod  $-50$  nT, dok je maksimum za sve dane, osim spomenutog 1. travnja, ispod  $100$  nT. Odabrani dan u kolovozu u svom originalnom mjerenu nizu ima nekoliko ekstremno niskih vrijednosti, koje su se usrednjavanjem izgubile te njihov utjecaj nije značajan. Prepostavljam kako su te pogreške nastale pri arhiviranju podataka na opservatoriju u Peruu. Ako se izuzme 1. travnja, može se primijetiti lagani pad u amplitudi od početka godine do lipnja. Maksimumi u zimi  $H$  komponente su između 14 i 16 h UTC dok za proljeće, ljeto, osim 21. rujna, nastupaju između 16 i 18 h UT. Može se također primijetiti da maksimum u jesen nastupa u istim vremenskim okvirima kao i zimi.

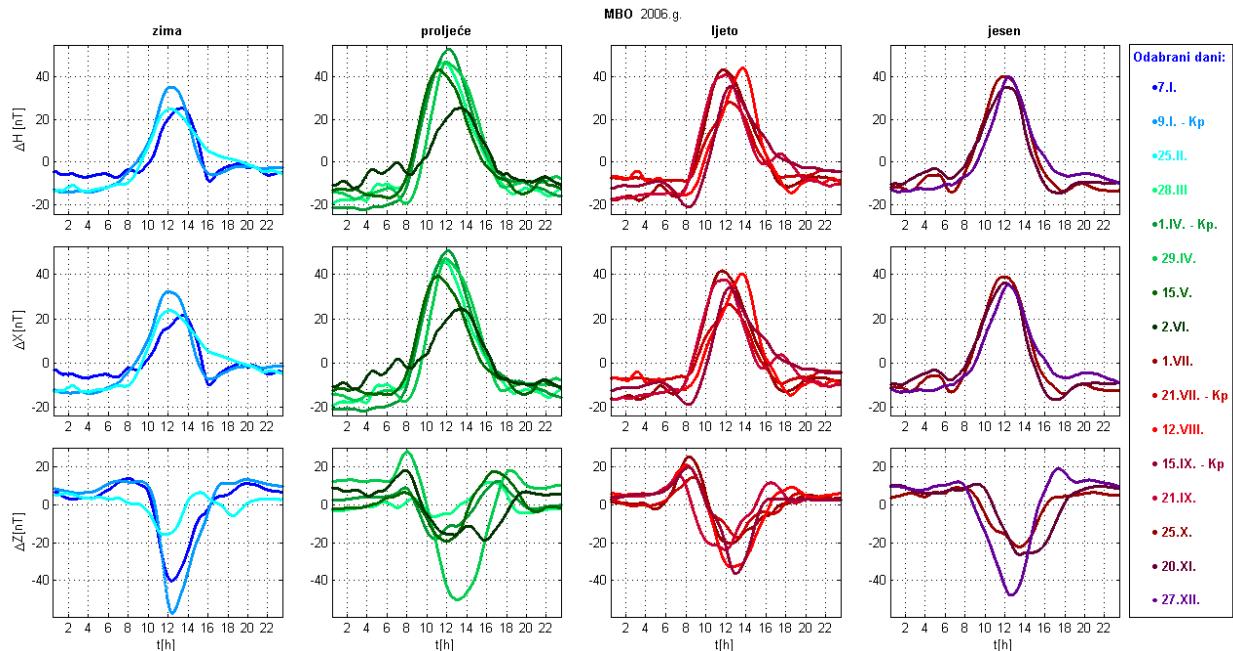
KOU	Latituda $\delta$ [ $^{\circ}$ ]	Longituda $\theta$ [ $^{\circ}$ ]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Korou, Francuska Gvajana	5,21	307,269	-3	10



Slika 17.2. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji **KOU**. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**KOU:** Na grafovima se ne mogu vidjeti 1. srpnja i 10. studenoga jer za te dane nema mjerena. Amplitude su u proljeće i ljeto veće nego u zimu ili jesen. Maksimumi tijekom proljeća i ljeta nastupaju oko lokalnog podneva, što je 15 h UTC, dok je u jesen i zimu jedva vidljiv pomak nastupa maksimuma nešto prije lokalnog podneva. Treba primjetiti da su amplitude, iako izražene, svejedno manje od amplituda istih komponenti na postaji Huancayo u Peruu. To se može objasniti time što je postaja HUA u Peruu na nadmorskoj visini od 3 313 m dok se postaja KOU – Korou, u Francuskoj Gvineji, nalazi na nadmorskoj visini od 10 m. Dnevni hodovi prikazuju očekivane hodove mirnog dana. Za nastupa maksimuma  $\Delta H$  i  $\Delta X$  komponente, nastupa minimum u vertikalnoj komponenti. Budući da je postaja KOU sjevernije od geomagnetskog dip i dipolnog ekvatora, takva je pojava i očekivana. Može se primjetiti da se minimum  $\Delta Z$  pretežno pojavljuje u istim vremenskim okvirima kao i maksimum horizontalne komponente, no općenito govoreći u proljetnim i ljetnim mjesecima taj minimum nastupa nešto ranije od maksimuma u  $\Delta H$ , u neke dane ranije i do 1 h.

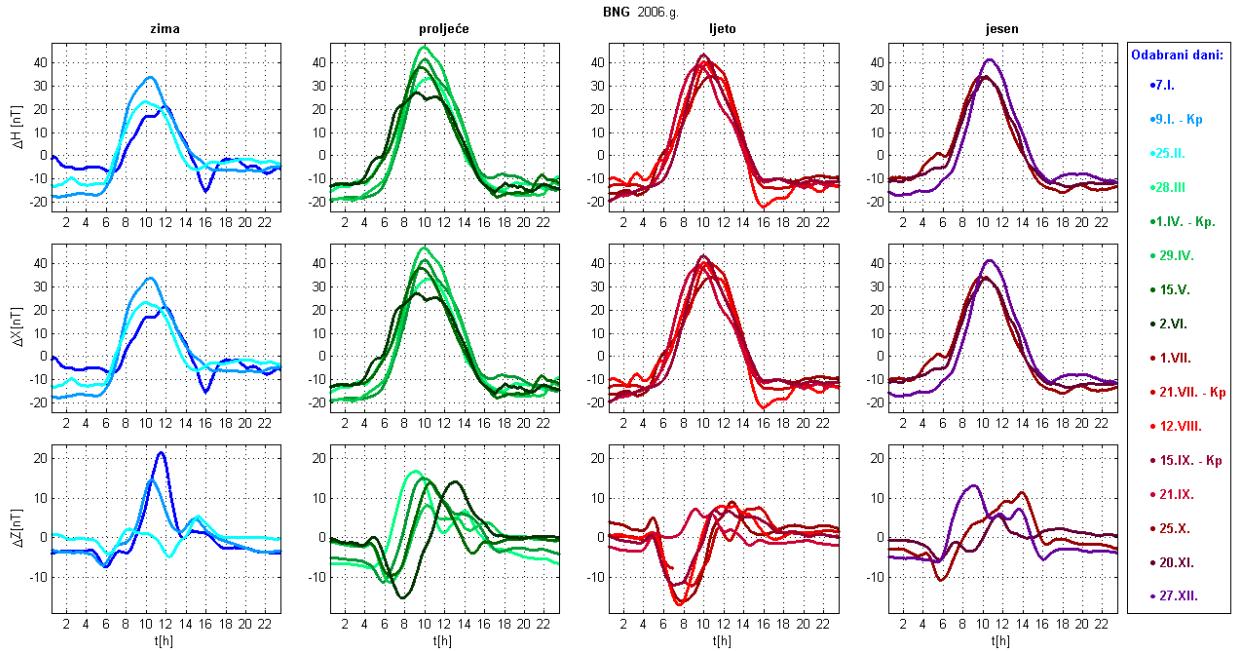
MBO	Latituda $\delta$ [°]	Longituda $\theta$ [°]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Mbour, Senegal	14,384	343,033	+0	7



Slika 17.3. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji MBO. Slika prikazuje centrirane razlike odabranih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**MBO:** Budući da se opservatorij u Senegalu nalazi na mjestu gdje je pomak od UTC vremena nula, promatranjem ovih grafova zapravo gledamo dnevni hod u ovisnosti o lokalnom vremenu. Na grafu možemo vidjeti lijepa preklapanja dnevnih hodova kroz cijelu godinu. Dana 2. lipnja u  $\Delta H$  i  $\Delta X$  pokazuje manju vrijednost maksimuma te se može vidjeti kako početak tog dana ima određene perturbacije u polju. Amplitude su u proljeće najveće, nešto manje u ljeto te padaju još više kroz jesen da bi u zimu bile najniže, što je posebno vidljivo u  $H$  i  $X$  komponenti. Amplitudne su razlike najmanje u zimskom dijelu godine, dok su nastupi maksimalnih vrijednosti unutar dva sata oko lokalnog podneva. Podrobnjim gledanjem hoda  $\Delta H$  tijekom ljeta, može se primijetiti da 1. srpnja i 21. rujna maksimalna vrijednost nastupa prije lokalnog podneva dok za sve odabранe dane, osim ta dva, maksimum nastupa nakon lokalnog podneva. Maksimum najkasnije nastupa u odabrani mirni dan kolovoza, gdje je otprilike oko 14 h. Razlog je velikog podudaranja  $H$  i  $X$  komponente, na ovom opservatoriju, kao i na svim ostalima, to što je vertikalna  $Z$  komponenta po apsolutnim vrijednostima 10 redova veličine manja. Razlike u amplitudama između  $\Delta H$  i  $\Delta X$ , od dana do dana, kreću se u rasponu do 10 nT. Iz priloženih se hodova može najlakše uočiti ta razlika ako se pogleda karakteristični hod za 12. kolovoza. Maksimalna vrijednost  $\Delta H$  ne prelazi 55 nT te je taj maksimum ostvaren u proljeće, konkretnije 1. travnja, kada se također ostvaruje i minimalna vrijednost svih promatranih dana, koja ne ide ispod -23 nT. Također se po hodu vertikalne komponente može primijetiti kako je postaja MBO sjevernije i od geomagnetskog dip ekvatora i istodobno od dipolnog ekvatora (slika 8), što znači da kada horizontalna komponenta dostiže maksimum, vertikalna komponenta dostiže minimalne vrijednosti.

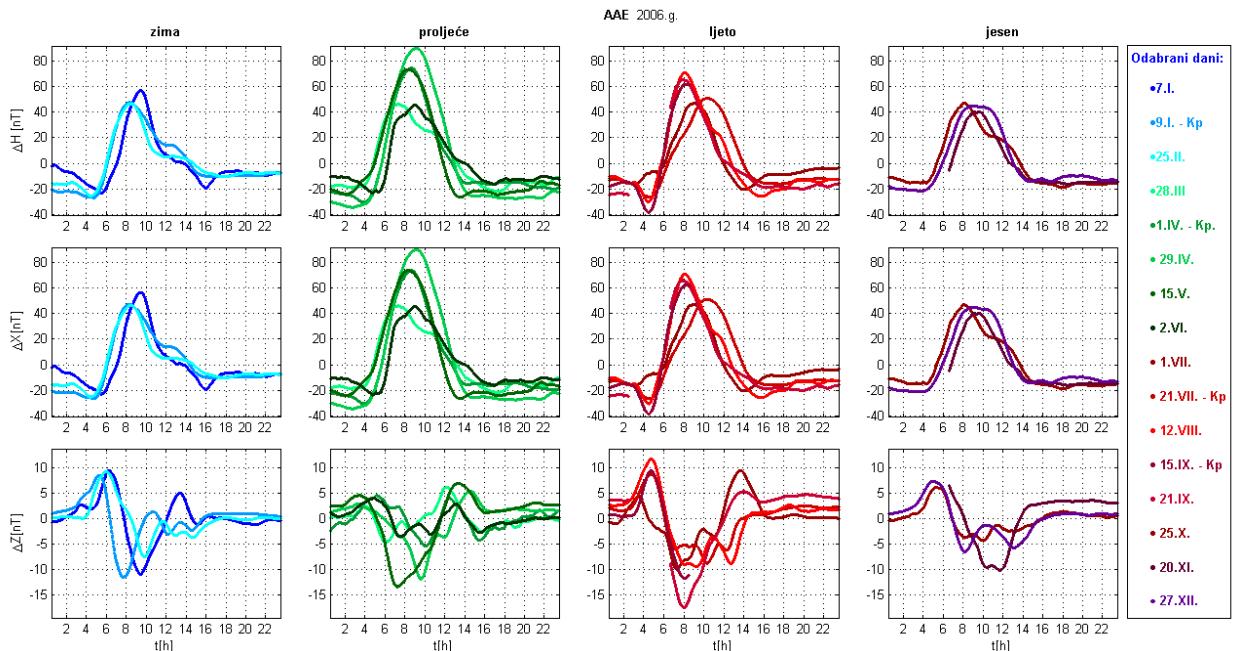
BNG	Latituda $\delta$ [ $^{\circ}$ ]	Longituda $\theta$ [ $^{\circ}$ ]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Bangui, Srednjoafrička Republika	4,333	18,566	+1	395



Slika 17.4. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji **BNG**. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**BNG:** Vidljivo je da su amplitudne razlike u ljetnim mjesecima najveće, a iste te razlike u zimskim mjesecima najmanje. Maksimumi  $\Delta H$  i  $\Delta X$  nastupaju u grubo između 09 i 11 h UTC, što je s obzirom na pomak od +1 naspram UTC vremena zapravo 10 i 12 h po lokalnom vremenu, osim za 7. siječnja kada se maksimum pojavljuje u 12 h UTC. Valja primijetiti pretežno manje amplitude u jesen i u zimu, naspram amplituda u proljeće i u ljeto.  $\Delta Z$  komponenta pokazuje kako se u proljeće vidi pomak u dobu nastupanja maksimalne vrijednosti, te počevši od ožujka kada maksimum nastupa između 08 i 10 h UTC, lagano se kroz mjesece vrijeme nastupanja maksimuma pomiče u kasnije doba dana, da bi u lipnju maksimalna vrijednost nastupila između 12 i 14 h UTC. Za 21. srpnja, koji je u razmatranje ušao zahvaljujući  $Kp$  kriteriju za miran dan, maksimalna je vrijednost nastupila u kasnijem dijelu dana, između 14 i 16 h UTC, kao i 25. listopada. BNG je jedina postaja u ekvatorijalnom području od odabralih postaja koja se nalazi južnije od geomagnetskog dip ekvatora ali ipak sjevernije od dipolnog ekvatora (slika 8). Karakteristična je pojava na takvim postajama prvo bitno slab pad, nakon čega se vrijednost  $Z$  komponente oko lokalnog podneva približava noćnoj vrijednosti i nakon toga još raste, da bi tek nakon podneva poprimila maksimalne iznose. Takav je karakteristični hod lijepo vidljiv za sve odabrane dane unutar proljeća, posebno za 2. lipnja, kada je i maksimalna amplituda među najvećima.

AAE	Latituda $\delta$ [°]	Longituda $\theta$ [°]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Addis Abeba, Etiopija	9,02	38,77	+3	2 441

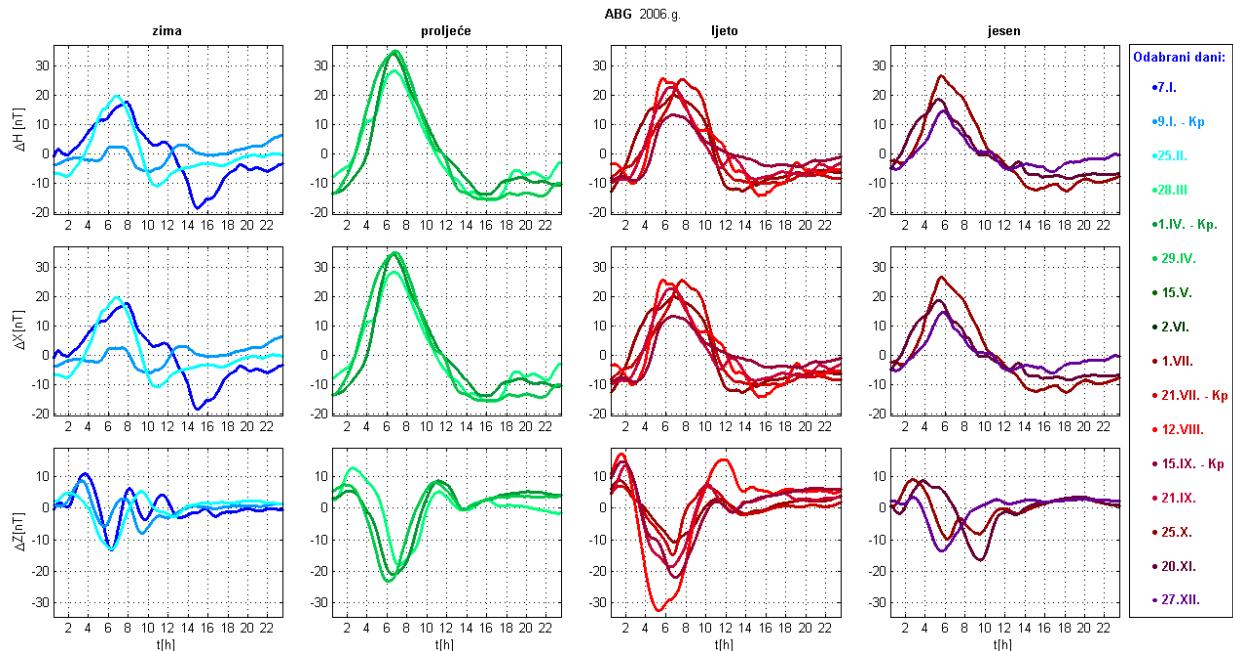


Slika 17.5. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji AAE. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**AAE:** Podaci za 15. i 21. rujna, kao i za 20. studenoga, nisu potpuni, ali se mogu bez velike pogreške odčitati amplitude, kao i vremena nastupanja maksimalne odnosno minimalne vrijednosti. Najveće su amplitude u proljeće, dok su najmanje amplitude karakteristika jeseni. U ljeto se primjećuje pretežiti pomak nastupa maksimuma  $\Delta H$  i  $\Delta X$  prema ranijem dijelu dana, bliže 08 h UTC, ali između te vrijednosti i 09 h UTC, no ne treba zanemariti da je 21. srpnja maksimum nastupio prilično kasnije, u intervalu između 10 i 12 h UTC. Amplitude u jesen izrazito su manje, no svejedno su sve amplitude za postaju u Adis Abebi još uvijek zamjetno velike. To se može shvatiti ako se primijeti da je postaja na nešto višoj nadmorskoj visini, tj. na 2 441 m. Maksimum  $\Delta H$  se ostvaruje 29. travnja dok u isto vrijeme  $\Delta X$  poprima  $\sim 0,36$  nT veću vrijednost. Grafovi za mirne dane travnja, svibnja i kolovoza prikazuju gotovo školski primjer mirnog dnevnog hoda. Najvjerojatnije bi tako izgledalo i 15. rujna, da se nastavio miran i stabilan trend i nakon 10 h UTC otkad su mjerena nepotpuna.

Hod  $\Delta Z$  prikazuje da 28. ožujka, 1. travnja i 2. lipnja imaju pojačane fluktuacije, no općenito govoreći za vrijeme nastupa maksimuma  $H$  komponente nastupa manja vrijednost od noćne u  $\Delta Z$ . Stoga možemo reći kako je to generalno područje minimuma. Minimalne su vrijednosti  $\Delta Z$  u blizini lokalnog podneva i očekivane jer je opservatorij AAE sjevernije od dipolnog ekvatora, ali se iz uznenirenog hoda  $\Delta Z$  može primijetiti kako je ipak u relativnoj blizini geomagnetskog ekvatora. To se može također vidjeti iz slike 8.

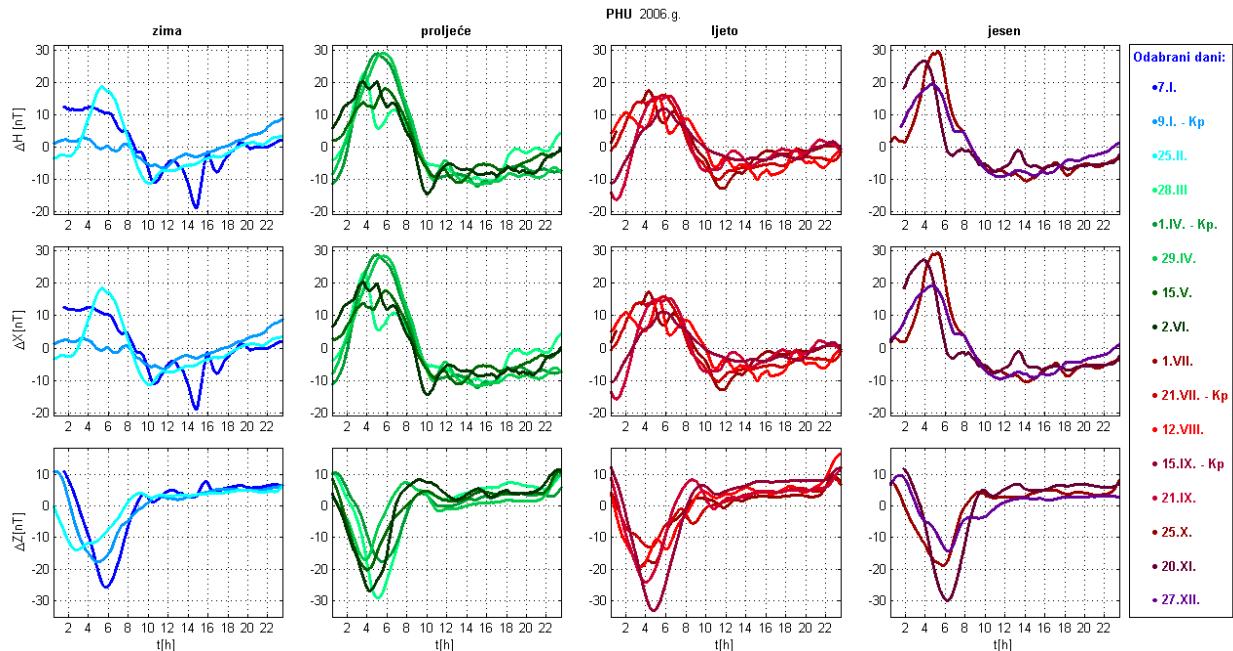
ABG	Latituda $\delta$ [°]	Longituda $\theta$ [°]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Alibag, Indija	18,62	72,87	+5:30	0



Slika 17.6. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji ABG. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**ABG:** Na postaji Alibag cijelu godinu  $F$  komponenta nije mjerena, i treba naglasiti kako 15. svibnja i 2. lipnja s opservatorija nije bilo moguće dobiti podatke, te zbog toga u daljem tekstu neće se posebno naglašavati njihov nedostatak. Može se primjetiti kako su amplitude  $\Delta H$  najveće u proljeće, a najmanje u jesen. U nedostatku mjerenja  $F$  komponente,  $H$  komponenta može vizualno pomoći u shvaćanju kako je  $F$  komponenta tijekom odabralih i promatranih dana izgledala, to pogotovo vrijedi za postaje ekvatorijalnog područja. Najveće su razlike između minimalne i maksimalne  $\Delta Z$  vrijednosti uočljive u ljetu, dok su najniže u jesen i zimu. Budući da grafovi prikazuju dnevne hodove  $\Delta Z$  po UTC vremenu, dok je ovaj opservatorij u Indiji na +5:30 h od UTC, može se reći kako je vrijeme nastupanja minimuma  $\Delta Z$  prije lokalnog podneva, u intervalu od 10 do 12 h po lokalnom vremenu, za sve prezentirane dane, osim za 20. studenoga.

PHU	Latituda $\delta$ [°]	Longituda $\theta$ [°]	UTC pomak [h]	Nadmorska visina [m]
Phu Thuy, Vijetnam	21,028	105,951	+7	5

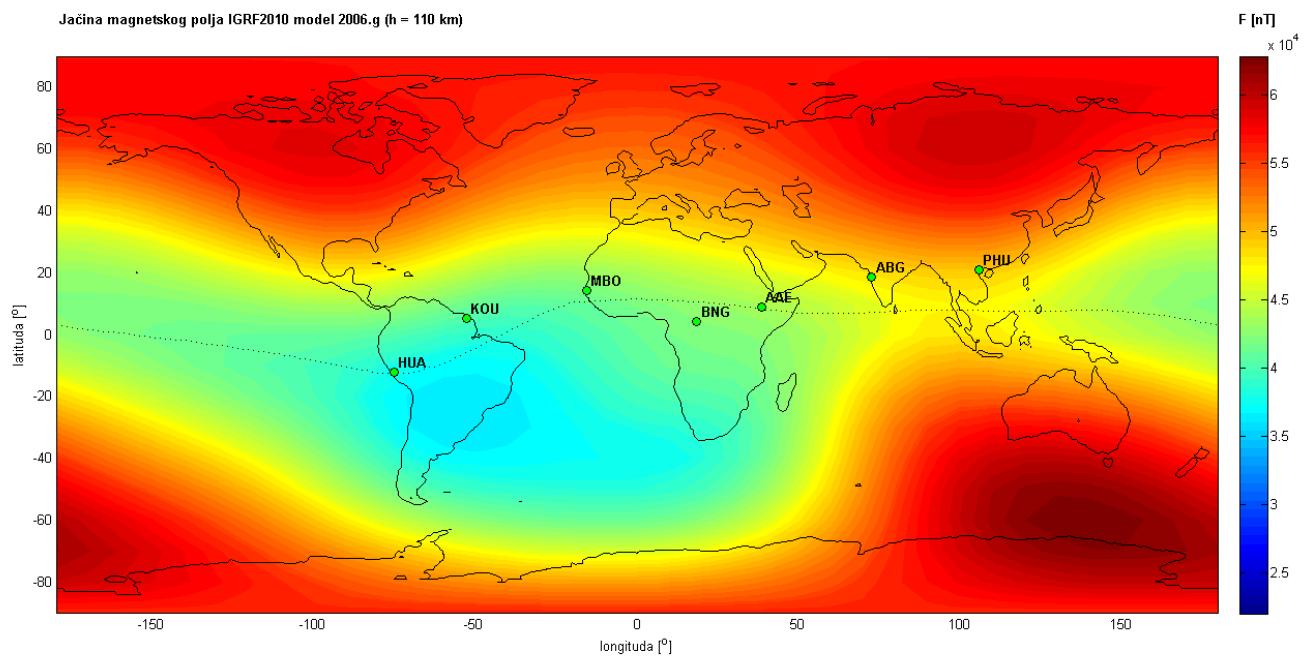


Slika 17.7. Dnevni hod satnih srednjaka jednominutnih vrijednosti na postaji PHU. Slika prikazuje centrirane razlike odabralih 16 mirnih dana u 2006. Sve su ostale karakteristike prikaza usporedive s opisom kod slike 17.1.

**PHU:** Iako postoji vidljiva perturbacija dnevnog hoda  $\Delta H$  za odabrane dane, velik je dio prikazanih dana zapravo na rubu da ne ispuni vizualni kriterij, ipak se prepoznaje karakteristični hod mirnih dana. Bez obzira na uznemirenost  $H$  komponente, može se vidjeti kako su minimalne amplitudne razlike prisutne tijekom ljeta i zime. Phu Thuy je najistočnija postaja koju gledamo, te ako njene grafove usporedimo s najzapadnjom Huancayo u Peruu, jednostavno se primjećuje pomak u fazi nastupanja maksimuma. Maksimum  $\Delta H$  nastupa početkom dana, budući da je PHU opservatorij pomaknut za 7 h naspram UTC vremena. Vidi se lijepo kako 9. i 7. siječnja istinski maksimum u mjeranjima ne nastupa u blizini lokalnog podneva, te će tu biti potrebno, kao što je već spomenuto,  $X$  i  $Z$  vrijednost komponenata odčitavati u vrijeme lokalnog podneva, što je na ovim grafovima u 05 h UTC. Od svih 16 dana koji su ispunili Dst i  $Kp$  kriterije mirnih dana, samo njih šest bi zadovoljilo vizualnu analizu i nakon satnog osrednjavanja. Mora se napomenuti kako nijedan geomagnetski indeks nije pravo mjerilo mirnoće, te su svi iznimno lokalni, pa se mogu svi odabrani dani uzeti u dalje razmatranje. Može se vidjeti kako je amplituda  $\Delta H$  i  $\Delta X$  u proljeće najveća, što se moglo i očekivati, te maksimalna vrijednost 29. travnja nastupa oko 14 h po lokalnom vremenu.  $\Delta Z$  poprima minimalne vrijednosti u trenutcima nastupanja lokalnog podneva kada se javlja maksimum  $\Delta H$ , što je karakteristična pojava za opservatorije sjevernije od geomagnetskog dip i dipolnog ekvatora.

## 7. Eliminacija solarno mirnih varijacija i doprinosa glavnog polja

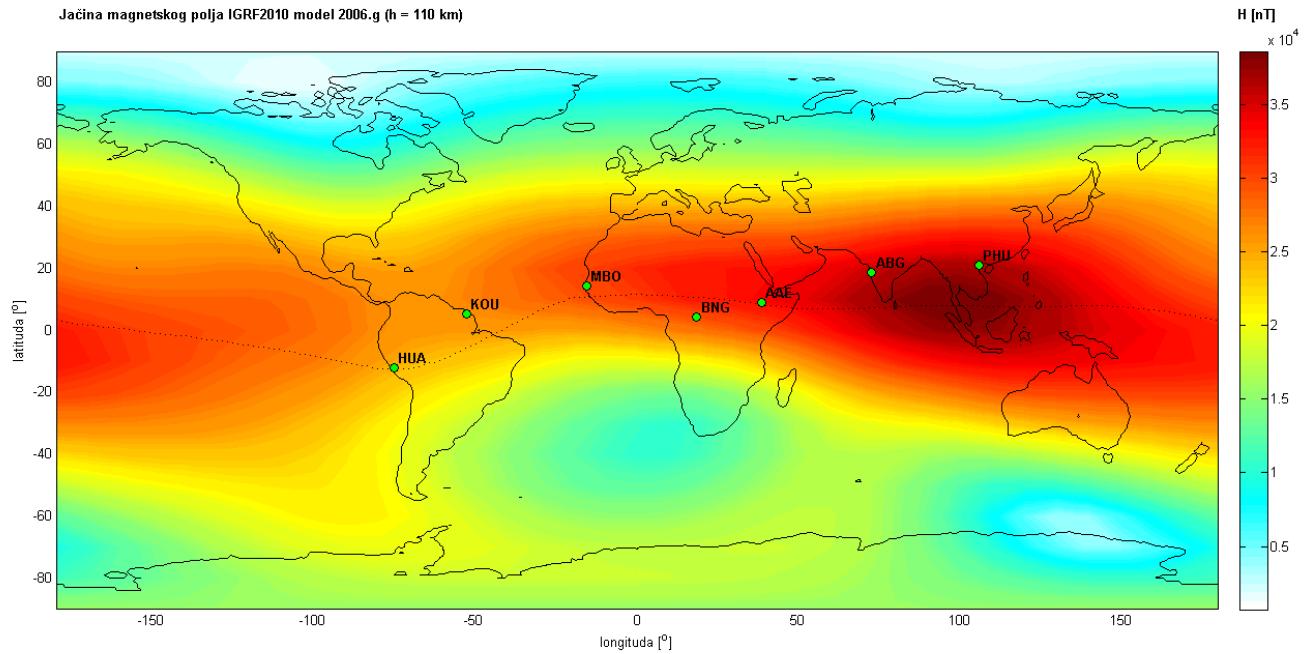
Kako bi se dobile vrijednosti polja na opservatoriju uzrokovane isključivo EEJ koji teče na visini od 110 km iznad njega, potrebno je iz mjereneih podataka eliminirati doprinose glavnog polja te  $Sq$  varijacija. Vrijednosti glavnog polja su računate uz pomoć [igrf.exe](#) programa koji je napravljen na osnovi IGRF modela 11-te generacije (dodatak 1). Za promatranu 2006. prosječna se razdioba ukupnog polja ( $F$  komponente) vidi na slici 18.



Slika 18. Prosječna raspodjela ukupnog magnetskog polja za 2006. na osnovi IGRF modela 11. generacije.

Može se primjetiti područje depresije glavnog polja iznad Južne Amerike. Na slici je isprekidanom linijom označen geomagnetski ekvator te se vidi kako savijanje geomagnetskog ekvatora između  $10^\circ$  i  $75^\circ$  zapadne longitude prati konture depresije na tom području. Iznad južnog Atlantika, jugozapadne Afrike te Južne Amerike vrijednosti glavnog polja su pretežno unutar  $[37\ 500, 47\ 500]$  nT te je time obuhvaćeno veliko područje gdje dolazi do znatnog pomaka geomagnetskog ekvatora prema geografskom jugu. Uočljiva su tri maksimuma i to na području kanadskog Nunavuta i Sjeverozapadnog teritorija, Sibira te južno od Australije. Maksimalne vrijednosti glavnog polja dostižu i 63 500 nT. Horizontalna je komponenta glavnog polja prikazana na slici 19. Maksimalne vrijednosti  $H$  komponente zadržavaju se u ekvatorijalnom području. Odabrani se opservatoriji, koji su posebno označeni, nalaze unutar područja gdje  $H$  komponenta glavnog polja poprima vrijednosti iz  $[25\ 000, 39\ 000]$  nT intervala. EEJ, kao što je već spomenuto, uzrokuje magnetske pojave na ekvatorijalnom području. Uklanjanje doprinosa glavnog polja mjerene će vrijednosti smanjiti za konstantni iznos koji je ovisan o točnoj lokaciji opservatorija od interesa. IGRF model, kao što nije prikazano na slikama 18) i 19) koje

predstavljaju prosječnu godišnju vrijednost, daje također i dnevne vrijednosti glavnog polja, tako da će doprinosi koji će se ukloniti biti ovisni i o odabranom promatranom danu. Nakon eliminacije doprinosa glavnog polja, mjerene vrijednosti na opservatoriju poprimaju iznose puno manjih vrijednosti. Tako na primjer za HUA opservatorij nakon eliminacije glavnog polja vrijednosti komponenata ulaze u interval [0 , 200] nT.

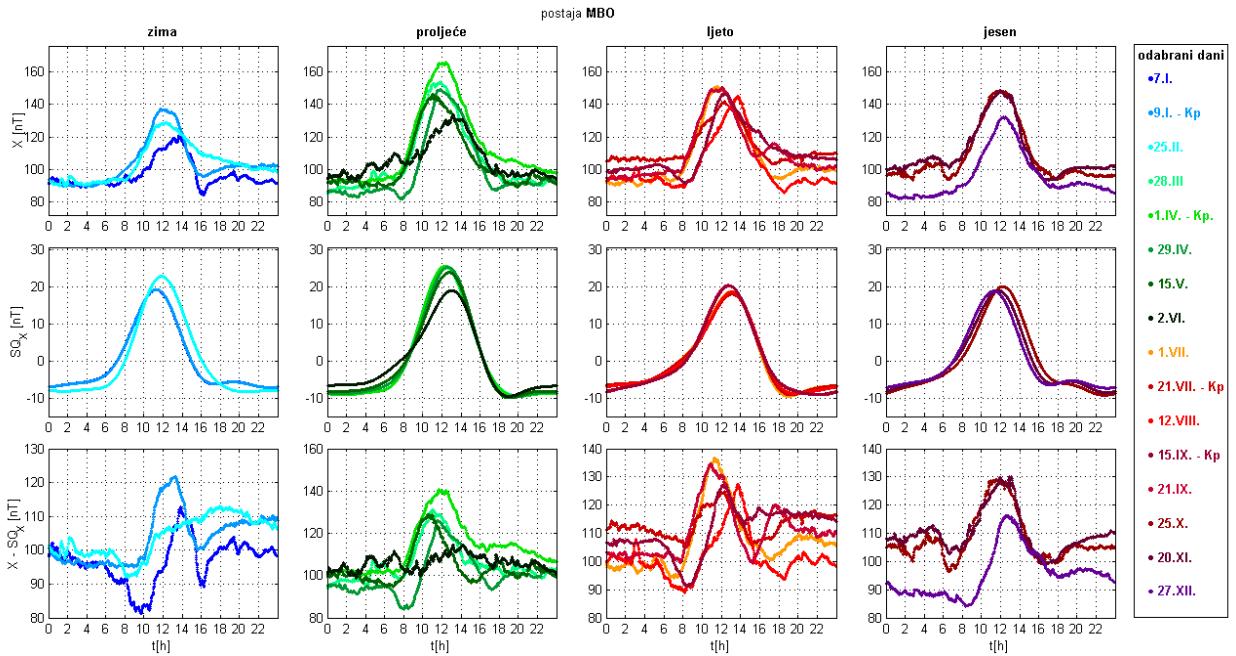


Slika 19. Prosječna raspodjela horizontalne komponente magnetskog polja za 2006. na osnovi IGRF modela 11-te generacije.

Eliminacija vrijednosti iz IGRF modela ne eliminira doprinose prouzročene u kori  $M_k$  iz jednadžbe (1) nego isključivo unutarnje polje. Polje kore nije povezano izravno s mjerljivim utjecajem EEJ na opservatoriju, te ga je moguće eliminirati dodatnim uklanjanjem prosječnih noćnih vrijednosti. Tijekom noći sve komponente pokazuju konstantan hod te se uklanjanjem njih uklanja polje kore za koje se pretpostavlja kako ima konstantan doprinos.

Struje  $Sq$  i EEJ slične su po nastanku, ali imaju različite osi simetrije (slika 5). Relativna pozicija i orijentacija magnetskog i geografskog ekvatora važni su parametri, jer je EEJ koncentriran duž magnetskog ekvatora dok je  $Sq$  bolje objašnjen kao funkcija udaljenosti od geografskog ekvatora (Onwumechili, 1967.). Takva raspodjela uzrokuje superponirani komplikirani utjecaj  $Sq$  i EEJ struja unutar ekvatorijalnog područja (Rigoti i sur., 1999.). Kako bi se vidjeli isključivo utjecaji EEJ na opservatoriju, potrebno je ukloniti  $Sq$  doprinos iz originalnih mjerena. Program „[SQ1model.exe](#)“, opisan detaljnije u dodatku 1, korišten je za izračun vrijednosti polja uzrokovanih na površini Zemlje od strane  $Sq$ . Na slici 20 prikazan je primjer eliminacije solarno mirnog hoda na osnovi SQ1modela iz mjerene  $X$  komponente na opservatoriju MBO. U prvom redak predstavlja vrijednosti  $X$  komponente na osnovi SQ1 modela te treći redak predstavlja

njihovu razliku. Kako je spomenuto ranije, vrijednosti  $X$  i  $Z$  komponente magnetskog polja odčitavaju se u doba nastupanja maksimuma mjerene  $H$  komponente. Za određivanje vremena nastupanja maksimuma  $H$  komponente nije nužno eliminirati doprinose  $Sq$  varijacija, kao ni doprinose glavnog polja, ali za izračun parametara iz jednadžbi (58) i (59) koje daju teorijske vrijednosti  $X$  i  $Z$  komponente isključivo prouzročene EEJ spomenutu eliminaciju potrebno je napraviti.

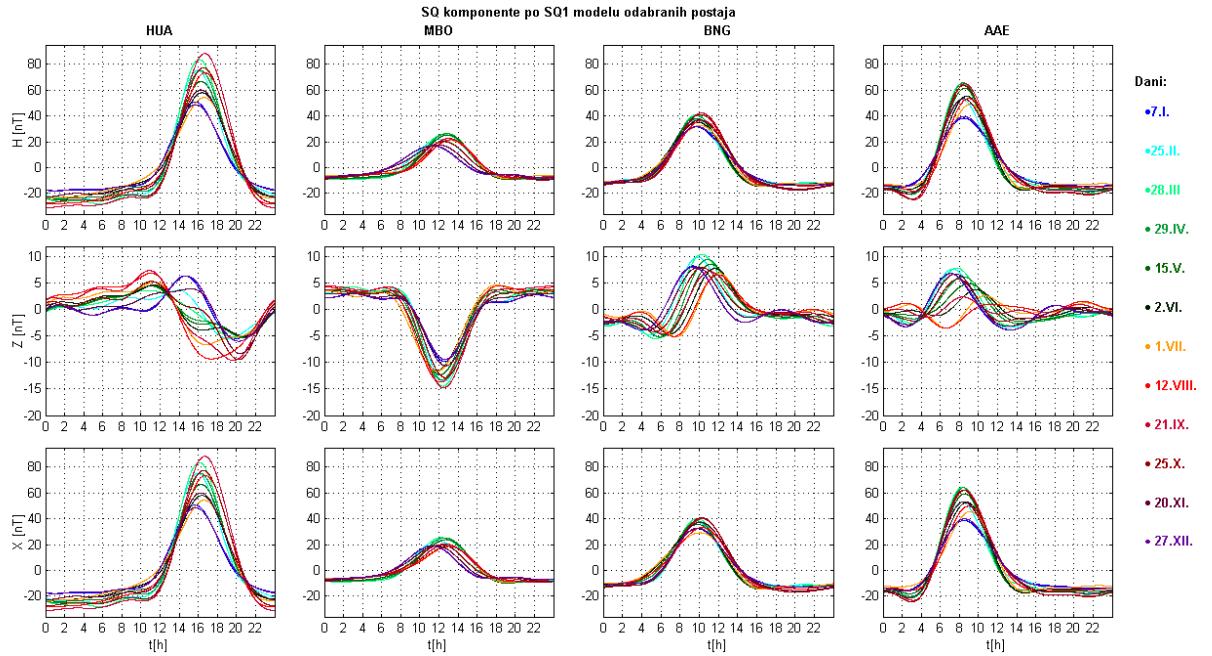


Slika 20. Primjer eliminacije  $Sq$  varijacija X komponente na opservatoriju MBO za promatrano 2006.

Model solarno mirnih varijacija daje standardni hod komponenata magnetskog polja i primjeri za svaki odabrani dan po Dst indeksu iz promatrane 2006. za neke od opservatorija su prikazani na slici 21. U stupcima su prikazane vrijednosti za 4 opservatorija, redom HUA, MBO, BNG i AAE, dok su u retcima prikazane solarno mirne varijacije  $H$ ,  $Z$  i  $X$  komponente, tim redoslijedom, izračunate uz pomoć SQ1 modela.

Opservatorij HUA najbliže je geomagnetskom i dipolnom ekvatoru, te je vidljivo da su amplitude horizontalne komponente na njemu i najveće. Kako se vrijednost latitude povećava, tj. udaljenost od geomagnetskog ekvatora raste, maksimalna amplituda opada. Nakon HUA, po udaljenosti od geomagnetskog ekvatora, dolazi opservatorij AAE, s obzirom na prikazane opservatorije sa slike 21, s nešto manjim amplitudama maksimuma horizontalne komponente. Dalji pad maksimuma  $H$  je uočljiv za BNG i potom za MBO opservatorij, koji je i najudaljeniji promatrani opservatorij od dipolnog ekvatora (slika 8). Vertikalna se komponenta zadržava u blizini nultih vrijednosti na postajama blizu geomagnetskog dip ekvatora. Od prikazanih  $Sq$  varijacija, sa slike 21, opservatorij HUA se nalazi najbliže i geomagnetskom i dipolnom ekvatoru, te je nakon njega opservatorij AAE drugi po redu. Na njima se vidi tendencija približavanja  $Z$  komponente

nultoj vrijednosti tijekom nastupa maksimuma horizontalne komponente, pogotovo je na HUA opservatoriju to lijepo vidljivo 28. ožujka i 25. listopada.



Slika 21. Primjer godišnjih hodova  $Sq$  varijacija na četiri opservatorija za promatranu 2006.

U slučaju opservatorija lociranih unutar ekvatorijalnog područja, hod vertikalne komponente daje informaciju o položaju opservatorija naspram EEJ. Vrijednosti  $Z$  se smanjuju udaljavanjem prema sjeveru od strujne ravnine, kako bi postigle minimum u blizini lokalnog podneva, što predstavlja polje usmjereni prema gore na sjevernoj hemisferi (slika 2). To je vidljivo na prikazu solarno mirnih varijacija MBO opservatorija. Pomicanjem prema jugu od ekvatorijalnog područja,  $Z$  komponenta raste, kako bi za vrijeme lokalnog podneva poprimila maksimalne iznose (polje usmjereni prema dolje). S obzirom na pozitivne iznose  $Z$  komponente  $Sq$  varijacija u trenutcima nastupanja lokalnog podneva (slika 21) tijekom većeg dijela godine, može se zaključiti da se AAE pretežno nalazi sjevernije od dipolnog ekvatora, dok je za opservatorij BNG to očito.

Postaja BNG je odabrana za prikaz  $Sq$  varijacija (slika 21) zbog njene lokacije sjevernije od dipolnog ekvatora i južnije od geomagnetskog dip ekvatora (slika 8). Kao što je očekivano za postaju postavljenu južnije od područja kojim teče EEJ, vertikalna komponenta (slika 21) BNG opservatorija pokazuje maksimalne vrijednosti u dobima lokalnog podneva, što je također vidljivo iz mjerenja (slika 16.4. b). Iz toga se može zaključiti kako upravo geomagnetskim dip ekvatorom teče strujni sustav koji prouzročuje takvu raspodjelu polja.

## 8. Određivanje parametara po postajama

Za svaku postaju i za svaki odabrani dan posebno su izračunate vrijednosti parametara  $u_0$ ,  $a$ ,  $\alpha$  i parametar  $K$ . Također je sve izračunato za dvije vrijednosti parametra  $b$ , kada je on 0 km i za slučaj  $b = 9,47$  km (Onwumechili i sur., 1989.). Dani su prikazani na apscisi u skaliranom omjeru, gdje je vrijeme od jedne godine dana postavljeno u intervalu [0, 1]. Na takav način, kao na slici 15 dobije se vizualni dojam međusobne udaljenosti odabralih dana. Dani koji su odabrani za razmatranje po  $Kp$  indeksu označeni su na apscisi crnom točkom. Svaki parametar na dijagramu ima prikazan i interval unutar kojeg se tražila njegova optimalna vrijednost radi ispunjenja uvjeta,

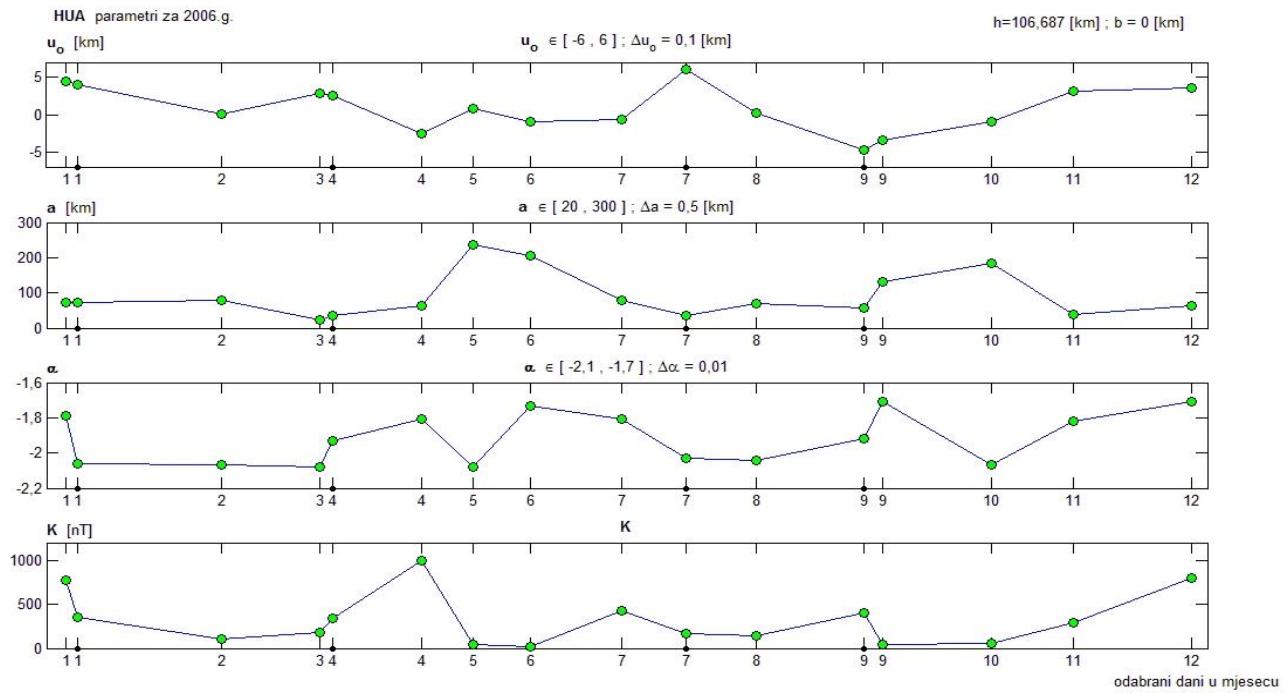
$$\frac{X_m}{Y_m} = \frac{X_o}{Y_o} \quad (75)$$

gdje indeksi  $m$  i  $o$  označavaju vrijednosti koje računa model i mjerena obavljena na opservatoriju, tim redoslijedom. Zbog nelinearnosti modela, s obzirom na parametre  $a$  i  $\alpha$  cilj je bio pronaći što uži interval po pojedinom parametru koji zadovoljava za cijelu promatranu godinu na tom opservatoriju. Nakon što je od mjereneh vrijednosti na opservatoriju oduzet  $Sq$  hod te oduzeto glavno polje po IGRF modelu, potrebno je dodatno oduzeti noćne vrijednosti. To se čini tako što se od dnevnih vrijednosti oduzima ponoćni srednjak, za koji se upotrebljavaju četiri sata, od 00 do 02 h ujutro te od 22 do 24 h tog istog dana, bazirani na UTC vremenu.

Tako modificirani dnevni hodovi daju realističniju amplitudnu sliku i bolje odgovaraju u izračunu elektromlaza (Rigoti i sur., 1999.). Svaka će postaja zbog svoje nadmorske visine imati reducirani  $h$ , kako bi se ukupna visina na kojoj se traži EEJ svela na istu razinu od 110 km. Nakon noćne redukcije treba u trenutku nastupa maksimuma mjerene  $H$  komponente odčitati vrijednosti izmjerene na opservatoriju  $X_o$  i  $Z_o$  iz kojih je eliminirano glavno polje preko IGRF modela i  $Sq$ . Program koji to čini zove se [priprema\\_XYZ.m](#) te je detaljnije objašnjen u dodatku 2. Samo je traženje minimuma odstupanja po jednadžbi (75) napravljeno uz pomoć programa [eej\\_varparB.f90](#), koji je opisan u dodatku 2. Crtanje parametara i njihove promjene kroz odabранe dane promatrane godine radi Matlab program [parametri\\_XYZ.m](#).

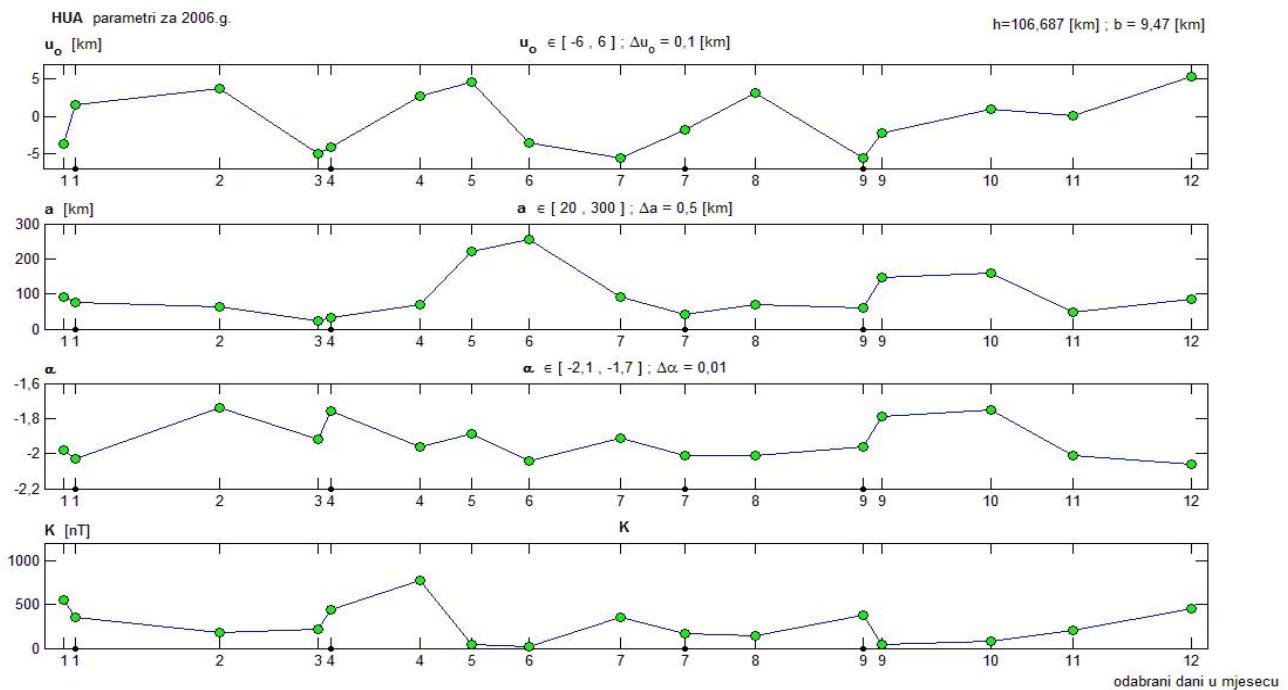
U grafovima koji slijede (slike 22 - 28) prikazani su hodovi parametara po opservatorijima za svaki odabrani dan gdje je to bilo moguće izračunati.

## Postaja HUA



Slika 22.a) Hod iznosa parametara na postaji Huancayo u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0$  km).

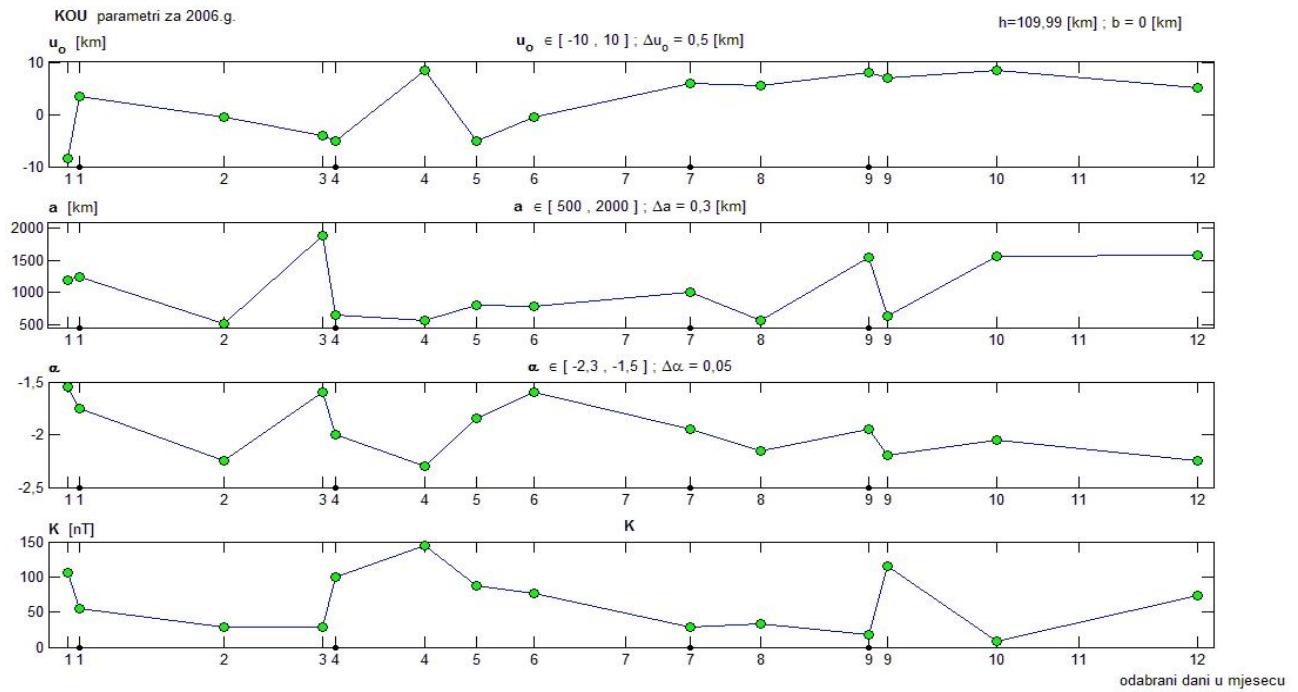
Opservatorij HUA se nalazi na 3 313 m nadmorske visine i na njemu se općenito očekuje najveći iznos gustoće struje, što je vidljivo po prosječno najvećim vrijednostima parametra  $K$ . Istovremeno, može se očekivati nazuši mlaz struje zbog prosječno najnižih vrijednosti parametra  $a$ . Parametar  $K$  poprima vrijednosti unutar intervala  $[0, 1100]$  nT od čega najnižu vrijednost 2. lipnja koja iznosi 23,908 nT, dok 29. travnja dostiže najveću vrijednost od 1001,469 nT.



Slika 22.b) Hod iznosa parametara na postaji Huancayo za slučaj  $b = 9,47$  km.

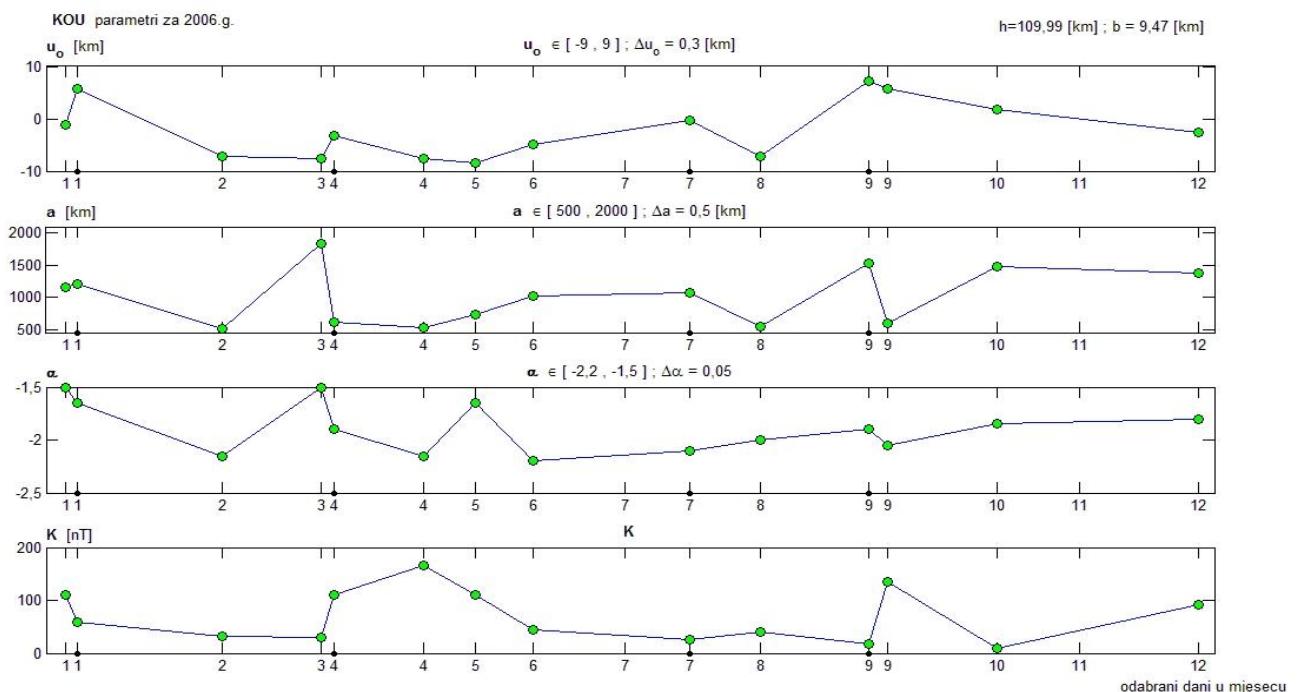
Parametar  $K$ , kao i u slučaju beskonačno tanke struje (slika 22.a), poprima najniže vrijednosti u svibnju i lipnju za koji nastupa najniža vrijednost od 19,067 nT te 21. rujna i 25. listopada.

## Postaja KOU



Slika 23.a) Hod iznosa parametara na postaji Kourou u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0 \text{ km}$ ).

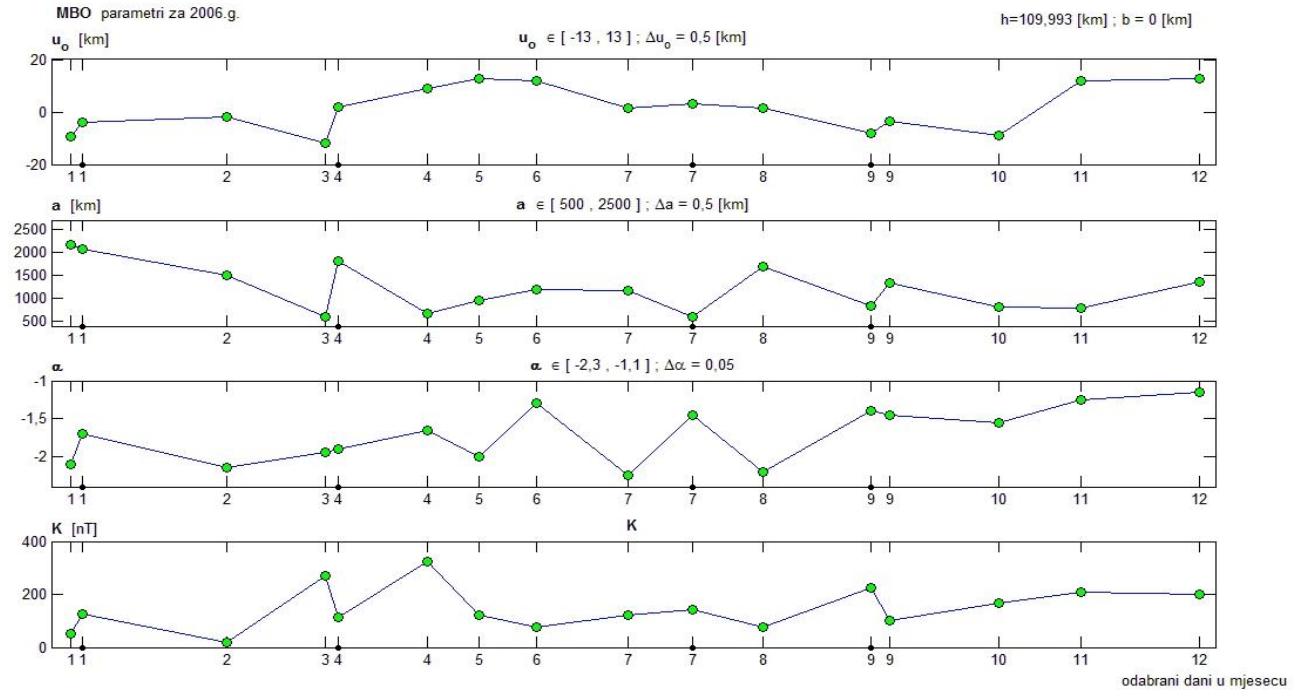
Opservatorij Kourou se nalazi na 10 m nadmorske visine. Parametre za 1. srpnja i 20. studenoga na toj postaji nije bilo moguće izračunati jer za te dane nisu dostupni podatci. Maksimalna je vrijednost za 29. travnja koja iznosi  $K = 143,817 \text{ nT}$ , dok za 25. listopada nastupa najmanja vrijednost od 9,137 nT za slučaj beskonačno tanke struje.



Slika 23.b) Hod iznosa parametara na postaji KOU za slučaj  $b = 9,47 \text{ km}$ .

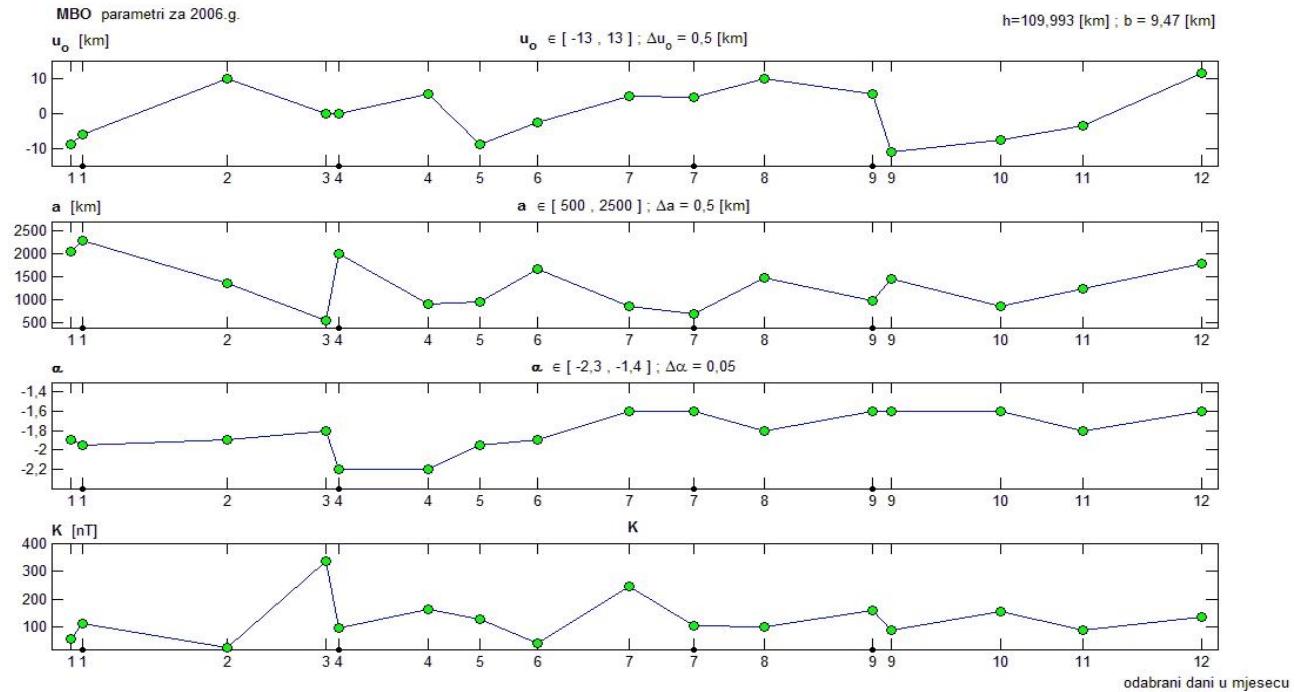
Na ovoj se postaji očekuje najveći iznos gustoće struje za 29. travnja, kada vrijednost  $K$  poprima maksimalan iznos od 166,6 nT za promatranu godinu, dok se minimum ostvaruje 25. listopada od 10,065 nT.

## Postaja MBO



Slika 24.a) Hod iznosa parametara na postaji Mbour u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0 \text{ km}$ ).

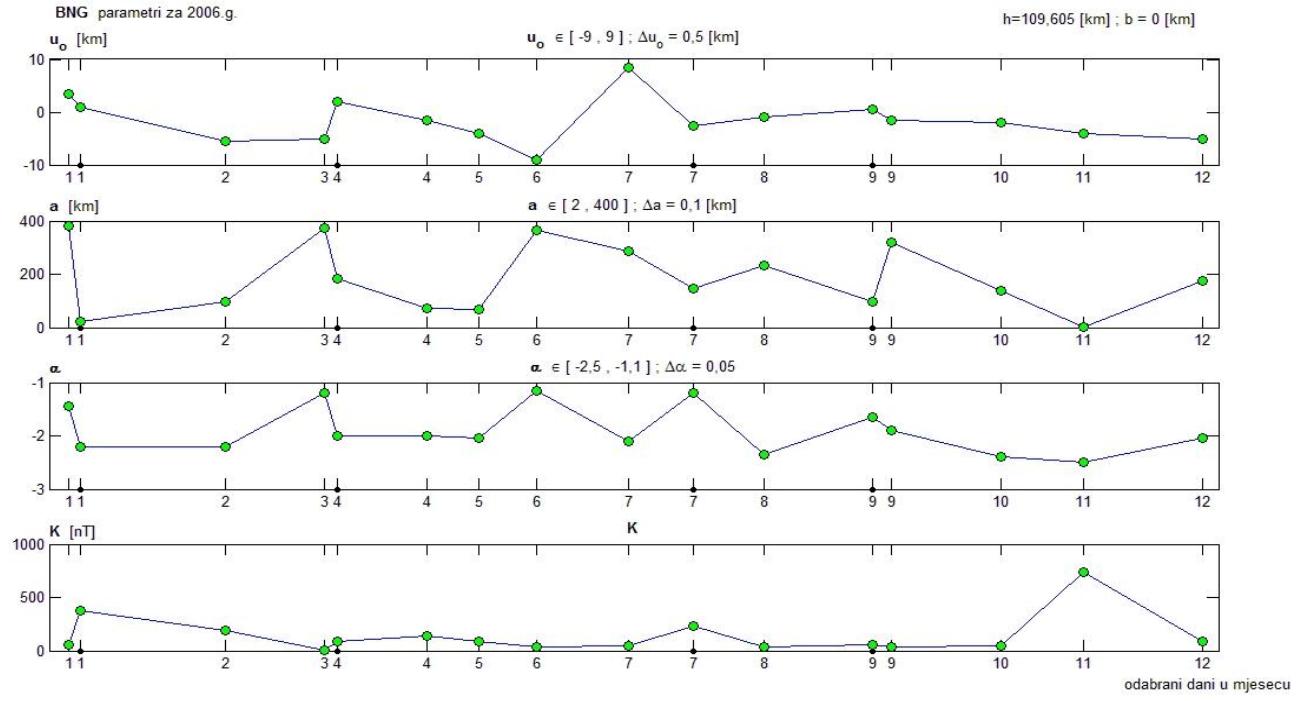
Postaja u Mbouru nalazi se na 7 m nadmorske visine.  $K$  parametar se zadržava unutar intervala  $[0, 400] \text{ nT}$ , od čega u veljaći poprima minimalnu vrijednost dok 29. travnja, kao i na postajama HUA i KOU, dostiže maksimalnu vrijednost, koja ovdje iznosi 324,817 nT. Potrebno je naglasiti kako za obje vrijednosti  $b$  parametra, poluširina  $a$  na ovoj postaji dostiže maksimalne vrijednosti od svih postaja.



Slika 24.b) Hod iznosa parametara na postaji MBO za slučaj  $b = 9,47 \text{ km}$ .

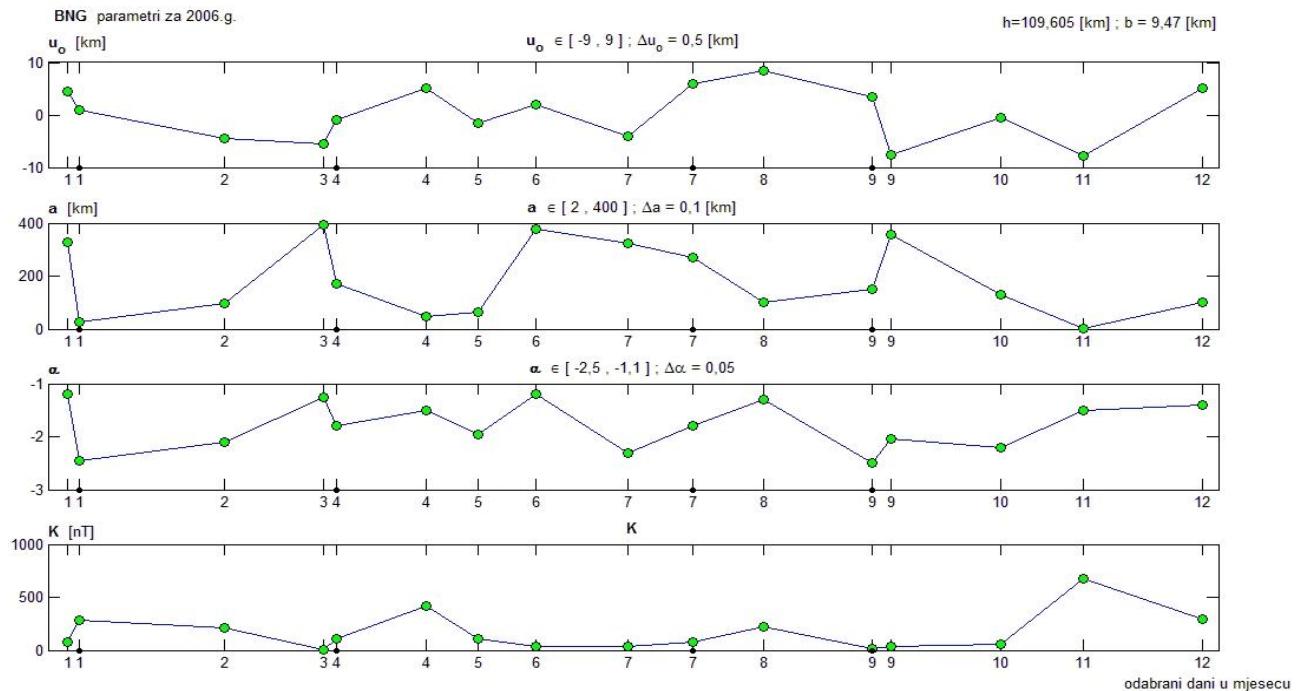
Na ovom je opsvatoriju opravdano očekivati, s obzirom na iznimno visoke vrijednosti parametra  $a$ , najširi strujni mlaz, i za slučaj beskonačno tanke struje (slika 24.a) i za slučaj deblje struje.

## Postaja BNG



Slika 25.a) Hod iznosa parametara na postaji Bangui u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0 \text{ km}$ ).

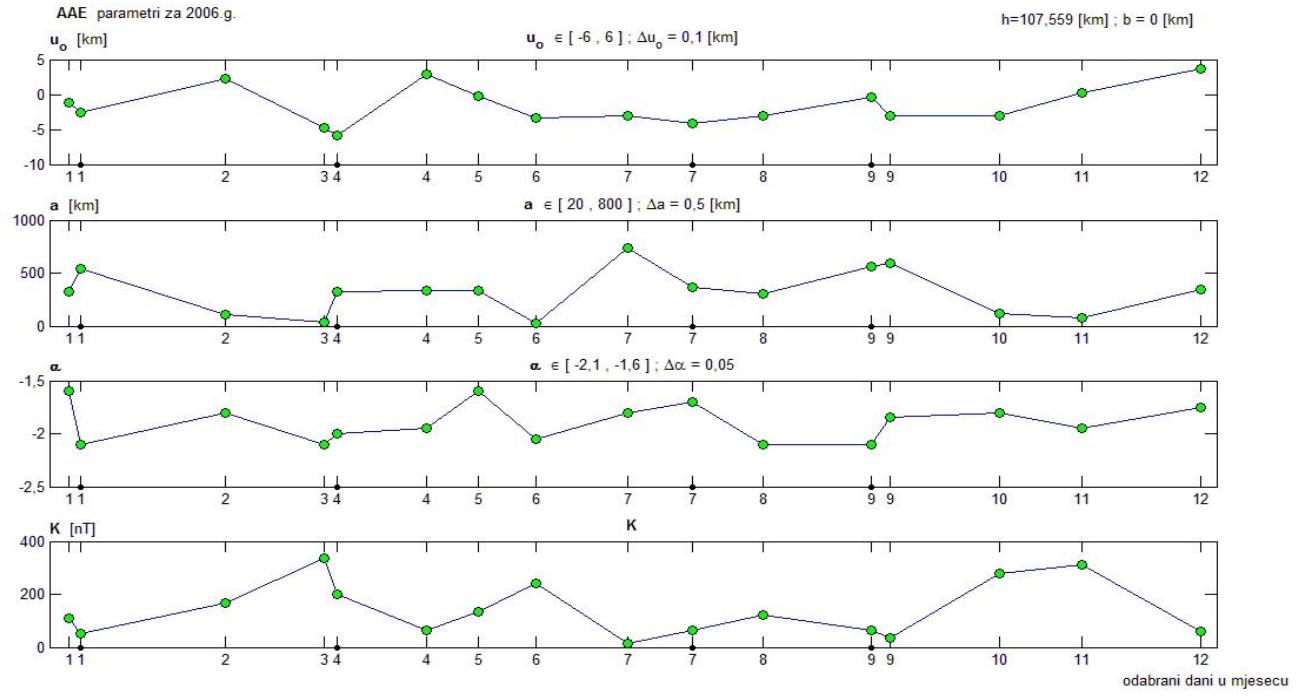
Opservatorij Bangui se nalazi na 395 m nadmorske visine. Za studeni se uočava iznimno velika vrijednost  $K$  od 737,503 nT dok vrijednosti tog parametra za ostale promatrane dane ne prelaze 400 nT. Može se uočiti kako je poluširina za studeni najmanja te iznosi svega 2 km. Tu se može očekivati vrlo tanka struja s visokim intenzitetom, te će povratni elektromlaz (CEJ) biti veći nego u ostalim danima, što se može vidjeti iz najniže vrijednosti parametra  $\alpha$ .



Slika 25.b) Hod iznosa parametara na postaji Bangui za slučaj  $b = 9,47 \text{ km}$ .

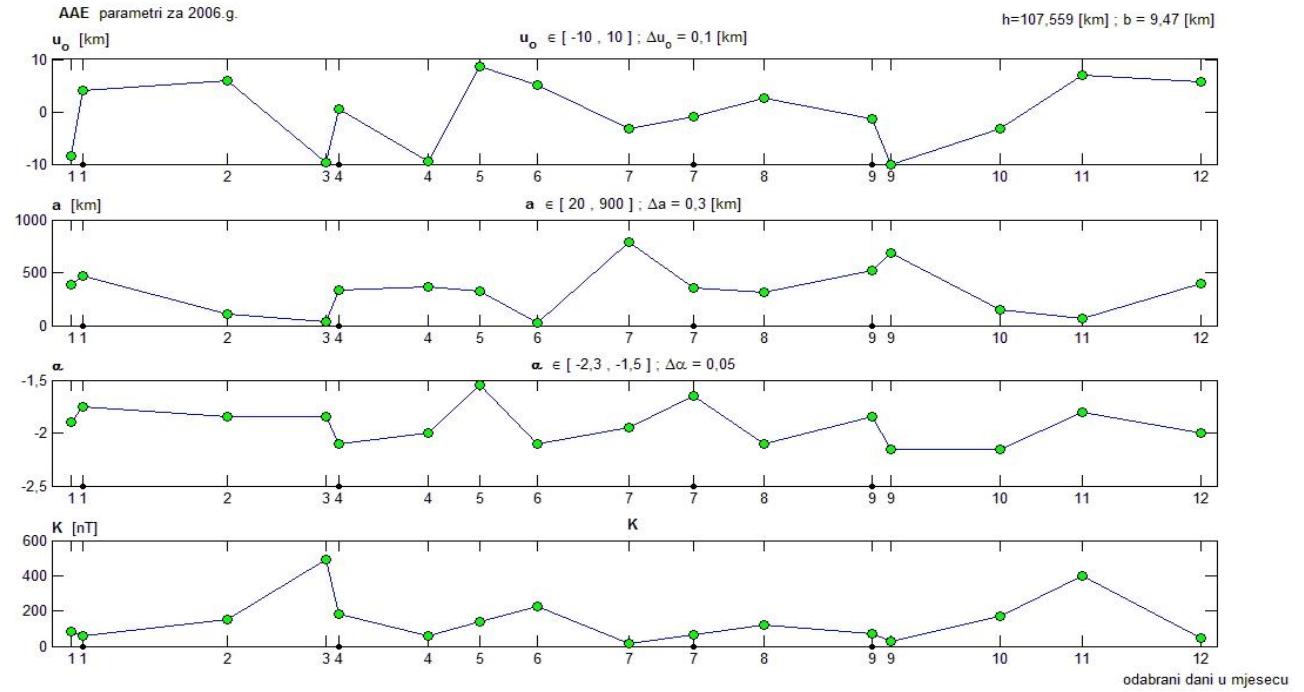
Parametri  $K$  i  $a$  poprimaju maksimalne, odnosno minimalne vrijednosti kao i u slučaju za  $b = 0 \text{ km}$  (slika 25.a)).

## Postaja AAE



Slika 26.a) Hod iznosa parametara na postaji Addis Abeba u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0$  km).

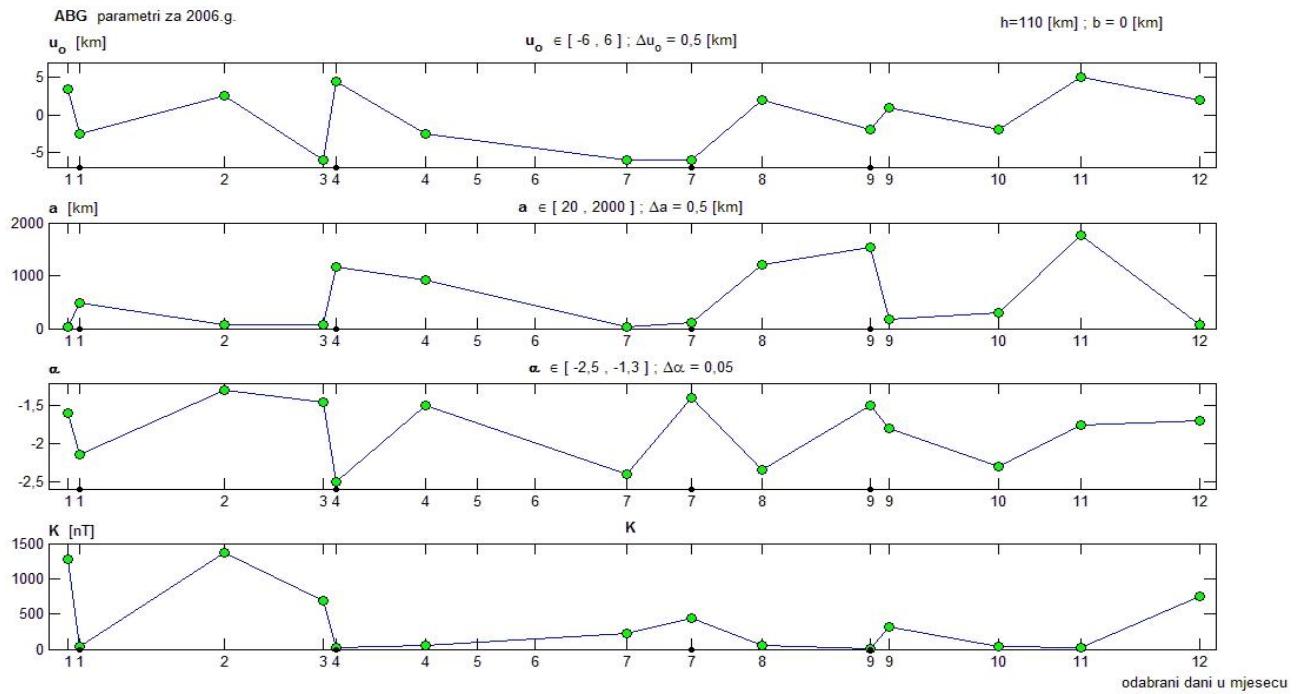
Opservatorij Addis Abeba nalazi se na 2 441 m nadmorske visine. Vrijednosti parametra  $K$  ne prelaze 400 nT.



Slika 26.b) Hod iznosa parametara na postaji Addis Abeba za slučaj  $b = 9.47$  km.

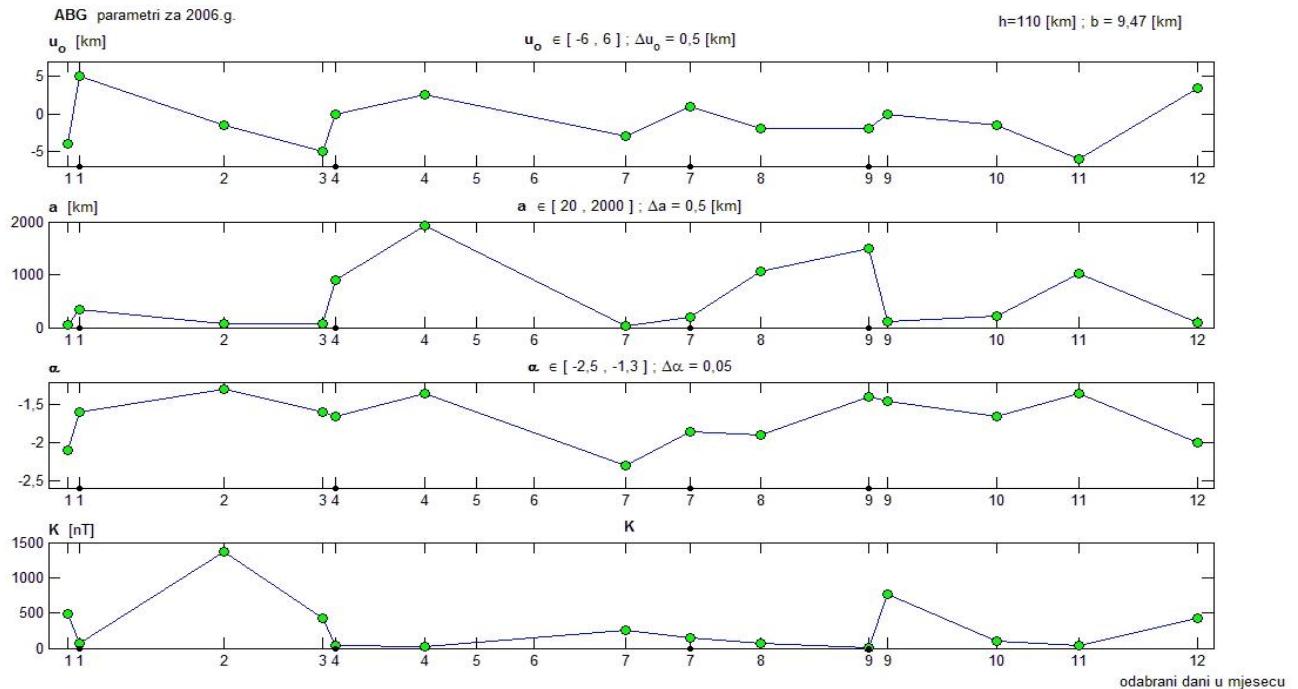
Svi dani, osim onog u ožujku i studenome, imaju vrijednosti parametra  $K$  u još nižem intervalu nego u slučaju beskonačno tanke struje (slika 26.a), što ukazuje na to da će ukupni intenzitet biti manji, dok se poluširina povećala, što je malo teže vidljivo iz grafičkog prikaza.

## Postaja ABG



Slika 27.a) Hod iznosa parametara na postaji Alibag u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0$  km).

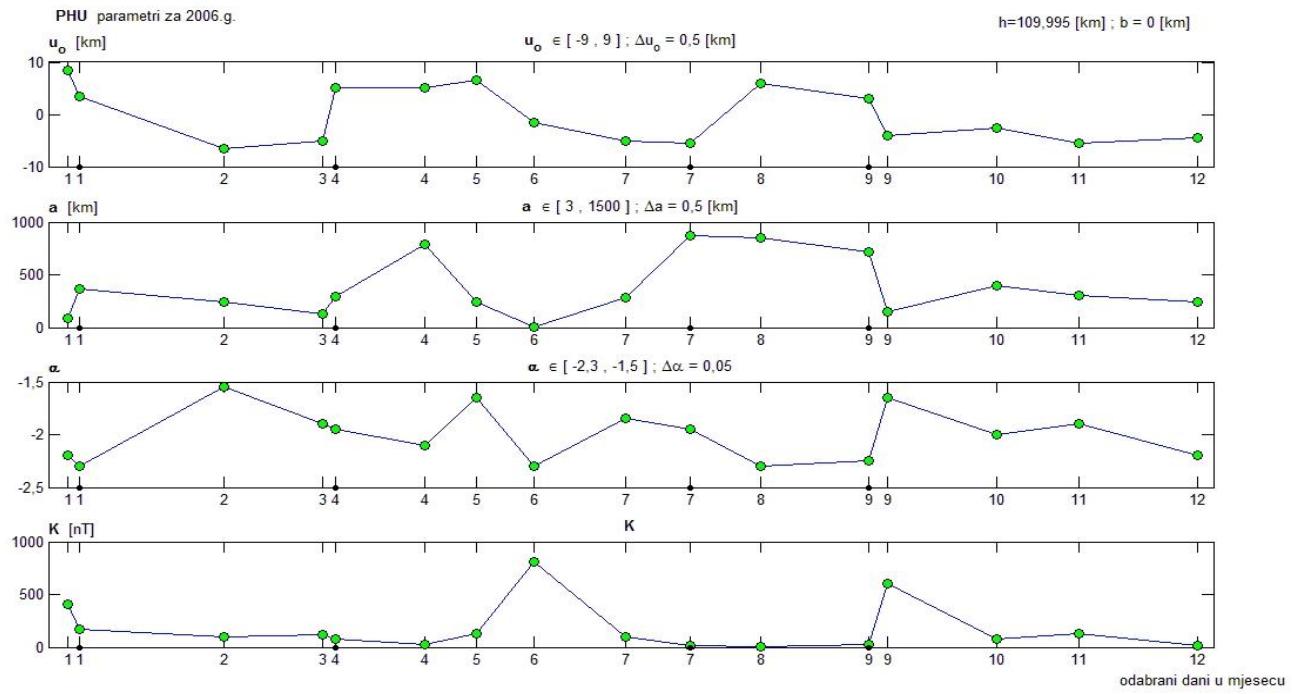
Od svih promatranih ekvatorijalnih opservatorija, na ovom se dostižu najveće vrijednosti parametra  $K$  od čega je najizraženijih 1 374,953 nT u veljači. Također se i za 7. siječnja postiže vrijednost  $K$  veća od bilo koje druge izračunate na ostalim opservatorijima uz upotrebu jednadžbe 68.



Slika 27.b) Hod iznosa parametara na postaji Alibag za slučaj  $b = 9,47$  km.

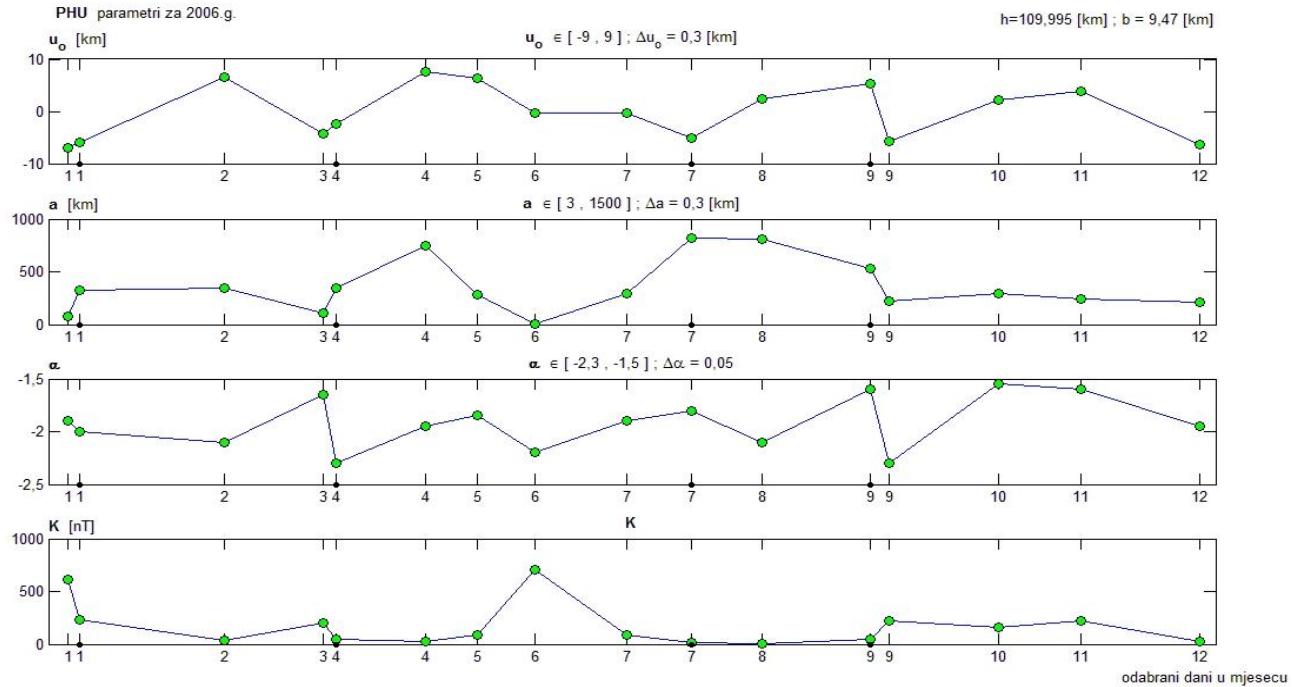
Opservatorij Alibag se nalazi na 0 m nadmorske visine. Vrijednost  $K$  u veljači, uz račun koji ne pretpostavlja beskonačno tanku struju, ne mijenja se puno, te je za 4,443 nT niža.

## Postaja PHU



Slika 28.a) Hod iznosa parametara na postaji PHU (n.v. 5 m) u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0$  km).

Parametar  $K$ , osim za 2. lipnja, kada poprima maksimalnu vrijednost od 809,707 nT i 15. rujna, zadržava se u malom intervalu, te osim 7. siječnja, ne prelazi vrijednost od 250 nT.



Slika 28.b) Hod iznosa parametara na postaji PHU u Vjetnamu za slučaj  $b = 9,47$  km.

Može se vidjeti kako je parametar  $K$  također prilično nizak te kroz cijelu godinu ne prestiže vrijednost od 250 nT, osim za 7. siječnja i 2. lipnja, kada dostiže maksimalnu vrijednost 702,322 nT.

Može se uočiti kako je širina mlaza veća kada parametar  $K$  poprima niže vrijednosti. U slučaju kada je parametar  $b = 9,47$  km hodovi parametara  $a, \alpha$  i  $u_0$  ostaju unutar istih intervala dok se vrijednosti  $K$  malo pomiču prema nižim vrijednostima, što je vidljivo za postaje HUA, ABG i PHU. Kako se opservatorij HUA u Peruu nalazi na najvišoj nadmorskoj visini te kako se nalazi baš na geomagnetskom ekvatoru, vrijednosti parametara mogu se uzimati kao reprezentativne za ekvatorijalni opservatorij. Lagani pad vrijednosti  $K$  parametra je očekivan, s obzirom na činjenicu kako bi totalni intenzitet struje trebao ostati isti ako se ne gleda samo beskonačno tanka strujna ploha kao jedino mjesto gdje struja može teći.

Nakon što se za svaki odabrani dan i za svaku promatrani opservatorij odredila vrijednost parametra  $K$ , može se izračunati vrijednost gustoće EEJ u središtu rasподjele preko:

$$K = 0,2 \pi J_0, \quad (76)$$

što slijedi iz jednadžbi (58) i (59), te možemo pisati:

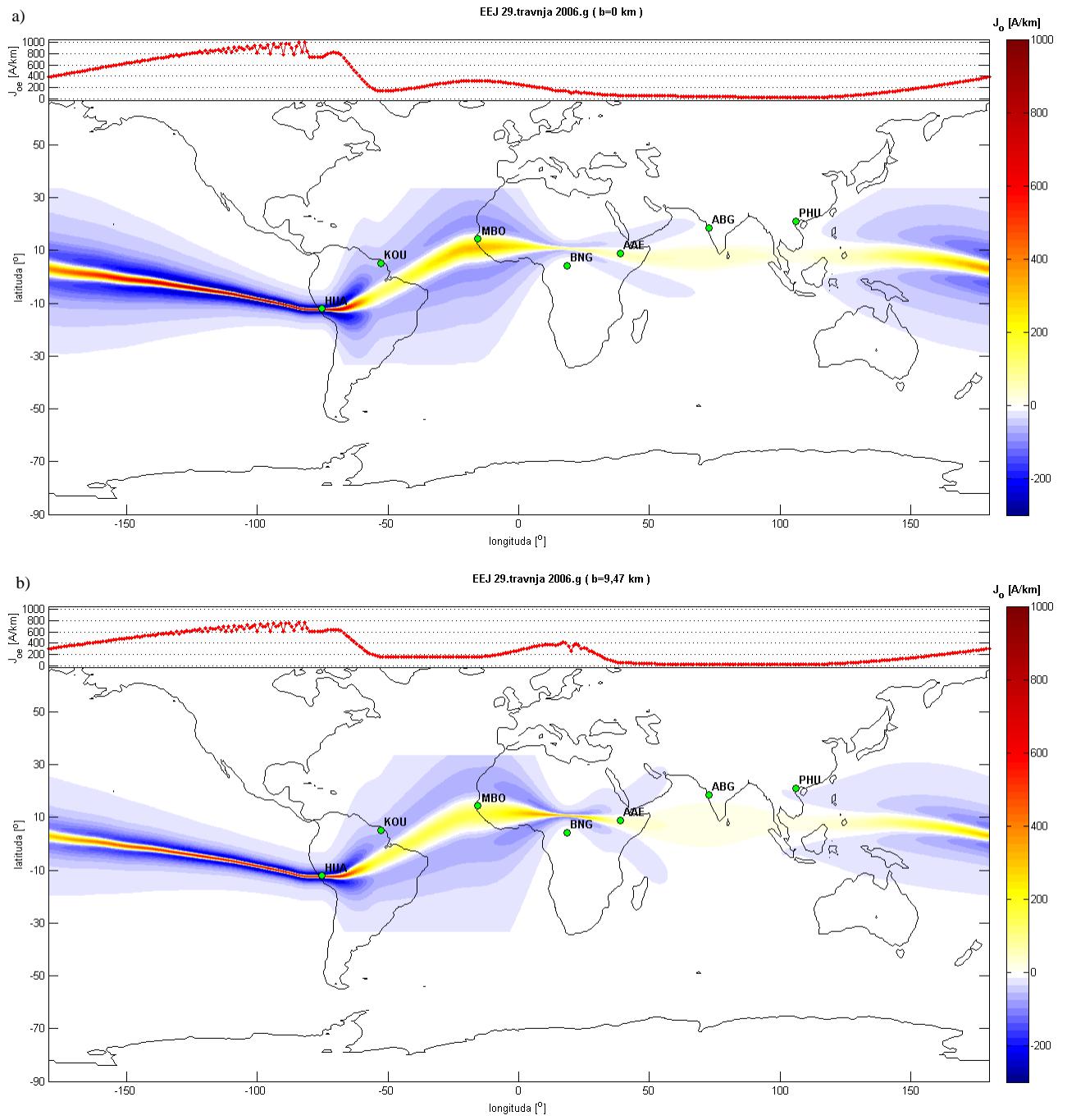
$$J_0 = \frac{K}{0,2 \pi}. \quad (77)$$

## 9. Prikaz ekvatorijalnog elektromlaza

Kao što je već spomenuto, od prvobitno odabranih 16 dana u promatranoj 2006. samo tri dana, redom 29. travnja, 12. kolovoza i 27. prosinca, ispunjavaju u potpunosti uvjete mirnog dana. Za njih također postoje i sva potrebna mjerena  $X$  i  $Z$  komponente, te mogućnost odčitanja vremena nastupa maksimuma  $H$  komponente u relativnoj blizini lokalnog podneva. Kako je rečeno ranije, EEJ je strujni mlaz koji se pojavljuje na osunčanoj strani planeta. Na grafovima koji slijede prikazan je globalni superponirani prikaz EEJ tijekom cijelog odabranog dana i njegov dnevni hod na konstantnoj visini od 110 km u trenutku nastupa maksimuma horizontalne komponente po lokalnom vremenu. Za centar EEJ uzet je geomagnetski ekvator, te je slika dobivena nakon superponiranja u svim vremenima od 00 do 24 UTC. Gustoća EEJ je izračunata preko jednadžbe (74). Program „[EEJ\\_superpozicija\\_F.m](#)“ koji to crta objašnjen je u dodatku 1. U gornjem dijelu svakog grafa prikazana je longitudinalna raspodjela gustoće EEJ po njegovom središtu ( $J_{0e}$ ), tj. geomagnetskom ekvatoru. Iznos gustoće duž geomagnetskog ekvatora na mjestima gdje nema mjerena i koja nisu obuhvaćena longitudinalnim modelom (jednadžba 72) interpolirana je, kao i već spomenuta longitudinalna raspodjela iznosa parametara, po dijelovima kubičnom Hermiteova interpolacijom. Parametri su korigirani za centar strujne distribucije  $u_0$ , koja nije uzeta u razmatranje pri prikazu raspodjele gustoće EEJ. Kao što se vidi iz slika (22) - (28), parametar  $u_0$  ne poprima velike vrijednosti te je najveći interval  $\pm 13$  km za opservatorij MBO (slika 24.a i b). Udaljenost strujne distribucije, tj. geomagnetskog ekvatora od opservatorija, funkcija je položaja samog opservatorija. Najmanja je za opservatorij Huancayo u Peruu, te iznosi 231,3 km. Korekcija za taj isti opservatorij je unutar  $\pm 6$  km i može se zanemariti za tu postaju i sve ostale pri prikazu distribucije gustoće struje.

Toplim bojama su prikazane pozitivne vrijednosti strujne gustoće EEJ, dok su hladnjima prikazane negativne vrijednosti koje predstavljaju CEJ. Za slučaj prikaza distribucije gustoće istog dana s različitim vrijednostima parametra  $b$ , skala vrijednosti iznosa gustoće je konstantna. Istovremeno, treba obratiti pozornost na različite skale ukupne gustoće u središtu distribucije iz gornjih dijelova slika.

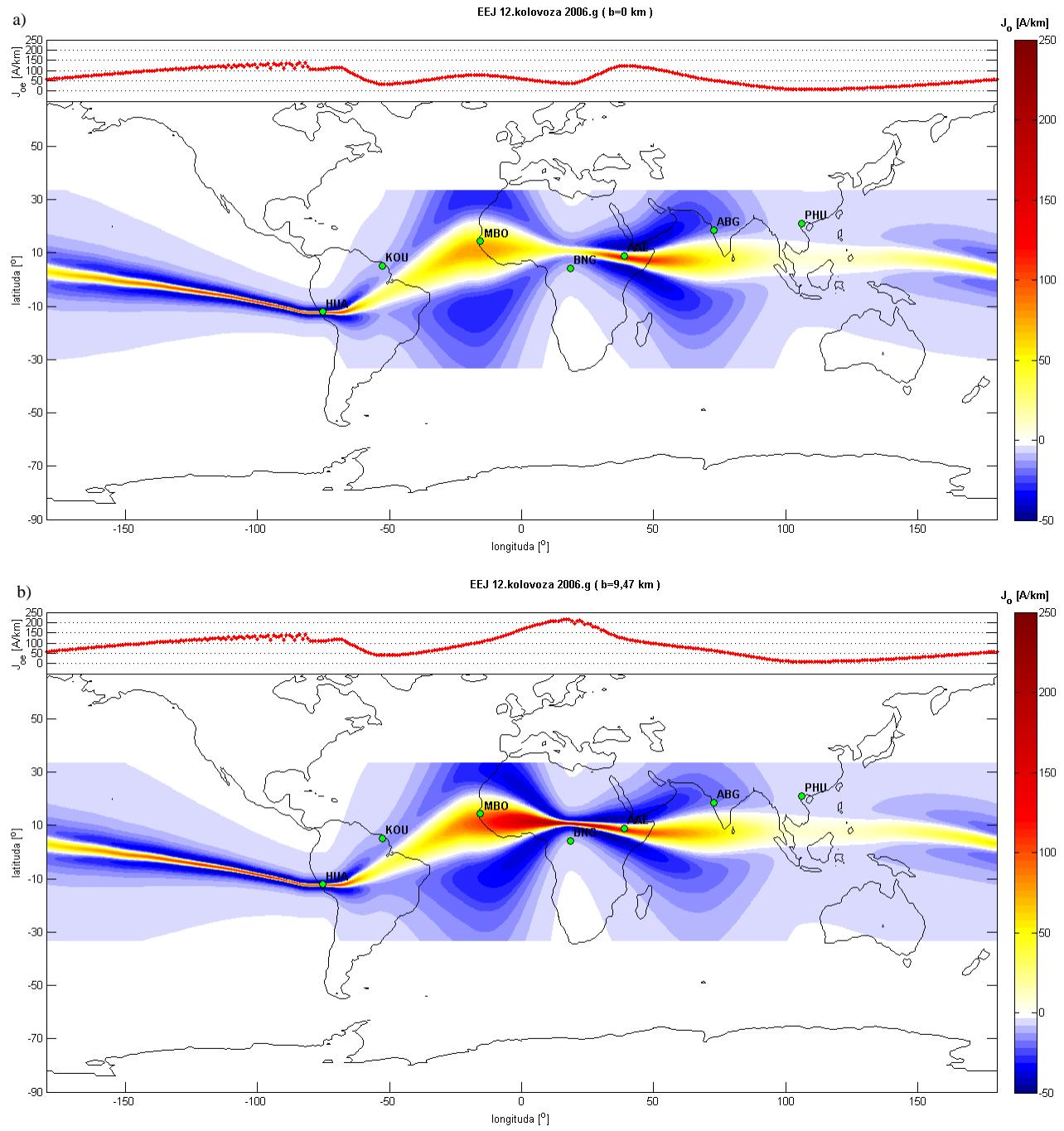
Na slici 29. razdiobe gustoće za 29. travnja primjećuju se dva područja gdje EEJ teče prilično širokim teritorijem, ali s različitim iznosom gustoće. Na području iznad Atlantske depresije (slika 18) gustoća struje je viša nego na području od  $\sim 50^\circ$  do  $\sim 100^\circ$  istočne geografske dužine, što vrijedi za obe vrijednosti parametra  $b$ . Znakovito je primjetiti kako za  $b = 9,47$  km (slika 29.b) iznad tri najistočnije postaje nema znakova povratnog elektromlaza, tj. CEJ. U slučaju beskonačno tanke struje, iznad opservatorija AAE, vidi se slaba razdioba CEJ sustava. Očekivano, najjači povratni elektromlaz pojavljuje se u područjima gdje je i EEJ najjači.



Slika 29. Superpozicija razdiobe gustoće EEJ 29. travnja 2006. a) Za vrijednost parametra  $b = 0 \text{ km}$  b) Za vrijednost parametra  $b = 9,47 \text{ km}$ .

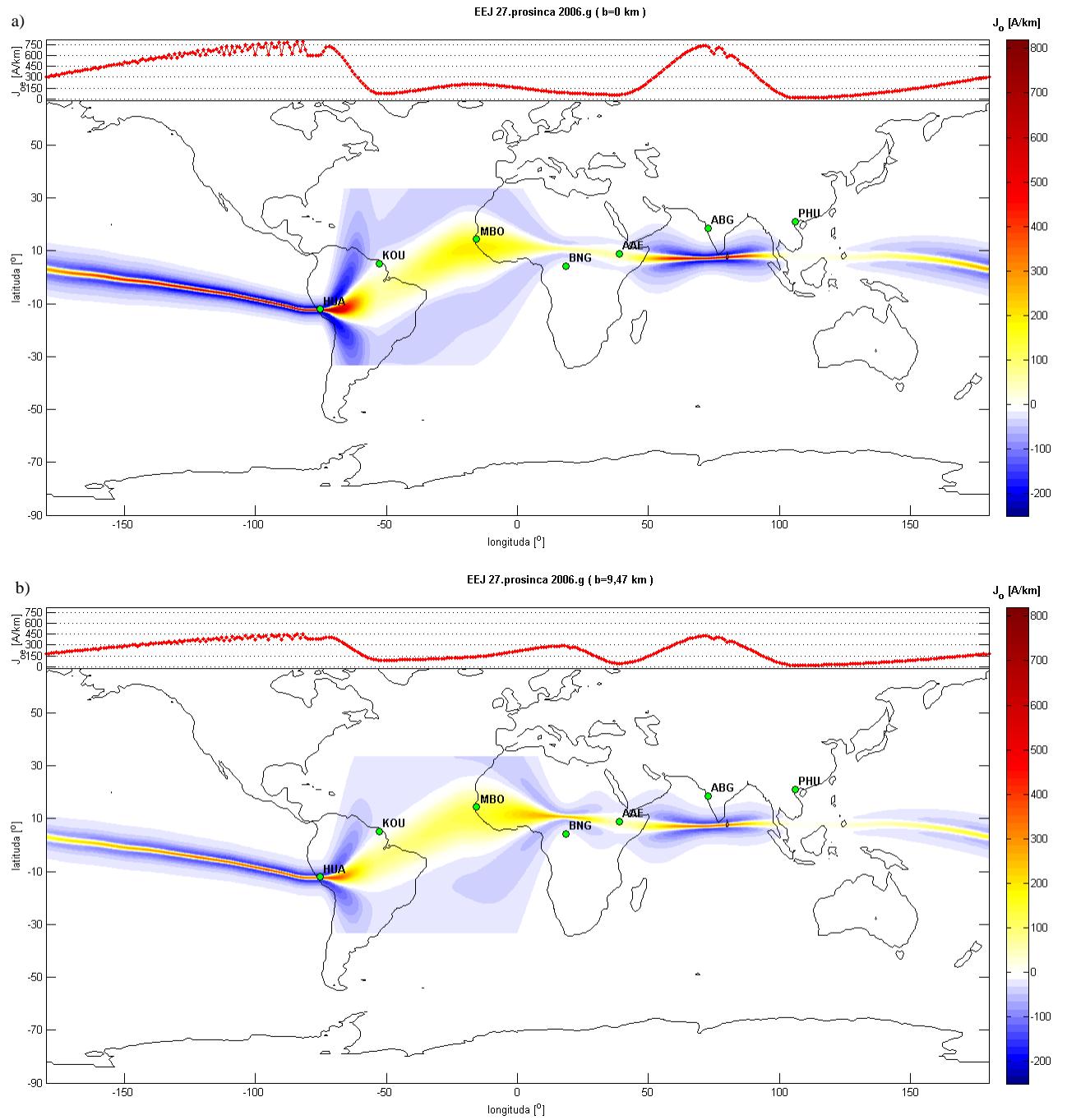
CEJ se javlja nakon HUA, gdje EEJ postaje uistinu tanki strujni mlaz izrazito velike gustoće. U slučaju beskonačno tanke strujne plohe gustoća mlaza je nešto veća ( $\sim 200 \text{ nT}$ ) nego kada se preko parametra  $b$  dopusti i širenje samog mlaza u visinu. Podsjetimo kako je parametar  $b$  povezan s poludebljinom (49), a iznos od  $9,47 \text{ km}$  je usvojen na osnovi raketnih mjerena iz [Onwumechili i sur., \(1989.\)](#).

Iznosi gustoće struje za 12. kolovoza 2006. (slika 30) poprimaju općenito niže vrijednosti nego za 29. travnja (slika 29). Za slučaj kada je  $b = 9,47 \text{ km}$  (slika 29 b) vidljivo je kako se iznad BNG opservatorija pojavljuje maksimum razdiobe gustoće, što nije slučaj kada je  $b = 0 \text{ km}$  (slika 29 a).



Slika 30. Superpozicija razdiobe gustoće EEJ 12. kolovoza 2006. a) Za vrijednost parametra  $b = 0 \text{ km}$  b) Za vrijednost parametra  $b = 9,47 \text{ km}$ .

Južnije od PHU opservatorija, na području jugoistočne Azije, EEJ poprima najmanju gustoću za ovaj dan. U slučaju beskonačno tanke strujne plohe na tom se području uopće ne javlja CEJ. Ponovno se uočavaju veliko proširenje distribucije EEJ na području zapadne Afrike i MBO opservatorija i naglo sužavanje mlaza nakon HUA opservatorija. Kao što se moglo predvidjeti, širina CEJ povezana je sa širinom EEJ, no povratni mlaz se ne javlja za niske vrijednosti gustoće. U slučajevima kada  $J_{0e}$  prelazi vrijednosti više od  $50 \text{ Akm}^{-2}$ , može se govoriti o pojavljivanju CEJ. To je vidljivo ako se pozornije pogledaju vrijednost distribucije gustoće duž geomagnetskog ekvatora iznad KOU opservatorija na slici 30. a) i b) i pripadna raspodjela CEJ na točnim geografskim koordinatama samog opservatorija.



Slika 31. Superpozicija razdiobe gustoće EEJ 27. prosinca 2006. a) Za vrijednost parametra  $b = 0 \text{ km}$  b) Za vrijednost parametra  $b = 9,47 \text{ km}$ .

Dana 27. prosinca 2006. (slika 31) također postoji proširenje EEJ na dužinama od  $\sim 10^\circ - 70^\circ E$  iznad zapadne Afrike, Atlantskog oceana i Južne Amerike, koji je usporediv s Atlantskom depresijom u glavnom polju (slika 18). Za vrijednosti parametra  $b = 0 \text{ km}$  (slika 31 a) iznosi gustoće povrh opservatorijskih mjerila MBO neznatno su veći, dok je iznos u longitudama HUA te ABG opservatorijskih mjerila, prosječno  $\sim 300 \text{ nT}$  viši. Područje širine  $\sim 30^\circ$  iznad Indonezije u longitudinalnim širinama opservatorijskog mjerila PHU pokazuje vrlo male vrijednosti distribucije gustoće EEJ. Slično kao i dosad, CEJ se javlja ako  $J_{oe}$  prelazi vrijednosti više od  $50 \text{ Akm}^{-2}$  te je najveći u latitudama računatima na osnovi mjerena iz HUA i ABG opservatorijskih mjerila. Zgodno je primjetiti kako EEJ slabi

na području jugoistočne Azije ( $\sim 90^\circ - 130^\circ E$ ) gdje se javlja maksimum horizontalne komponente (slika 19.), a ta je pojava uočljiva i 27. prosinca i 12. kolovoza (slika 30) te 29. travnja (slika 29).

## 10. Zaključak

Na osnovi podataka prikupljenih preko INTERMAGNET mreže i opservatorija ekvatorijalnog pojasa moguće je odrediti razdiobu gustoće ekvatorijalnog elektromlaza (EEJ). Kako je EEJ ionosferski strujni sustav, tijekom dana, na osunčanoj strani planeta, uz rotaciju Zemlje pojavljuje se oko 09 h po lokalnom vremenu te lagano dostiže maksimum oko lokalnog podneva, a nulte vrijednosti postiže oko 18 h po lokalnom vremenu. Problem je pri određivanju razdiobe gustoće EEJ osim malog broja opservatorija, njih sedam unutar ekvatorijalnog pojasa, i količina geomagnetskih mirnih dana. Iako broj opservatorija ograničava izračun razdiobe strujne gustoće, ne onemogućuje ga. Radi boljeg modeliranja strujnog sustava koji uzrokuje promjene polja na opservatorijima, bilo bi zgodno imati ravnomjernu distribuciju mjernih postaja duž cijelog ekvatorijalnog pojasa. Podjednak broj opservatorija s južne i sjeverne strane geomagnetskog ekvatora, te malo gušća mreža uvelike bi olakšali kontinuirano praćenje EEJ s površine Zemlje. Nedostatak se uočava pogotovu na području jugoistočne Azije, Indijskog i Tihog oceana. Mirne je dane potrebno izabrati kako bi se osiguralo da je dnevni hod izmјeren na postaji isključivo uzrok EEJ i solarno mirnih ( $Sq$ ) struja.

Mirni su dani u ovom radu odabrani preko Dst indeksa, gdje je 12 dana, po jedan u svakom mjesecu, ispunilo stroži kriterij nego što su predložili **Torta i sur., (1997.)** tj. interval  $Dst_+ \leq 1, Dst_- \geq -12$  i tako ušli u razmatranje. Dodana su još četiri dana na osnovi  $K_p$  indeksa, po jedan za svaku godišnje dobu. Geomagnetski poremećaji su izuzetno lokalnog karaktera, stoga su geomagnetski indeksi pogodni, ali ne i savršeni indikatori geomagnetskih poremećaja. Nažalost, kako oni ne reflektiraju u potpunosti raspon mogućih faktora koji utječu na magnetosferu i ionosferu, nužno je svaki dnevni magnetogram dodatno provjeriti. Vizualnom analizom magnetometara broj u potpunosti zadovoljavajućih dana sveo se na tri u cijeloj 2006. godini. Važno je napomenuti kako su ta tri dana odabrana zbog postojanja zadovoljavajućih dnevnih hodova istodobno na svih sedam promatranih opservatorija. Ostali prvo bitno odabrani dani, ako su imali mjerena, također su mogli ući u analizu te se iz njih mogla napraviti razdioba EEJ. No, račun EEJ bi u tom slučaju bio prilično nepouzdani i ne bi predstavljaо strujni mlaz koji je uzrok takve mjerene distribucije polja na opservatoriju. Na takav način bi se mogla dobiti po dijelovima zadovoljavajuća distribucija gustoće struje, dok povrh određenih opservatorija sam iznos EEJ ne bi odgovarao stvarnom stanju.

Retrogradnim se pristupom na osnovi mjerena magnetskog polja na opservatoriju može reproducirati strujni sustav u ionosferi koji uzrokuje takvo polje. Kako bi se to postiglo, nužno je

odabratи upravo geomagnetski mirne dane za koje se vjeruje da je njihov dnevni hod najvećim dijelom upravo uzrok tih ionosferskih struja. Za dobivanje potpune slike, razdiobe gustoće EEJ duž geomagnetskog ekvatora, potrebno je imati zadovoljavajuće podatke sa svih promatranih opservatorija za odabrani dan. Vrijeme u blizini lokalnog podneva, kada se javlja maksimum horizontalne komponente, trenutak je kada je intenzitet EEJ iznad opservatorija koji uzrokuje takav hod također maksimalan. Za opservatorije ekvatorijalnog pojasa dovoljno je promatrati hodove vertikalne i horizontalne komponente. Komponenta  $X$  približno je jednakih iznosa kao i  $H$  komponenta, no ono što je uočljivije jest činjenica kako  $X$  komponenta ima jednak izgled dnevnog hoda u usporedbi s  $H$  komponentom.

Distribucija gustoće EEJ prikazana je za tri najpogodnija dana u 2006., redom 29. travnja, 12. kolovoza i 27. prosinca. Model strujne distribucije, korišten za opisivanje longitudinalnog i latitudinalnog profila, kombinacija je guste struje (Onwumechili, 1967.) i empiričke funkcije slične Gaussovoj funkciji u središtu strujnog mlaza (Doumouya i sur., 2003.) koja pridodaje ovisnost o lokalnom vremenu. Kombinacija modela pokazuje kako je EEJ dobro opisiv na osnovi magnetskih mjerena na površini Zemlje. Naglasak na debljini EEJ nije bio u radu izražen, jer je raspodjela strujne gustoće računata samo za dvije vrijednosti parametra  $b$ . Računato je za  $b = 0$  km, što predstavlja beskonačno tanku strujnu plohu, te za  $b = 9,47$  km vrijednost parametra izračunatu na osnovi raketnih mjerena (Onwumechili i sur., 1989.). Unatoč tome što većina autora u svojim radovima poluširinu EEJ održava konstantnom, strujna je distribucija EEJ na osnovi površinskih mjerena i posebno organiziranih kampanja često bila računata samo za kraća ekvatorijalna područja.

Ovim je radom pokazano kako je EEJ moguće izračunati duž cijelog geomagnetskog ekvatora isključivo na osnovi podataka sa sedam ekvatorijalnih opservatorija. Račun pokazuje također kako osim očekivane promjene intenziteteta gustoće duž ekvatora, postoji i znatna promjena same širine EEJ mlaza. Posebno je zanimljivo primjetiti širenje mlaza počevši na prostorima zapadne Afrike, preko Atlantika do južnoameričkog kontinenta. EEJ se širi na područjima gdje se javlja minimum  $F$  komponente glavnog polja, što je vidljivo za svaki odabrani dan. Sami razlozi te pojave mogu biti predmet dodatnih studija, te bi bilo zanimljivo također usporediti razdiobu EEJ dobivenu na osnovi satelitskih mjerena s razdiobom izračunatom na osnovi površinskih mjerena.

Općenito govoreći, iznad Huancayo opservatorija u Peruu, EEJ poprima najviše vrijednosti koje idu od  $\sim 130 - 1000 \text{ Akm}^{-1}$ . Rigoti i sur. (1999.) su na osnovi specijalno organizirane kampanje početkom 90-ih prošlog stoljeća iz površinskih mjerena tijekom odabranih 16 mirnih dana odredili prosječnu vrijednost strujne gustoće EEJ. Iznos strujne gustoće od  $177,7 \text{ Akm}^{-1}$

sa standardnom devijacijom od  $38,86 \text{ Akm}^{-1}$  dobili su u slučaju beskonačno tanke struje ( $b = 0 \text{ km}$ ). Njihova su mjerena obavljana unutar sjever-sjeveroistočnog dijela Brazila, što je usporedivo s latitudinalnim širinama opservatorija KOU u sklopu ovog rada.

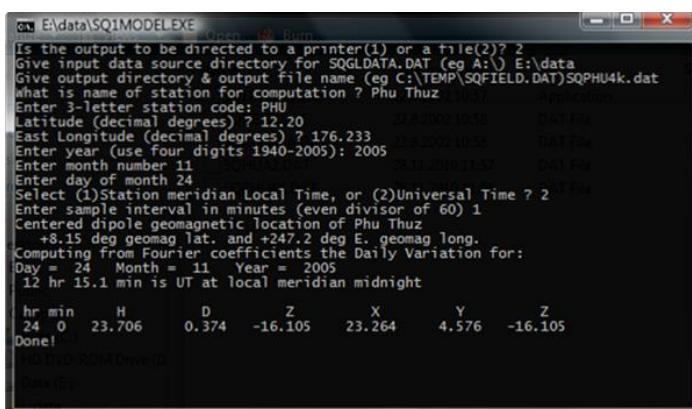
Vrijednosti su iznad opservatorija KOU, kao što je vidljivo sa slika 29 – 30, usporedive, unatoč tome što EEJ sa svojom distribucijom pokazuje izuzetnu osjetljivost na aktualne uvjete unutar ionosfere, te se iznosi razlikuju od dana do dana. S druge strane, zbog premalog broja zadovoljavajućih dana unutar ovog računa nije moguće napraviti statističku procjenu za općenite vrijednosti iznad pojedinih opservatorija. EEJ, uz pomoć ovakvog pristupa. Trebalo bi ovakvim pristupom EEJ promatrati duži niz godina, kako bi se dobio statistički relevantan uzorak zadovoljavajućih mirnih geomagnetskih dana na svim opservatorijima ekvatorijalnog pojasa radi dobivanja općenite slike.

## Dodatak 1: Modeli

### SQ1 model

Zbog eliminacije doprinosa varijacija solarno mirnog polja korišten je model SQ1, koji su razvili [Campbell i sur. \(1989.\)](#). Njihov model računa procjene dnevnih varijacija geomagnetskog polja kod bilo koje lokacije na Zemlji. Model je razvijen uz upotrebu podataka koji su skupljani po globalnoj distribuciji opservatorija, tijekom najmirnijih dana ekstremno mirne geomagnetske 1965. godine. Godišnje varijacije su dobivene upotrebom Fourierove analize dnevnih Fourierovih koeficijenata odabranih mirnih dana. Ti su koeficijenti izglađeni po latitudama i longitudama kako bi stvorili prirast u globalnim podatcima. Ti koeficijenti se redovito obnavljaju i svakih pet godina se na internetu može naći datoteka SQGLDATA.DAT koja sadrži najsvežije vrijednosti koeficijenata.

Program SQ1MODEL zajedno s pripadajućom datotekom koeficijenata dostupan je na internetskoj stranici: [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geom\\_util/sq1.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geom_util/sq1.shtml). Primjer programa prikazan je na slici ispod:



The screenshot shows a Windows command-line interface window titled 'E:\data\SQ1MODELEXE'. The window contains the following text:

```
Is the output to be directed to a printer(1) or a file(2)? 2
Give input data source directory for SQGLDATA.DAT (eg A:\) E:\data
Give output directory & output file name (eg C:\TEMP\SQFIELD.DAT)SQPHU4k.dat
What is name of station for computation ? Phu Thuz
Enter 3-Letter station code: PHU
Latitude (decimal degrees) ? 12.20
East Longitude (decimal degrees) ? 176.233
Enter year (use four digits 1940-2005): 2005
Enter month number 11
Enter day of month 24
Select (1)Station meridian Local Time, or (2)Universal Time ? 2
Enter sample interval in minutes (even divisor of 60) 1
Centered dipole geomagnetic location of Phu Thuz
+8.15 deg geomag lat. and +247.2 deg E. geomag long.
Computing from Fourier coefficients the Daily Variation for:
Day = 24 Month = 11 Year = 2005
12 hr 15.1 min is UT at local meridian midnight
hr min H D Z X Y Z
24 0 23.706 0.374 -16.105 23.264 4.576 -16.105
Done!
```

Pri pokretanju programa može se odabrati bilo koji višekratnik jedne minute kao vremenski niz (LT ili UTC vremena) te ispis na printer ili u po volji odabranu datoteku. Vrijednosti longituda (latituda) trebaju biti pozitivne za istočne (sjeverne) i negativne za zapadne (južne) longitude (latitude).

### IGRF model

Međunarodno udruženje geomagnetizma i aeronomije (eng. *International association of geomagnetism and aeronomy* – IAGA) objavilo je jedanaestu generaciju Međunarodnog geomagnetskog referentnog polja IGRF (eng. *International geomagnetic reference field*). To je posljednja verzija standardnog matematičkog opisa Zemljinoga glavnog magnetskog polja koja se koristi u studijama Zemljine duboke unutrašnjosti, njezine kore, ionosfere i magnetosfere. Razvijen je suradničkim radom nekoliko institucija zaduženih za prikupljanje i raspodjelu mjerjenja

geomagnetskog polja na osnovi opservatorijskih, brodskih, avionskih i satelitskih mjerena kao i drugih specijalno organiziranih kampanja.

IGRF model je empirička reprezentacija glavnog polja Zemlje, tzv. polja jezgre bez vanjskih utjecaja te uključuje njegove godišnje varijacije. U područjima bez izravnih izvora na Zemljinoj površini te iznad nje, glavno je polje, s uzrocima iz unutrašnjosti Zemlje, negativni gradijent skalarног potencijala  $V$  koji se može prikazati preko skraćenog oblika razvoja u red:

$$V(r, \Theta, \lambda, t) = R \sum_{n=1}^{n_{max}} \left(\frac{R}{\gamma}\right)^{n+1} \sum_{m=0}^n (g_n^m(t) \cos m\lambda + h_n^m(t) \sin m\lambda) P_n^m(\Theta) \quad (78)$$

Jedanaesta generacija IGRF koeficijenata računa se prema koeficijentima koje su predložili sudionici IAGA radne skupine V-MOD. Program s pripadajućim koeficijentima može se naći na internetskoj stranici: <http://www.ngdc.noaa.gov/IAGA/vmod/igrf.html>. Pri pokretanju program traži kao ulaz nekoliko parametara. Zahtijeva latitudu i longitudu odabrane pozicije na Zemlji za koju se žele izračunati vrijednosti polja, te datum u decimalnom obliku. Jedanaesta generacija IGRF modela dopušta kao ulazno vrijeme bilo koji trenutak od 1900. do 2010.

## Dodatak 2: Programi

### **ReadMinB.m**

Matlab funkcija „ReadMinB.m“ učitava datoteke s ekstenzijom „.min“ koje se preuzimaju u INTERMAGNET standardiziranom formatu. ReadMinB funkcija učitava podatke, formatira datoteku tako da miće zaglavljne datoteke, redak s informacijama o tome što se nalazi u pojedinom stupcu označava oznakom „%“, što u sintaksi Matlaba predstavlja komentar, te sve pohranjuje u datoteku s istim nazivom, ali s ekstenzijom „.txt“. Na takav način dobivam tablicu s podacima koji su pripremljeni za dalju analizu. Tablica se sastoji od 1 440 redaka, u kojima su vrijednosti jednominutnih srednjaka mjerena na opservatoriju, i sedam stupaca. U prva tri stupca se nalaze informacije o datumu i vremenu mjerena te šifra opservatorija, koji meni nisu potrebni.

Svaka od datoteka imenovana je tako da su iz samog naslova vidljivi šifra postaje i nadnevak mjerena u formatu XYZGGGGMMDD.txt, gdje XYZ predstavlja troslovnu standardiziranu šifru postaje po INTERMAGNET protokolu, GGGG predstavlja godinu mjerena, MM mjesec i DD dan mjerena. Drugi stupac su vremena mjerena na samom opservatoriju koji su jednominutni srednjaci te ih u 24 sata ima točno 1 440, što mi pomaže u samom indeksiranju redaka, te mi je taj stupac nepotreban. Treći stupac sa šifrom opservatorija također mi je nepotreban. U sljedeća četiri stupca redom se nalaze mjereni podaci za  $X$ ,  $Y$ ,  $Z$  i  $F$  komponentu.

## **XYZ–kroz\_godinu-sve-stacked.m**

Matlab skripta koja crta dnevne hodove odabrane postaje kroz godinu. XYZ predstavlja šifru u tom trenutku promatrane postaje. Tako npr.u slučaju obrade dnevnih jednominutnih podataka s postaje Huancayo u Peruu, čija je međunarodna šifra HUAm korišten je program HUA–kroz\_godinu-sve-stacked.m.

## **Priprema\_XYZ.m**

Matlab program koji obrađuje određenu postaju prezentiranu troslovnom šifrom umjesto XYZ. Na primjeru postaje BNG program se zove Priprema\_BNG.m. Program definira intervale parametara i korak varijacije za svaki opservatorij posebno.

## **Eej\_varparB.f90**

Zbog potrebe za numeričkom točnošću i velikim brojem računa, program koji traži minimum odstupanja između teorijske i mjerene vrijednosti modela na osnovi jednadžbe (74), napravljen je u programskom jeziku fortran. On varira parametre unutar unaprijed zadanih intervala, te traži kombinaciju za koju je najbolje ispunjen uvjet (75), tj. kombinaciju za koju je ostvaren minimum.

## **EEJ\_superpozicija\_F.m**

Program u programskom jeziku Matlab računa na osnovi ulazne datoteke parametri.txt razdiobu strujne gustoće po geomagnetskom ekvatoru. Koordinate geomagnetskog ekvatora nalaze se u datoteci M.txt. Datoteka s vrijednostima parametara za promatrani dan u retcima treba imati redom: latitudu opservatorija,  $\alpha, \alpha$  i  $K$ , dok se u stupcima nalaze vrijednosti parametara po opservatorijima složenih od zapada prema istoku.

## Literatura

- Allaby, M. (Ed.), (2008): A dictionary of Earth Sciences, Oxford University Press.
- Amory-Mazaudier, C., Vila, P., Achache, J., Achy Sveka, A., Albouy, Y., Blanc, E., Boka, K., Bouvet, J., Cohen, Y., Dukhan, M., Doumouya, V., Fambitakoye, O., Gendrin, R., Goutelard, C., Hamoudi, M., Hanbaba, R., Hougninou, E., Huc, C., Kakou, K., Kobea-Toka, A., Lassudrie-Duchesne, P., Mbipom, E., Menvielle, M., Ogunade, S.O., Onwumechili, C.A., Oyinloye, J.A., Rees, D., Richmond, A., Sambou, E., Schmuker, E., Tirefort, J.L., Vassal, J., (1993): International equatorial electrojet year: the African sector, *Revista Brasileira de Geofísica*, **11**, 303–317 (Especial).
- Arora, B.R., Mahashabde, M.V., Kalra, R., (1993): Indian IEEY geomagnetic observational program and some preliminary results, *Brazilian Journal of Geophysics*, **11** (3), 365–384.
- Backus, G.E., (1970): Non-uniqueness of the external geomagnetic field determined by surface intensity data, *Journal of Geophysical research*, **A75**, 6339-6341.
- Baker, W.G., Martyn, D.F., (1952): Conductivity of the ionosphere, *Nature*, **170**, 1090-1092.
- Baker, W.G., Martyn, D.F., (1953): Electric currents in the ionosphere, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A246**(913), 281-320.
- Bartels, J., Heck, N.H., Johnston, H.F., (1939): The three hourly range index measuring geomagnetic activity, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, **44**(4), 411.
- Bartels, J., (1949) The standardization index K<sub>s</sub> and the planetary index K<sub>p</sub>, *IATME Buletin (IUGG)* **12b**, 97.
- Benoît St-Louis (Ed.) (2008): Intermagnet technical reference manual, Version 4.4.
- Campbell, W. H., (1979) Occurrence od AE and Dst geomagnetic index levels and the selection of the quietest days in a year, *Journal of Geophysical research*, **84**, 875-881.
- Campbell, W. H., Schiffmacher, E. R., Kroehl, H. W., (1989): Global quiet day field variation model WDCA-SQ1, *Eos Transactions - American Geophysical Union*, **70**, 66 & 74.
- Campbell, W. H., (1996a): Geomagnetic storms, the Dst ring-current myth and lognormal distribution, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **58**, 1171-1187.
- Campbell, W. H., (1996b): Dst is not a pure ring current index, *Eos Transactions - American Geophysical Union*, **77**, 283.
- Chapman, S., Bartels, J., (1940): Geomagnetism, Clarendon Press, Oxford.

- Chapman, S., (1951): The equatorial electrojet as detected from the abnormal electric current distribution above Huancayo, Peru and elsewhere, *Archiv fuer Meteorologie, Geophysic und Bioclimatologie*, **A44**, 368–390.
- Constable, C.G. & Constable, S.C. (2004): Satellite magnetic field measurements: Applications in studying the deep Earth, *The State of the Planet: Frontiers and Challenges in Geophysics, Geophys. Mono. 150*, ed. R.S.J. Sparks and C.T. Hawkesworth, American Geophysical Union, 147–159.
- Davis, T. N., Burrows, K., Stolarik, J. D., (1967): A latitude survey of the equatorial electrojet with rocket-borne magnetometer, *Journal of Geophysical research*, **72**, 1845–1861.
- Doumouya, V., Vassal, J., Cohen, Y., Fambitakoye, O., Menvielle, M., (1998): The equatorial electrojet: :rst results from magnetic measurement, *Annales de Geophysicae*, **16**, 658–676.
- Doumouya, V., Cohen, Y., Arora, B.R., Yumoto, K., (2003): Local time and longitude dependence of the equatorial electrojet magnetic effects, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, **65**, 1265–1282.
- Duhau, S., Romanelli, L., (1979): Electromagnetic induction at the South American geomagnetic equator as determined from measured ionospheric currents, *Journal of Geophysical research*, **84**, 1849–1854.
- Fambitakoye, O., Mayaud, P. N., (1976): Equatorial electrojet and regular daily variation SR-I, A determination of the equatorial electrojet parameters, *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics*, **38**, 1–17.
- Fukunishi, H., Toya, T., Koike, K., Kuwashima, M., Kawamura, M., (1981): Classification of hydromagnetic emissions based on frequency-time spectra, *Journal of Geophysical research*, **86**, 9029–9039.
- Glatzmaier, G.A., Roberts, P. H., (1995): A three-dimensional self-consistent computer simulation of a geomagnetic field reversal, *Nature*, **377**, 203–209.
- Kangas, J., Aikio, A., Olson, J. V., (1986) Multistation correlation of ULF pulsations spectra associated with sudden impulses, *Planetary and Space Science*, **34**, 543–.
- Harang, L., (1936): Oscillations and vibrations in magnetic records at high-latitude stations, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, **41**, 329–.
- Hayakawa, M., Shimakura, S., Kobayashi, T., Sato, N., (1992): A study of polarization of irregular pulsations of diminishing period and their generation mechanism, *Planetary and Space Science*, **40**, 1081–1091.

- Jackson, A., Jonkers, A.R., Walker, M., (2000): Four centuries of geomagnetic secular variations from historical, *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, **A359**, 957-990.
- Jacobs, J.A., (1987): Geomagnetism, Vol 1., Academic Press, Inc.
- Joselyn J.A., (1989): Geomagnetic quiet day selection, *Pure and Applied Geophysics*, **131**(3), 333-341.
- Kerridge, D., (2001): Intermagnet: worldwide near-real-time geomagnetic observatory data, *Proceedings of the Workshop on Space Weather*, ESTEC.
- Lanzerotti L. J., Langel R. A., & Chave, A. D., (1993): Geomagnetism, *Encyclopedia of applied physics*, **7**, 109–23.
- Mayaud, P.N., (1980): Derivation Meaning and Use of Geomagnetic Indicies, *Geophysical Monograph*, **22**, AGU Washington, DC.
- Needham, J. (1962): Science and civilisation in China, **4**(1), Cambridge University press, Cambridge, UK.
- Nierenberg, W. A. (Ed.), (1992): Encyclopedia of Earth System Science, **2**, Academic Press, Inc.
- Olson, J. V., Lee, L. C., (1983): Pc 1 wave generation by sudden impulses, *Planetary and Space Science*, **31**, 295-.
- Onwumechilli, C.A., (1967): Geomagnetic variations in the equatorial zone, *Physics of the geomagnetic phenomenon*, **1**(III-2), 425–507, ed Matsushita, S. & Campbell, W.H., Academic Press, New York.
- Onwumechili, C. A., Agu, C. E., (1982): Regional variations of equatorial electrojet parameters, *Annales de Geophysique*, **38**, 307-313.
- Onwumechili, C. A., Ozoemena, P. C., Agu, C. E., (1989): Landmark values of equatorial electrojet current and magnetic field along a meridian near noon, *Journal of Geomagnetism and Geoelectricity*, **41**, 443–459.
- Plummer, C.C., McGeary, D., Carlson, D.H., (2001): Physical Geology - Updated 8th ed, McGraw-Hill.
- Rigoti, A., Chamalaun, F. H., Trivedi, N. B., Padilha, A. L. (1999): Characteristics of the Equatorial Electrojet determined from an array of magnetometers in N-NE Brazil, *Earth Planet and Space*, **51**, 115-128.
- Sangalli, L., Knudsen, D. J., Larsen, M. F., Zhan, T., Pfaff, R. F., Rowland, D. (2009): Rocket-based measurements of ion velocity, neutral wind, and electric field in the collisional transition region of the auroral ionosphere, *Journal of Geophysical research*, **114**, A04306.

Shirley, J.H.; Fairbridge, R.W., (Eds.) (1997): Encyclopedia of Planetary Sciences, pp. 1020. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.

Siebert, M., (1971): Maßzahlen der erdmagnetischen Aktivität, Handbuch der Physik, **49**(3), 206-275, Springer, Berlin Heidelberg.

Stewart, B., (1882): Terrestrial Magnetism, Encyclopedia Britannica, 9th ed., 36pp.

Subbaraya, B.H., Muralikrishna, P., Sastry, T. S. G. i Prakash, S., (1972): A Study of the Structure of Electrical Conductivities and the Electrostatic Field within the Equatorial Electrojet, *Planetary and Space Science*, **20**, 47-52.

Sucksdorff, E., (1936): Occurrence of rapid micropulsations at Sodankylä during 1932 to 1935, *Terrestrial Magnetism and Atmospheric Electricity*, **41**, 337-.

Torta, J. M., Curto, J. J., Bencze, P., (1997): Behaviour of the quiet day ionospheric current system in the European region, *Journal of Geophysical research*, **102**, A2, 2483-2494.

Vassal, J., Menvielle, M., Cohen, Y., Dukhan, M., Doumouya, V., Boka, K., Fambitakoye, O., (1998): A study of transient variations in the Earth's electromagnetic field at equatorial electrojet latitudes in western Africa (Mali and the Ivory Coast), *Annales Geophysicae*, **16**, 677–697.

Wanliss, J. A., & K. M. Showalter (2006): High-resolution global storm index: Dst versus SYM-H, *Journal of Geophysical research*, 111, A02202.

### **Linkovi :**

1. [http://son.nasa.gov/tass/magnetosphere/ob\\_kp.htm](http://son.nasa.gov/tass/magnetosphere/ob_kp.htm)
2. [http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp\\_index/index.html](http://www-app3.gfz-potsdam.de/kp_index/index.html)
3. [http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp\\_ap.html](http://www.ngdc.noaa.gov/stp/GEOMAG/kp_ap.html)
4. <http://www.swpc.noaa.gov/info/Kindex.html>
5. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/geomag/ae.html>
6. Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia - Roma2 Department :  
<http://roma2.rm.ingv.it/en/>
7. <http://www.ngdc.noaa.gov/stp/IONO/ionostru.html>
8. [http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geom\\_util/sq1.shtml](http://www.ngdc.noaa.gov/geomag/geom_util/sq1.shtml)
9. Ionosphere and magnetosphere. (2009) Encyclopedia Britannica. from Encyclopædia Britannica Online:

<http://www.britannica.com/EBchecked/topic/1369043/ionosphere-and-magnetosphere>

10. The magnetopause, Iver Cains:

<http://www.physics.usyd.edu.au/~cairns/teaching/lecture14/node3.html>

11. <http://www.glossary.oilfield.slb.com/Display.cfm?Term=forward%20modeling>

## Zahvala

Ne mogu jednostavno napisati niti dovoljno riječima zahvaliti na strpljenju, potpori, savjetima i ljubavi tijekom čekanja ovog trenutka. Dvije osobe su tu odigrale pravo veliku ulogu. Veliko **HVALA** mojoj Miki koju volim do neba! Jednostavno savršenstvo si bez mane. Tvoje riječi su mi puno puta pomogle. A moja majka, sreća moja velika, što mi je utjeha i potpora. Hvala ti što si tu, uz mene i što smo skupa i hrabriji i ponosniji i veseliji. Volim te!

Zahvaljujem mojoj mentorici Giulli, na potpori i čitavom radu. Takoder veliko hvala Slaviši i Eugenu na savjetima, razgovorima, idejama i razmišljanjima. Na programiranju, crtanju, kavama, pivama, čajevima i raspravama. Rasprave do kasno u noć i razmišljanja s Vama su mi puno značili.

A tek seka i moji dragi ameri... Hvala Vam što me volite i što nikad niste sumnjali u mene. I ja Vas sve volim. I moju Lanchi, i Eddija i Dadu/Ćosu/Jay ... i moju sekru. Za nju će uvijek biti posebno mjesto u mom srcu.

A za ostatak ekipe, i što sam sve naučio na fakusu i oko njega, nemam ništa reći. Hvala svim mojim dragim Ćumeznerima i onima koji to nisu ali su sličnog stanja uma, kako sadašnjim tako i onim prošlim. Uz vas je studiranje bilo puno ugodnije, inspirativnije i poučnije. Drago mi je što sam s Vama mogao raditi na raznim projektima, realizacijama ideja, akcijama, predavanjima, ljetnim školama. A da ne spominjem sve kolege u klupskim rovovima i one van njih, pa zajednička pripremanja za ispite i kolokvije (kojih doduše i nismo imali, pa ne znam zašto ih uopće spominjem), roštiljanje, nogomet, frizbi, badminton... izlaske, druženja, igre ... uh... kad se sjetim. Dosta... Hvala! Svi ste mi zajedno pomogli da postanem ovakav kakav i jesam. Zahvaljujući Vama sam naučio što ni jedan tečaj ili škola mogu ponuditi.

I stvarno ne mogu i neću zaboraviti... hvala Ireni! Ti znaš zašto (-;

Za kraj, nije da planiram otići negdje, pa kako ovo ne bi postalo neko oproštajno pismo prestajem. Hang loose svima, vidimo se okolo ☺

HVALA!

Vaš Boki