

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO - MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Tomislava Hojsak

**UTJECAJ BRZIH STRUJA SUNČEVA VJETRA NA
MAGNETOSFERU ZEMLJE**

Diplomski rad

Voditelj: doc. dr. sc. Giuliana Verbanac

Zagreb, 2011.

Sadržaj

UVOD	1
1. SUNCE	3
1.1. STRUKTURA SUNCA	4
1.1.1. Unutrašnjost Sunca	5
1.1.1.1. Jezgra	5
1.1.1.2. Radijativna zona	6
1.1.1.3. Granični sloj	7
1.1.1.4. Konvektivna zona	7
1.1.2. Sunčeva atmosfera	8
1.1.2.1. Fotosfera	8
1.1.2.2. Kromosfera	10
1.1.2.3. Prijelazno područje	12
1.1.2.4. Korona	12
1.2. MAGNETSKA AKTIVNOST	15
1.2.1. Sunčevo magnetsko polje	15
1.2.2. Sunčeva aktivnost	17
1.2.2.1. Sunčeve pjege	17
1.2.2.2. Koronine strujnice	20
1.2.2.3. Prominencije	20
1.2.2.4. Sunčevi bljeskovi	22
1.2.2.5. Koronini izbačaji mase	24
1.2.2.6. Sunčeve energetske čestice	29
1.3. SUNČEV VJETAR	31
1.3.1. Brzi i spori vjetar	33
1.3.2. Svojstva čestica Sunčevog vjetra	34
1.3.3. Magnetsko polje u heliosferi	36
1.3.4. Sunčev vjetar u vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti	37
1.3.5. Sunčev vjetar u vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti	38

1.3.6. Sunčev vjetar u interplanetarnom prostoru	39
2. ZEMLJA	41
2.1. ZEMLJINO MAGNETSKO POLJE	41
2.2. MAGNETOSFERA	43
2.2.1. Magnetosferska električna polja	46
2.2.2. Magnetosferske struje	47
2.2.3. Magnetosferska plazma	50
2.3. GEOMAGNETSKA AKTIVNOST	53
2.3.1. Geomagnetski indeksi	54
2.3.2. Dinamika magnetskih podoluje i oluja	59
2.3.2.1. <i>Magnetske podoluje</i>	59
2.3.2.2. <i>Magnetske oluje</i>	61
2.3.2.3. <i>Periodične i neperiodične magnetske oluje</i>	63
2.3.3. Varijabilnost geomagnetske aktivnosti	65
3. UTJECAJ BRZIH TOKOVA SUNČEVOG VJETRA NA GEOMAGNETSKU AKTIVNOST	67
3.1. Podaci	68
3.2. Metoda	73
3.3. Rezultati	76
3.3.1. <i>Korelacije između geomagnetskih indeksa</i>	76
3.3.2. <i>Korelacije površina koroninih šupljina i geomagnetskih indeksa</i>	77
3.3.3. <i>Korelacije parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa</i>	81
3.3.4. <i>Usporedba rezultata za 2005. i 2006. godinu</i>	92
3.3.5. <i>Diskusija rezultata</i>	95
3.4. Zaključak	100
Prilog	104
Literatura	105

Zahvaljujem doc. dr. sc. Giuliani Verbanac na usmjeravanju, savjetima i strpljenju.
Zatim i prof. dr. sc. Davorki Herak i doc. dr. sc. Zoranu Pasariću na savjetima.

Zahvaljujem svojoj obitelji na podršci, strpljivosti i vjeri u mene.

UVOD

Interplanetarni prostor je ispunjen magnetskim poljem, materijom, energijom i aktivnošću čije je izvoriste na Suncu. Sunčev vjetar (tok Sunčeve plazme i Sunčevog magnetskog polja u intrplanetarni prostor) prenosi Sunčevu energiju kroz cijeli Sunčev sustav. Do Zemlje stiže za 3-4 dana, gdje u međudjelovanju s geomagnetskim poljem dolazi do prijenosa energije Sunčevog vjetra u planetarnu magnetosferu. Disipacijom energije u magnetosferi dolazi do pojave geomagnetske aktivnosti koja se manifestira kao magnetske oluje i podoluje. Jedini vidljivi znak geomagnetske aktivnosti u Zemljinoj magnetosferi je polarna svjetlost (aurora). Sunčevi i magnetosferski procesi događaju se na nekoliko vremenskih skala: od 11 godišnjeg ciklusa aktivnosti i ostalih dugotrajnih varijacija, 27 dnevne periodične pojave aktivnosti zbog rotacije Sunca, dana (magnetske oluje), sati (magnetske podoluje), do minuta i sekundi (ubrzavanje plazme). Sunčeve dugoročne i kratkoročne promjene, te njihov utjecaj na Zemljinu okolinu nazivaju se Svemirsko vrijeme.

Svemirsko vrijeme predstavlja opasnost za satelite, astronaute i sustave na površini Zemlje na razne načine: 1) Zračenje i električko nabijanje satelita u orbiti može oštetiti kritične komponente letjelice, a predstavlja opasnost i za ljude u Svemiru; 2) Poremećaji u ionosferi ometaju navigacijske i komunikacijske sustave; 3) Ionosferske struje stvaraju električna polja na površini Zemlje koja mogu ometi rad energetske mreže i naftovoda. Porastom ljudske aktivnosti u Zemljinoj orbiti ekonomske i tehnološke posljedice Svemirskog vremena postaju sve značajnije pa se javlja sve veća potreba razumijevanja i predviđanja Svemirskog vremena. Kvaliteta mjerenih podataka dobivenih pomoću nove generacije satelita (Ulysses, SOHO, Yokoh, Wind, TRACE, RHESSI, Hinode, STEREO, ACE, GOES) omogućuje bolje razumijevanje procesa na Suncu i povezanosti sustava Sunce-Zemlja što je važno za točnije predviđanje geomagnetskih poremećaja. Izbjegavanje opasnih utjecaja Svemirskog vremena moguće je efikasnijim dizajnom

svemirskih letjelica ili efikasnijim sustavima predviđanja i upozorenja koji omogućuju pravovremene preventivne mjere.

Koronini izbačaji mase i brzi tokovi Sunčevog vjetra glavni su uzroci geomagnetske aktivnosti te je predviđanje njihovog javljanja jedan od glavnih aspekata proučavanja Svemirskog vremena. Učestalost javljanja koroninih izbačaja mase raste u vrijeme maksimalne Sunčeve aktivnosti te je geomagnetska aktivnost u tom periodu uglavnom posljedica utjecaja izbačaja mase. Učestalost javljanja brzih tokova Sunčeva vjetra, koji se javljaju sa periodom od 27 dana maksimalna je tijekom pada Sunčeve aktivnosti (oko 2 godine prije minimuma) te se geomagnetska aktivnost u tom periodu može pripisati brzim tokovima i korotirajućim područjima interakcije. Neperiodički brzi tokovi pokreću geomagnetsku aktivnost tijekom cijelog ciklusa, no ti efekti su puno slabiji od efekata periodičkih brzih tokova u vrijeme minimuma aktivnosti (Borovsky & Denton, 2006).

U ovom radu stavljen je naglasak na brze tokove Sunčevog vjetra koji su dominantan uzrok geomagnetske aktivnosti u padajućoj fazi Sunčevog ciklusa. Struktura diplomskog rada zamišljena je kao upoznavanje s procesima interakcije sustava Sunce-Zemlja. U prvom poglavlju opisana je struktura Sunca, Sunčeve atmosfere i atmosferskih pojava. U nastavku je opisano Sunčevo magnetsko polje i Sunčeva aktivnost koja nastaje kao posljedica promjene magnetskog polja. Jedna od posljedica procesa na Suncu je Sunčev vjetar koji određuje osnovno stanje Svemirskog vremena. Drugo poglavlje bavi se Zemljom i Zemaljskom magnetosferom te geomagnetskom aktivnošću kao posljedicom međudjelovanja Sunčevog vjetra i magnetosfere. Tu su opisani geomagnetski indeksi koji kvantificiraju geomagnetsku aktivnost te magnetske oluje i podoluje koje su manifestacija geomagnetske aktivnosti. U posljednjem poglavlju prikazana je veza brzih tokova Sunčevog vjetra i geomagnetske aktivnosti u cilju utvrđivanja geoeftektivnosti tokova Sunčevog vjetra u vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti. Izračunate su vrijednosti koeficijenata korelacije s vremenskim pomakom za najbolju korelaciju te su određeni pravci regresije između parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa za 2006. godinu. Zatim je napravljena usporedba s izračunatim vrijednostima iz 2005. godine. U prilogu se nalazi opis skripti korištenih u obradi i analizi podataka.

1. SUNCE

Sunce je prosječna zvijezda tipa žutog patuljka koja sadrži 98.6% ukupne mase Sunčevog sustava. Oko Sunca kruži osam planeta sa svojim mjesecima, deseci tisuća asteroida i milijarde kometa, a Zemlja se, kao treći planet od Sunca, nalazi na udaljenosti od 149 600 000 km (1 AJ). Sunce posjeduje 109 puta veći polumjer i 300 000 puta veću masu od Zemljine, zbog čega gravitacijska sila u unutrašnjosti stvara uvjete visokog tlaka i temperature. Visoke vrijednosti tlaka (10^{16} Pa) i temperature (15×10^6 K) u jezgri omogućuju pokretanje termonuklearnih reakcija. Neki od osnovnih podataka o Suncu nalaze se u tablici 1.

Tablica 1. Osnovni podaci o Suncu (preuzeto iz <http://www.wikipedia.org/wiki/Sun>).

Masa (10^{24} kg)	109 890 100
Radijus (km)	696 000
Gustoća (kg/m^3)	1 408
Površinska gravitacija (m/s^2)	274
Brzina oslobađanja (km/s)	617,6
Gustoća: Jezgra (10^5 kg/m^3)	1,6
Donja fotosfera (10^{-4} kg/m^3)	2
Korona (10^{-12} kg/m^3)	10
Temperatura: Efektivna (K)	5778
Korona (10^6 K)	5
Jezgra (10^6 K)	15,7

Sunčeva materija nalazi se u četvrtom agregacijskom stanju (plazma - kvazineutralni ionizirani plin). Zbog visokog tlaka i temperature u Sunčevoj unutrašnjosti atomske jezgre i elektroni su odvojeni te se slobodno gibaju kroz plin. Kao posljedica takvog stanja materije prosječna gustoća Sunca premašuje gustoću vode i iznosi oko $1\,400 \text{ kg/m}^3$ (Vujnović, 1994).

Sunčeva plazma sastoji se uglavnom od *H* i *He*, dok je učešće ostalih elemenata oko 2%. Sastav Sunca po masi: *H*(73.46%), *He*(24.85%), *O*(0.77%), *C*(0.29%), *Fe*(0.16%), *S*(0.12%), *Ne*(0.12%), *N*(0.09%), *Si*(0.07%), *Mg*(0.07%).

U središtu Sunca se svake sekunde oko 600 milijuna tona materije pretvara u energiju u procesu nuklearne fuzije. Toj količini materije odgovara izračena energija od $3,86 \times 10^{26} \text{ J/s}$.

Energija se emitira sa Sunca u obliku elektromagnetskog i čestičnog zračenja. Spektar Sunčeve iradijancije pokriva sve valne duljine od γ -zračenja, rendgenskog zračenja, ekstremnog ultraljubičastog zračenja (EUV), ultraljubičastog zračenja (UV), vidljive svjetlosti, infracrvenog i radio zračenja. No, najveći dio elektromagnetskog zračenja dolazi iz vidljivog i infracrvenog dijela spektra. Za vrijeme smanjene aktivnosti Sunce zrači uglavnom vidljivu svjetlost, dok zračenjem korone dominiraju EUV emisijski spektri ionizirane, vruće plazme. Emisije kraćih valnih duljina javljaju se u vrijeme pojačane Sunčeve aktivnosti kada se na Suncu javljaju bljeskovi koji ubrzavaju čestice do netermalnih energija. Čestično zračenje uglavnom se sastoji od protona i elektrona koji kontinuirano teku sa Sunca u svim smjerovima. Čestice većih energija nastaju prilikom erupcija bljeskova ili koroninih izbačaja mase.

Sunčevo magnetsko polje vrlo je promjenjivo, a na površini se javlja na ograničenim područjima gdje uzrokuje niz pojava kao što su pjege, bljeskovi, prominencije i koronini izbačaji mase.

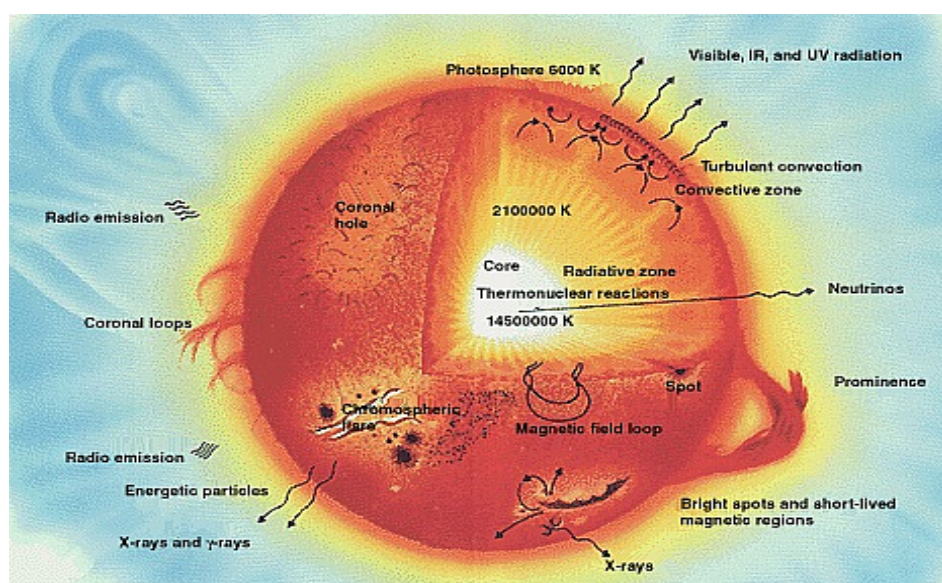
Pojava diferencijalne rotacije uobičajena je kod plinovitih tijela, zbog čega plin na Sunčevom ekvatoru rotira brže (25 dana) nego plin blizu polova (30 dana). Sunčeva os rotacije nalazi se pod kutom od $7,25^\circ$ prema osi Zemljine orbite te se Sunčevi polovi uglavnom ne vide sa Zemlje.

1.1. STRUKTURA SUNCA

Sunce i njegova atmosfera sastoje se od nekoliko slojeva ili zona. Sunčeva unutrašnjost sastoji se od jezgre, radijativne zone, tahokline i konvektivne zone, dok se atmosfera sastoji od fotosfere, kromosfere, prijelaznog područja i korone. Budući da u vanjskim predjelima Sunca gustoća materije opada eksponencijalno s udaljenošću, Sunce nema jasno definiranu granicu te se za površinu Sunca uzima prvi vidljivi sloj - fotosfera.

1.1.1. Unutrašnjost Sunca

Gustoća i temperatura plina postupno rastu prema unutrašnjosti. Na površini Sunca, gustoća je reda veličine 10^{-4} kg/m^3 , a temperatura iznosi oko 5 800 K. U jezgri, gustoća iznosi $1,6 \times 10^5 \text{ kg/m}^3$, a temperatura oko 15 milijuna K. Komprimirani, gusti plin u unutrašnjosti apsorbira svjetlost iz dubljih slojeva, zbog čega se Sunčeva unutrašnjost ne može direktno vidjeti. Struktura unutrašnjosti Sunca prikazana je na slici 1.



Slika 1. Presjek Sunca pokazuje unutrašnje slojeve Sunca.
(preuzeto iz <http://www.wikipedia.org/wiki/Sun>)

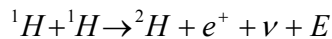
1.1.1.1. Jezgra

Jezgra se proteže od središta Sunca do $0.2 R_S$ (R_S , radijus Sunca). Zauzima samo 2% ukupnog volumena u kojem se nalazi gotovo polovica Sunčeve mase. Zbog visoke temperature i gustoće, tlak jezgre penje se i do 10^{16} Pa . Visoki tlak podupire težinu plina iznad jezgre i sprečava kolaps Sunca te pokreće proces proizvodnje energije nuklearnom fuzijom vodika u helij. Dok se u jezgri proizvodi gotovo sva energija, ostali slojevi Sunca zagrijavaju se energijom nastalom u jezgri i time postižu visoke temperature.

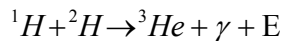
Budući da je plin u jezgri potpuno ioniziran apsorpcija fotona nastalih nuklearnim reakcijama je neznatna te raspršenje fotona na slobodnim elektronima predstavlja glavni način prijenosa energije u jezgri.

Fuzija vodika u helij događa se u 3 koraka u tzv. proton-proton lancu.

U prvom koraku, sudarom dvaju 1H jezgri nastaje izotop vodika 2H , uz oslobađanje pozitrona (e^+), neutrina (ν) i energije.



U drugom koraku jezgra izotopa 2H sudara se s jezgrom 1H , prilikom čega nastaje izotop 3He uz oslobađanje γ -zračenja i energije.



U posljednjem koraku sudarom dvaju jezgri 3He nastaje izotop 4He i dvije jezgre 1H , uz oslobađanje energije.



Oslobodena energija prenosi se prema površini na dva načina, zračenjem (radijativno) u jezgri i radijativnoj zoni te miješanjem (konvekcijom) u konvektivnoj zoni.

1.1.1.2. Radijativna zona

Radijativna zona je sferna ljuska iznad jezgre, koja se proteže od 0.2 do 0.7 R_s . Zauzima 32% volumena Sunca u kojem se nalazi 48% mase Sunca. Na dnu radijativne zone gustoća iznosi 22 g/cm^3 , a temperatura 8 milijuna K, dok na vrhu zone, gustoća pada na $0,2 \text{ g/cm}^3$, a temperatura na 2 milijuna K.

Budući da je temperatura radijativne zone niža od temperature jezgre, plin nije potpuno ioniziran te se energija osim raspršenjem prenosi i procesima apsorpcije i emisije. Kroz stabilne slojeve radijativne zone, neutrimi nastali nuklearnom fuzijom nesmetano prolaze, no γ -fotoni međudjeluju s materijom te im srednji slobodni put kroz radijativnu zonu iznosi nekoliko milimetara. Raspršenje fotona na slobodnim elektronima ili sudar s ionima radijativne zone glavni su procesi prijenosa energije kroz radijativnu zonu. Prilikom sudara s ionima dolazi do apsorpcije γ -fotona i reemisije fotona niže energije. Atomski procesi sprečavaju izravan prijenos energije na površinu te u mnogobrojnom

nizu emisija, apsorpcija i raspršenja, fotoni predaju energiju materiji radijativne zone. Pri tome dolazi do porasta kinetičke energije čestica što se odražava u visokoj temperaturi radijativne zone. Stalna apsorpcija i reemisija usporava foton te mu je potrebno oko 100 000 godina da prođe put od jezgre do površine. Na svom putu γ -foton gubi energiju i pretvara se u nekoliko milijuna fotona vidljive svjetlosti.

1.1.1.3. *Granični sloj (tahoklina)*

Tahoklina je prijelazno područje između radijativne i konvektivne zone. U tom području, gledajući od vrha prema dnu sloja, način kretanja fluida iz konvektivne zone polako nestaje, zbog čega na dnu vladaju mirni uvjeti slični onima u radijativnoj zoni. Uz to, vanjski konvektivni dijelovi Sunca rotiraju diferencijalno kao normalan fluid, dok unutrašnji radijativni dio rotira kao čvrsto tijelo. Zbog promjene brzine rotacije dolazi do jakog smicanja slojeva na području debljine samo $0.025 R_s$, što pogoduje indukciji jakih magnetskih polja.

1.1.1.4. *Konvektivna zona*

Vanjski sloj Sunca hladniji je i neprozirniji od unutrašnjih slojeva, zbog čega radijativni prijenos energije nije učinkovit te se javlja mehanizam prijenosa energije miješanjem. To je područje dizanja toplijeg i spuštanja hladnijeg plina koje se naziva konvektivna zona.

Proteže se od $0.7 R_s$ do površine Sunca te zauzima oko 66% ukupnog volumena u kojem se nalazi samo 2% ukupne mase. Na vrhu sloja gustoća iznosi oko 10^{-7} g/cm^3 , a temperatura oko 5 800 K.

Na dnu konvektivne zone temperatura iznosi 2 milijuna K što je dovoljno „hladno” da teži ioni (*C, N, O, Ca i Fe*) zadrže neke od svojih elektrona, zbog čega materijal postaje neprozirniji za zračenje i onemogućuje radijativni prijenos energije. Energija se gomila na dnu zone, zbog čega nastaju veliki negativni gradijenti temperature. Kada temperaturni gradijent (brzina kojom temperatura pada s visinom) postane veći od

adijabatskog gradijenta (brzina kojom bi temperatura volumena plina padala bez razmjene topline), zagrijani materijal postaje nestabilan te dolazi do konvekcije (dizanja toplog volumena plina na površinu). U površinskim slojevima Sunca konvektivno prenesena energija napušta Sunce u obliku zračenja ili valova (hidrodinamičkih, zvučnih).

Dokaz postojanja konvekcije vidljiv je na površini Sunca u obliku granulacije, malenih svijetlih područja okruženih uskim tamnim zonama. To su vrhovi konvekcijskih ćelija, mjehura vrućeg plina koji se dižu iz unutrašnjosti Sunca. Kada vrući plin stigne do površine, predaje toplinu okolini, hladi se i tone natrag u unutrašnjost gdje se ponovo zagrijava.

1.1.2. Sunčeva atmosfera

Atmosfera se sastoji od fotosfere, kromosfere, prijelaznog područja i korone. To je područje nagle promjene gustoće Sunca od gustog plina fotosfere do ekstremno rijetkih plinova interplanetarnog prostora. Iako gustoća pada s visinom, temperatura se ponaša drugačije. Odmah iznad fotosfere temperatura pada, ali ubrzo počinje rasti te u koroni iznosi nekoliko milijuna K.

Omjer plazme i običnog plina u atmosferi ovisi o temperaturi. Porastom temperature više atoma je ionizirano, pa se u najvišim dijelovima Sunčeve atmosfere gdje temperatura prelazi milijun K nalazi plazma. No, većina Sunčeve površine sastoji se od jednoatomnog plina, dok u hladnijim plegama mogu nastati i jednostavne molekule.

1.1.2.1. *Fotosfera*

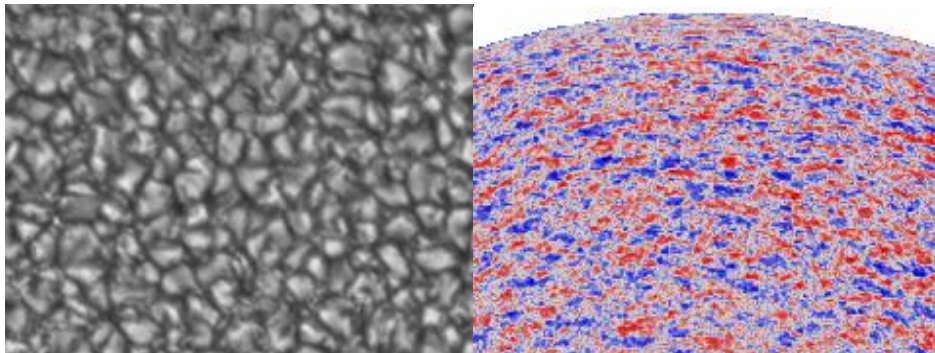
Fotosfera je prvi vidljivi sloj Sunca koji ne predstavlja niti unutrašnjost Sunca niti atmosferu. Iako debljina fotosfere iznosi samo 500 km, iz nje dolazi većina energije koju

Sunce izrači u prostor. Energija u obliku fotona vrlo lako napušta Sunce, budući da je ostatak atmosfere proziran i rijedak.

Temperatura u fotosferi pada s visinom; na dnu iznosi 6 400 K, a na vrhu 4 400 K. Efektivna temperatura sloja iznosi 5 800 K i uzima se za temperaturu površine Sunca. Prosječna gustoća fotosfere manja je od 10^{-6} g/cm³.

U fotosferi se mogu zamijetiti pravilna gibanja uzrokovana konvekcijom: granule, supergranule i oscilacije.

Granule (slika 2a) su vidljivi vrhovi granulacijskih ćelija u kojima izvire vrući plin iz unutrašnjosti, zbog čega imaju 400-500 K višu temperaturu od okolnog tamnijeg međugranularnog područja kroz koje ponire ohlađeni plin (Vujnović, 1994). Tok unutar granula može doseći nadzvučne brzine (<7 km/s) i proizvesti zvučne udare koji generiraju valove na Sunčevoj površini. Tipična granula ima polumjer 1 000 km, a traje 15-20 minuta.



Slika 2. Gibanja na površini Sunca uzrokovana konvekcijom; a) Fotosferske granule; b) supergranule (preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>).

Pravilna gibanja još većih dimenzija su supergranule (slika 2b), prosječnog polumjera 30 000 km. U središtu svake supergranule izvire vrući plin, dok na rubovima ponire ohlađeni plin. Brzine gibanja plina u supergranulama kreću se od nekoliko desetaka m/s do 1 km/s. Zajedno s plinom koji je djelomice ioniziran prenosi se i magnetsko polje, koje se zbog horizontalnog gibanja plina na površini koncentrira na rubovima supergranula (Vujnović, 1994).

Pravilno gibanje plina još većih dimenzija događa se u obliku oscilacija. Uzrok oscilacija su zvučni valovi koji nastaju u Suncu kao posljedica fluktuacija tlaka u

konvekcijskim ćelijama. Prilikom spuštanja ohlađenog plina, ćelije se snažno tresu i generiraju zvučne valove. Budući da fotosferski tlak i gustoća naglo padaju s visinom ne postoje uvjeti za širenje valova u atmosferu zbog čega se oni reflektiraju od površinskih slojeva i kreću natrag u unutrašnjost. Zbog porasta brzine zvuka i temperature s dubinom dolazi do refrakcije putanja valova te oni skreću prema površini gdje se ponovo reflektiraju. Taj se proces ponavlja sve dok valovi ne izgube energiju. Zarobljeni zvučni valovi potresaju Sunce zbog čega ono vibrira desecima tisuća modova odjednom, pri čemu je najistaknutiji pet minutni mod. Brzine plina u titraju mogu doseći oko 0.5 km/s.

Zvučni valovi koriste se za proučavanje unutrašnjosti Sunca te se pomoću njih određuje temperatura, gustoća, sastav i gibanje različitih slojeva Sunca. Područje izučavanja zvučnih valova na Suncu naziva se helioseizmologija.

Osim pravilnih gibanja, u fotosferi se javljaju i znaci Sunčeve aktivnosti u obliku Sunčevih pjega.

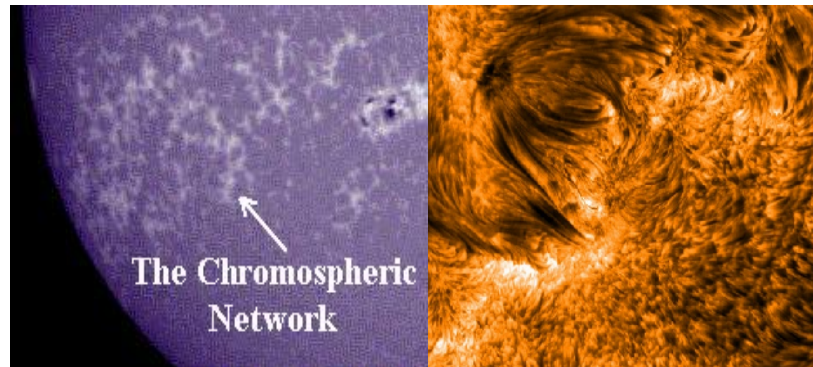
1.1.2.2. *Kromosfera*

Iznad fotosfere prostire se tanki, nepravilni sloj tzv. donja atmosfera ili kromosfera. Debljina kromosfere je promjenjiva i ovisi o položaju na Suncu. Na nekim područjima iznosi 10 000 km, dok drugdje iznosi svega 2 000 km.

Kromosfera je nevidljiva naspram sjaja fotosfere, ali se može zapaziti u vrijeme potpune pomrčine kao tanka crvena zona oko Sunca. Zbog crvene boje koja dolazi od jakih emisijskih linija vodika $H\alpha$ dobila je i ime kromosfera (*grč.* *chromos*, boja). Glavne karakteristike ove zone su nagli pad gustoće s visinom (od 10^{18} do 10^9 čestica/cm³) te složeno ponašanje temperature s visinom. U prvih 1 500 km temperatura pada sa 4 500 K na 4 000 K, no nakon toga raste te na vrhu kromosfere doseže 10 000 K (Vujnović, 1994). Ova pojava je neobična budući da se toplija kromosfera zagrijava energijom iz hladnije fotosfere. Zagrijavanje kromosfere još nije do kraja objašnjeno, no energija se iz fotosfere vjerojatno prenosi putem magnetohidrodinamičkih procesa.

U kromosferi se mogu zamijetiti razni oblici Sunčeve aktivnosti. U $H\alpha$ spektru, vidljivi su: spikule, kromosferska mreža, filamenti preko Sunčevog diska i prominencije iznad

rubu Sunca. Također se zapažaju dinamičke pojave kao što su bljeskovi, erupcije prominencija i filamenata te tok materijala u vidu petlji.



Slika 3. Kromosferske pojave. a) kromosferska mreža; b) spikule (preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>).

Tamne linije koje se mogu uočiti u $H\alpha$ spektru u stvari su dugi tanki mlazovi sjajnog plina zvani spikule zbog kojih površina Sunca izgleda kao da gori (slika 3b). To su malene prominencije koje se javljaju oko rubova supergranula, širine oko 1 000 km i dužine 10 000 km. Protežu se do vrha kromosfere i spuštaju se natrag u roku od 10 minuta. Na Suncu se u jednom trenutku nalazi nekoliko desetaka tisuća spikula, no one nisu ravnomjerno raspoređene po površini, nego se grupiraju oko tzv. kromosferske mreže magnetskog polja (slika 3a), koja prati raspored supergranularne strukture na površini. Prominencije i filamenti su u stvari ista pojava, koja se naziva prominencijom ako se pojavi iznad ruba Sunca gdje izgleda sjajna, a filamentom ako se pojavi na Sunčevom disku gdje izgleda tamna. To su gusti oblaci materijala zarobljeni u magnetskom polju koji lebde iznad površine. Petlje se javljaju nad površinom u satima nakon erupcije bljeska. Vidljive su u rendgenskom spektru nakon što se procesom kromosferske evaporacije napune vrućom plazmom. Unutar magnetskih petlji, materijal je izoliran od korone i nalazi se na mnogo nižoj temperaturi.

1.1.2.3. *Prijelazno područje*

Prijelazno područje je tanak i vrlo nepravilan sloj koji odvaja kromosferu i koronu. Zbog tokova topline iz korone, temperatura u sloju naglo raste; od 10 000 K na granici sa kromosferom do 1 milijun K na granici s koronom. Na pojedinim dijelovima sloja relativno hladne spikule probijaju iz kromosfere, dok se na drugim dijelovima tanke vruće koronine strukture spuštaju kroz prijelazno područje sve do fotosfere. Debljina prijelaznog područja iznosi od nekoliko 100 km do nekoliko 1 000 km.

U prijelaznom području događa se nekoliko važnih prijelaza u fizici atmosfere:

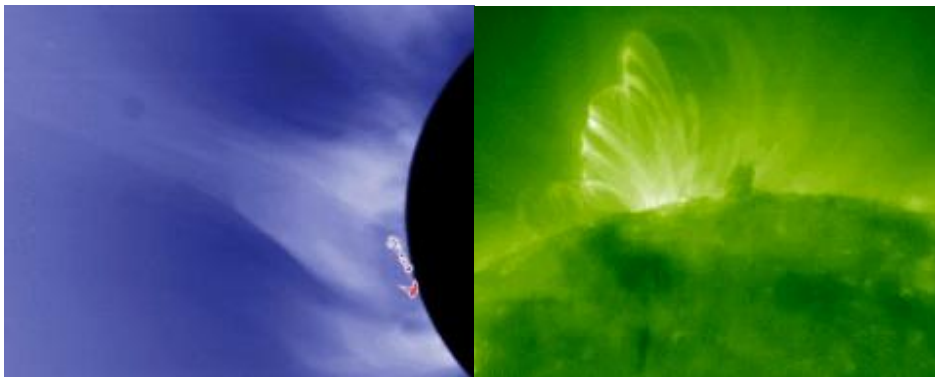
- Ispod sloja, na pojave i njihove oblike utječe gravitacija pa prevladavaju slojevi i horizontalne pojave (pjege), dok iznad područja oblicima vladaju dinamički procesi i magnetske sile.
- Ispod sloja *He* nije potpuno ioniziran te se materijal efektivno hladi zračenjem crnog tijela, dok je iznad sloja *He* potpuno ioniziran što uzrokuje porast temperature.
- Ispod sloja prevladavaju apsorpcijske linije infracrvenih i vidljivih valnih duljina, dok iznad područja nastaju emisijske linije u EUV i rendgenskom području.

1.1.2.4. *Korona*

Posljednji sloj Sunčeve atmosfere je korona ili vanjska atmosfera. To je područje naglog porasta temperature od 1 milijuna K na dnu sloja do 10 milijuna K na vrhu, dok za vrijeme pojave bljeskova temperatura može porasti do nekoliko desetaka milijuna K. Unatoč visokim temperaturama korona sadrži malo energije budući da je vrlo rijetka (10^8 - 10^9 čestica/cm³). Visoka temperatura korone zahtijeva prijenos energije netermalnim procesima iz nižih slojeva atmosfere, jer prema drugom zakonu termodinamike ne može postojati tok energije iz hladnijeg područja (fotosfere) u toplije područje (koronu). Točni mehanizmi zagrijavanja korone još nisu u potpunosti jasni, no pretpostavlja se da se energija prenosi zvučnim i magnetohidrodinamičkim valovima.

Korona je granično područje Sunca te se u njoj događa protok plina iz dubljih slojeva i obrnuto. Plin iz dubljih područja pristiže najviše putem spikula, no zna se dogoditi da tvar teče nazad u kromosferu, što je slučaj kod aktivnih prominencija. S druge strane Sunčeva plazma teče u interplanetarni prostor putem bljeskova, koroninih izbačaja mase i Sunčeva vjetra.

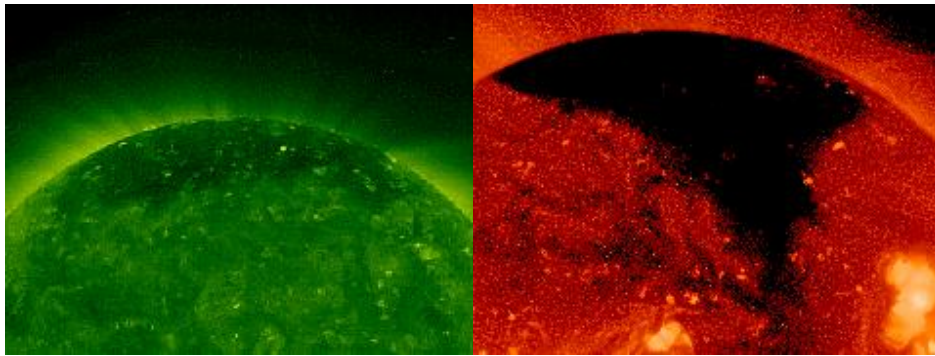
Izgled korone određen je strukturom Sunčevog magnetskog polja, pa se na područjima gdje prevladavaju zatvorene silnice magnetskog polja mogu uočiti klinaste strujnice i koronine petlje, dok na područjima otvorenih magnetskih silnica nastaju koronine šupljine i polarne perjanice.



Slika 4. Pojave u koroni. a) Klinaste strujnice; b) koronine strujnice.
(preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>.)

Klinaste strujnice (*eng.* helmet streamers) su velike i dugotrajne strukture oblika šljema sa šiljastim vršcima koje se protežu od donje korone do nekoliko R_S uvis (slika 4a). Stvara ih mreža magnetskih petlji u aktivnim područjima Sunca, a često se nalaze iznad prominencija. Petlje su ispunjene gustim, ioniziranim plinom koji emitira zračenje u rendgenskom spektru. Šiljasti vrhovi strujnica nastaju djelovanjem Sunčevog vjetra koji izvire na područjima između strujnica. Klinaste strujnice ograničene su na područje strujnog pojasa u umjerenim širinama, a njihova raspodjela prati migraciju aktivnih područja u vrijeme Sunčevog ciklusa aktivnosti. Koronine strujnice su osnovni oblici u koroni (slika 4b). To su zatvorene petlje magnetskih polja koje izbijaju kroz Sunčevu površinu i pune se vrućom plazmom.

Polarne perjanice su dugačke tanke strukture visoke gustoće koje nastaju u polarnim koroninim šupljinama (slika 5a). Gušće su i hladnije od okolne plazme, protežu se najmanje 10 R_S uvis, a traju oko 1 dan. Koronine šupljine su područja otvorenih silnica magnetskog polja ispunjena hladnijim plinom manje gustoće (slika 5b). Izvor su brzog Sunčevog vjetra. Zbog efikasnog transporta plazme u Sunčev vjetar, šupljine su uglavnom prazne te izgledaju tamnije od ostatka Sunca. Za vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti nalaze se na polovima, dok se za vrijeme maksimuma aktivnosti mogu naći na svim širinama.



Slika 5. Pojave u koroni. a) polarne perjanice; b) koronine šupljine.
(preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>.)

Oblik korone mijenja se tijekom Sunčeva ciklusa. U periodu maksimalne aktivnosti korona je jednoliko raspoređena preko ekvatorijalnih i polarnih područja i pokazuje mnoštvo strujnica. Tijekom minimuma aktivnosti ograničena je na ekvatorijalna područja gdje se javljaju klinaste strujnice, dok se koronine šupljine nalaze nad polovima.

1.2. MAGNETSKA AKTIVNOST

1.2.1. Sunčevo magnetsko polje

Ukupno Sunčevo magnetsko polje superpozicija je poloidalne i toroidalne komponente polja. Poloidalna komponenta ($B=10^{-3}$ T) je dipolno polje koje prožima Sunce, no na površini se ne zamjećuje zbog utjecaja mnogo jače toroidalne komponente magnetskog polja ($B\sim 10$ T).

Zbog difuzije magnetskog polja Sunčevo polje bi se raspršilo za desetak godina, no u Sunčevoj unutrašnjosti postoji proces koji podržava magnetsko polje, a naziva se magnetohidrodinamički dinamo (MHD dinamo). Točno mjesto na kojem se smjestio Sunčev dinamo još nije poznato, no pretpostavlja se da djeluje u konvektivnoj zoni i tahoklini. Dinamo proces ne objašnjava nastanak polja nego održavanje magnetskog polja u plazmi visoke vodljivosti.

Generiranje dipolnog polja. Gibanje vruće, vodljive plazme okomito na magnetsko polje inducira električno polje ($\mathbf{E}=\mathbf{v}\times\mathbf{B}$) u Sunčevoj unutrašnjosti. U skladu s Ohmovim zakonom inducirano polje stvara električne struje koje uzrokuju rotaciju magnetskog polja prema Ampèreovom zakonu. Promjenom magnetskog polja nastaje električno polje prema Faradayevom zakonu te Lorentzova sila koja se suprotstavlja gibanju i distorziji magnetskog polja. Djelovanjem sile dolazi do promjene smjera gibanja plazme i ciklus kreće iznova. Mehanička energija gibanja plazme ovim se procesom pretvara u energiju magnetskog polja.

Budući da najjače struje teku na ekvatoru, najjača komponenta magnetskog polja je dipolna komponenta ekvatorijalne strujne petlje koja stvara magnetske polove u blizini heliografskih polova Sunca pa se ukupno Sunčevo magnetsko polje na većoj udaljenosti može aproksimirati dipolnom komponentom polja koja opada s r^{-3} .

Sunčev dinamo. Zbog visoke električne vodljivosti plazme magnetsko polje je zamrznuto u plazmi i prati njezino gibanje. Diferencijalnom rotacijom Sunca dolazi do smicanja tokova plazme u unutrašnjosti, zbog čega se poloidalno polje razvlači u smjeru rotacije i namata u magnetski torus. Namatanjem poloidalnog polja nastaje toroidalna

komponenta koja s vremenom jača. Efekt rastezanja magnetskog polja zbog diferencijalne rotacije, odgovoran za nastanak toroidalnog polja, naziva se Ω -efekt. U unutrašnjosti nastaju dva torusa suprotnih polariteta, jedan na sjevernoj, a drugi na južnoj polutki.

Toroidalna komponenta magnetskog polja pohranjuje se u tahoklini na duži vremenski period koji je usporediv s periodom Sunčevog magnetskog ciklusa (oko 11 godina). Kada jakost magnetskog polja postane veća od kritične ($B \sim 10$ T), toroidalno polje se pod utjecajem magnetskog uzgona izdiže kroz konvektivnu zonu i izranja na površinu. Polje izranja u umjerenim i nižim heliografskim širinama gdje nastaju dva pojasa aktivnih područja. Na području gdje polje probija površinu javljaju se bipolarne grupe pjega ($B \sim 0,1$ T) s vodećim i pratećim pjegama (Lang, 2009). Sve vodeće pjege na sjevernoj polutki imaju isti polaritet, koji je suprotan polaritetu pratećih pjega. Na južnoj polutki, vodeće i prateće pjege također imaju suprotne polaritete, ali je smjer polja obrnut.

Jačanjem toroidalnog polja aktivna područja se spuštaju prema ekvatoru, a zajedno s njima migriraju i bipolarni parovi pjega. Spojnice vodećih i pratećih pjega (os bipolarne grupe) nagnute su prema ekvatoru, s vodećom pjegom smještenom nešto niže od prateće, zbog čega se vodeće pjege sa suprotnih polutka susreću i neutraliziraju na ekvatoru (Lang, 2009). Nakon anihilacije magnetskih polja vodećih pjega, ostaje višak magnetizma pratećih pjega (suprotnog polariteta od dipolnog polja). Supergranularno gibanje i meridionalni tok kontinuirano prenose ostatke magnetskog polja pratećih pjega prema polovima, gdje dolazi do regeneracije poloidalnog polja (Nandy, 2009). Budući da se poloidalno polje obnavlja iz magnetskog polja pratećih pjega, dolazi do promjene polariteta globalnog poloidalnog polja. Proces regeneracije poloidalnog polja naziva se α -efekt.

Sunčev ciklus magnetske aktivnosti. Mehanizam MHD dinamika uzrokuje cikličku promjenu polariteta Sunčevog magnetskog polja u prosjeku svakih 11 godina. Takvo kvaziperiodičko izmjenjivanje polariteta magnetskog polja naziva se Sunčev magnetski ciklus. Glavni uzrok ciklusa je interakcija između poloidalne i toroidalne komponente polja te njihova oscilacija. Sunčev maksimum tj. maksimum magnetskog ciklusa je vrijeme kada toroidalna komponenta polja postiže maksimum jakosti. Tada se javljaju maksimalni broj pjega i izbačaji visokoenergetske plazme u interplanetarni prostor

(bljeskovi, koronini izbačaji mase), dok se poloidalna komponenta nalazi se u minimumu jakosti i prolazi kroz promjenu polariteta. Nakon promjene polariteta, poloidalna komponenta jača i doseže vrhunac u minimumu magnetskog ciklusa tj. Sunčevom minimumu. U to vrijeme aktivna područja se raspadaju, smanjuje se broj pjega te započinje transport ostataka magnetskog polja pratećih pjega prema polovima. Magnetsko polje tada započinje novi ciklus. Budući da nakon jednog 11 godišnjeg ciklusa magnetsko polje promjeni polaritet, puni ciklus traje 22 godine, koliko je potrebno da se polaritet vrati u početnu orijentaciju.

1.2.2. Sunčeva aktivnost

Sunčevo magnetsko polje određuje strukturu Sunčeve atmosfere i vjetrova, a njegove prostorno-vremenske varijacije dovode do Sunčeve aktivnosti. Pod Sunčevom aktivnošću podrazumijevaju se dinamički procesi kao što su grijanje plazme, pojava pjega, prominencije te erupcije bljeskova i koroninih izbačaja mase. Ti procesi javljaju se u aktivnim područjima koja nastaju na mjestima gdje Sunčevo magnetsko polje izranja na površinu. Sunčeva aktivnost ovisi o Sunčevom magnetskom ciklusu, pa se maksimum aktivnosti javlja za vrijeme Sunčevog maksimuma, a minimum aktivnosti oko Sunčevog minimuma 5 godina kasnije. Aktivna područja zauzimaju manji dio površine Sunca, ali proizvode većinu aktivnosti. Mirna područja koja prekrivaju ostatak površine ispunjena su zatvorenim magnetskim oblicima, no iako su manje aktivna preplavljena su dinamičkim procesima i kratkotrajnim događajima (svjetle točke i mlazovi plazme).

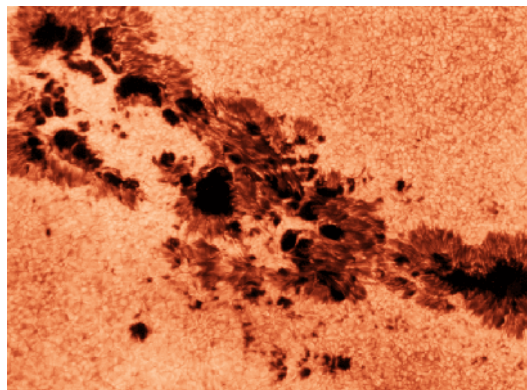
1.2.2.1. *Sunčeve pjege*

Sunčeve pjege su najčešći primjer magnetske aktivnosti na površini Sunca. To su tamna područja duljine od 3 600 do 50 000 km, koja traju od nekoliko dana do nekoliko mjeseci

(u prosjeku < 10 dana). Pjege izgledaju tamnije zbog kontrasta prema fotosferi budući da su hladnije od okolnog plina ($T_{\text{pjege}} = 4\,500\text{ K}$, $T_{\text{fotosfera}} = 6\,000\text{ K}$).

Pjege su vidljiva komponenta intenzivnog toroidalnog magnetskog toka koji probija Sunčevu površinu. Magnetsko polje prekida konvekciju materije, a time i dotok energije iz Sunčeve unutrašnjosti što uzrokuje pad površinske temperature i nastanak pjege. Polje probija površinu na dva mjesta, na jednom izlazi, a na drugom ulazi. Zbog toga se pjege javljaju u parovima sa suprotnim magnetskim polaritetima ili parovima grupa. Najčešće su bipolarne grupe s dvije glavne pjege najjačih magnetskih polja, oko kojih se okupljaju ostali članovi grupe.

Nakon raspada pjege magnetski tok se otpušta u fotosferu, gdje dolazi do difuzije polja turbulentnim tokovima. Magnetsko polje pjege je 3 000 puta jače od polja izvan pjege ($B_{\text{pjege}} = 0,3\text{ T}$, $B_{\text{površ.}} = 10^{-4}\text{ T}$), pa je u intenzivnom polju pjege plazma zaleđena i kreće se spiralno po silnicama.



Slika 6. Sunčeve pjege (preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>).

Pojave vezane uz magnetsku aktivnost pjege su koronine petlje i magnetsko prespajanje, a većina bljeskova i koroninih izbačaja mase potječe iz magnetski aktivnih područja oko grupa pjege.

Razvoj Sunčevog ciklusa magnetske aktivnosti prati se promatranjem raspodjele Sunčevih pjege vidljivih na površini, tzv. ciklusom pjege. U grupama pjege javljaju se vodeće i prateće pjege. To su dvije veće pjege s najjačim magnetskim poljima suprotnog polariteta. Vodeća pjege isturena je u smjeru rotacije Sunca, a prateća je slijedi. Spojnice vodećih i pratećih pjege obično su orijentirane u smjeru istok-zapad, ali u prosjeku

pokazuju maleni nagib s time da je vodeća pjega bliže ekvatoru. Nagib se javlja zbog utjecaja Coriolisove sile na magnetsko polje tijekom izdizanja kroz konvektivnu zonu. Nagib raste s heliografskom širinom, na nižim širinama kut iznosi oko 4° , a na višim 10° . Asimetrija nagiba spojnica vodećih i pratećih pjega naziva se Joyev zakon. Polariteti vodećih pjega na jednoj polutci suprotni su polaritetima vodećih pjega na drugoj polutci, no prilikom prijelaza na idući ciklus redoslijed polariteta se mijenja (Haleov zakon polariteta).

Statističko vladanje pjega u vremenu s obzirom na heliografsku širinu prikazuje „leptir dijagramom”. Pjege se javljaju u ograničenom pojasu 5° - 45° h. š. južno i sjeverno od ekvatora. Širina na kojoj se u nekom trenutku vidi najviše pjega ovisi o trenutku vremena unutar ciklusa Sunčeve aktivnosti. Početkom ciklusa pjege se javljaju na širinama $\pm 30^\circ$, no kako im broj raste težište pojasa se seli prema ekvatoru, a sam pojas se širi. U maksimumu aktivnosti težište se nalazi na $\pm 15^\circ$, a pri kraju ciklusa na $\pm 8^\circ$. Novi ciklus započinje prije nego što nestanu sve pjege staroga ciklusa, tj. kada magnetski polaritet prosječnog broja pjega novog ciklusa nadmaši polaritet pjega starog ciklusa.

Brojnost pjega opisuje se Wolfvim relativnim brojem:

$$R=k(10g+f) \quad (1.2.2.1.1)$$

gdje je: f- broj pojedinačnih pjega u trenutku promatranja na vidljivoj strani Sunca, g- broj grupa pjega, k- faktor redukcije za instrument promatranja. Wolfvov broj opisuje ciklus Sunčeve aktivnosti, a pokazuje pravilnosti koje se primjenjuju prilikom prognoziranja buduće aktivnosti Sunca.

Glavno obilježje Sunčeve aktivnosti je kvaziperiodička promjena broja pjega prosječnog perioda 11 godina poznata kao Schwabeov ciklus. Magnetsko polje mijenja polaritet tijekom svakog Schwabeovog ciklusa pa se magnetski polovi vraćaju u početno stanje tek nakon dvije promjene polariteta (Haleov 22 godišnji ciklus promjene magnetskog polariteta). Postoji još i stoljetni Gleissbergov ciklus koji predstavlja modulaciju amplitude Schwabeovog ciklusa. On je vezan uz visinu maksimuma pjega koji se mijenja svakih 80-90 godina. Npr., od 1900. do 1960. godine Sunčev maksimum je bio izraženiji, dok se od 1960. godine ponešto smanjio. Ciklusi koji su imali maksimume 1957./58. i 1979./80. god. bili su najveći (Vujnović, 1994). Ponekad je normalna Sunčeva aktivnost prekinuta periodima smanjene aktivnosti koji se nazivaju

veliki minimumi. Posljednji je bio Maunderov minimum tijekom razdoblja 1645.-1715. godine kada se pjege gotovo nisu vidjele. Taj period se podudara s dužim hladnijim razdobljem u Europi poznatim kao „Malo ledeno doba”.

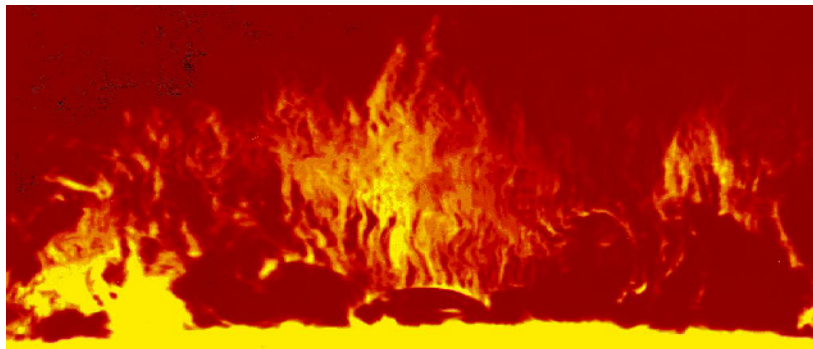
1.2.2.2. *Koronine strujnice*

Koronine strujnice su zatvorene magnetske petlje ispunjene kromosferskom plazmom. Nastaju kao posljedica izdizanja magnetskih tokova iz Sunčeve unutrašnjosti zbog čega se često mogu naći uz pjege. Krajevi strujnica fiksirani su u fotosferi, dok se same strujnice pružaju uvis u koronu. Strujnice su dinamične strukture u kojima se zamjećuju mlazovi vruće plazme nastali zbog nejednolikog grijanja na podnožjima petlji. Plazma se zagrijava od 6 000 K do preko 1×10^6 K na putu od fotosfere do korone. Ponekad plazma ulazi u strujnicu na jednom kraju, a izlazi na drugom (kromosfersko isparavanje i kondenzacija), a može se pojaviti i simetričan tok iz oba podnožja koji uzrokuje nagomilavanje mase u strujnici gdje se plazma hladi (filamenti ili prominencije). Sjajne koronine strujnice koje se javljaju u obliku koroninih kondenzacija i svijetlih točaka, česte su za vrijeme Sunčevog maksimuma, no nešto veće i manje sjajnije strujnice koje traju danima i tjednima češće su u vrijeme smanjene aktivnosti. Velike koronine strujnice nalaze se na podnožjima klinastih strujnica čiji se šiljci protežu uvis. Kretanja plazme u konvekcijskoj zoni i fotosferi utječu na izdizanje i smicanje magnetskih petlji pri čemu može doći do prespajanja suprotno usmjerenih magnetskih tokova. U procesu prespajanja otpušta se magnetska energija koja uzrokuje grijanje korone i pojavu dinamičkih procesa kao što su bljeskovi i koronini izbačaji mase. Strujnice naseljavaju aktivna i mirna područja na površini Sunca, a njihova brojnost može se povezati sa Sunčevim ciklusom.

1.2.2.3. *Prominencije*

Prominencije su magnetske petlje ispunjene gustim plinom koje lebde iznad površine Sunca okružene vrućom koronom. Protežu se horizontalno preko magnetske neutralne

linije, a usidrene su u fotosferskim magnetskim poljima suprotnih polariteta. Dok temperatura koroninih plinova iznosi oko 1 milijun K, plin prominencija ima temperaturu 10 000 K koja je karakteristična za kromosferu. Stabilnost oblika prominencije moguća je jedino ako je tlak plina prominencije jednak tlaku korone. Budući da je prema zakonu idealnog plina tlak razmjeran temperaturi i gustoći, a kako je temperatura prominencije 100 puta manja od temperature korone, plin prominencije je 100 puta gušći od korone (Vujnović, 1994). Zbog veće gustoće, prominencije su sjajnije od okolne korone. Kada se prominencije jave iznad ruba Sunčevog diska izgledaju sjajnije zbog tamne pozadine, no kada se jave na Sunčevom disku izgledaju tamne u $H\alpha$ i EUV spektru i nazivaju se filamenti.



Slika 7. Velika mirna prominencija na rubu Sunčeva diska u $H\alpha$ spektralnoj liniji. (preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>.)

Prominencije se po mjestu nastanka dijele na prominencije mirnih područja i prominencije aktivnih područja. Mirne prominencije (slika 7) lebde u atmosferi po nekoliko mjeseci, a nose i do 100 milijardi tona materijala. Protežu se do 300 000 km u daljinu i 50 000 km u visinu. Oblika su mosta, a donji izdanci upiru se u područje između supergranula. Prominencije aktivnih područja relativno su kompaktne, tipičnih dužina od 30 000 km i visina od nekoliko 1 000 km te su često povezane s pjegama.

Prominencije se protežu preko neutralne linije koja odvaja polja suprotnih polariteta. Oko područja neutralne linije dolazi do smicanja magnetskog polja zbog čega može doći do gubitka ravnoteže i erupcije prominencije. Takve se prominencije nazivaju eruptivne prominencije. Erupcija se događa u dvije faze, prva je polagano dizanje prominencije nekoliko sati prije erupcije, nakon čega slijedi eruptivna faza kada se materijal ubrzava akceleracijom $10\text{--}80\text{ m/s}^2$. Najveće erupcije su one mirnih prominencija, no erupcije

prominencija aktivnih područja mnogo su snažnije i oslobađaju 10-100 puta više energije. Eruptivne prominencije šire se i preko milijun kilometara uvis, a najčešće se javljaju u obliku luka koji brzo raste.

1.2.2.4. *Sunčevi bljeskovi*

Bljesak je iznenadni i kratkotrajni eksplozivni proces u kojem dolazi do značajnog porasta intenziteta zračenja, a rezultat je naglog oslobađanja magnetske energije i njene pretvorbe u kinetičku energiju, toplinu i svijetlost (Vujnović, 1994). To su najveće eksplozije u Sunčevom sustavu koje u vrlo kratkom vremenu mogu otpustiti i do 10^{25} J energije, te na relativno malenom području korone uzrokovati nagli porast temperature do 20 milijuna K (Lang, 2009). Bljeskovi zrače elektromagnetski spektar svih valnih duljina. Značajan dio otpuštene energije troši se na ubrzavanje elektrona i iona do skoro relativističkih brzina pri čemu dolazi do znatnog porasta radio zračenja, mekog i tvrdog rendgenskog zračenja, te γ -zračenja. Većina bljeskova nastaje u aktivnim područjima oko pjega, obično duž neutralne linije koja dijeli pjege suprotnih magnetskih polariteta. Učestalost pojave ovisi o 11 godišnjem ciklusu magnetske aktivnosti, a češće se javljaju u vrijeme maksimuma aktivnosti, kada se na površini Sunca nalazi maksimalni broj pjega.

Klasifikacija. Bljeskovi se klasificiraju prema maksimumu jakosti toka rendgenskog zračenja. Svaka klasa ima maksimalni tok 10 puta manji od prethodne klase: 1) X klasa ($>10^{-4}$ W/m²), 2) M klasa (10^{-5} - 10^{-4} W/m²), 3) C klasa (10^{-6} - 10^{-5} W/m²), 4) B klasa (10^{-7} - 10^{-6} W/m²) i 5) A klasa ($<10^{-7}$ W/m²). Unutar klase postoji linearna skala od 1 do 9, pa je bljesak X2 klase dva puta jači od X1 klase i četiri puta jači od M5 klase. Bljeskovi X klase mogu izazvati dugotrajne radijacijske oluje i radio zamračenja diljem Zemlje, dok bljeskovi M klase izazivaju manje oluje i kraća radio zamračenja. Bljeskovi C, B i A klase nemaju značajan utjecaj na Zemlju.

Proces nastanka bljeska. Erupcija bljeska događa se u dvije faze; impulzivna faza i faza postupnog raspada. Osnovni proces nastanka bljeskova je prespajanje (rekonekcija) silnica magnetskih petlji kojim započinje impulzivna faza. Prespajanjem silnica oslobađa se magnetska energija koja se troši na ubrzavanje plazme zarobljene u magnetskim

petljama. Plazma se duž silnica ubrzava od područja prespajanja prema površini Sunca i uvis. Tijekom ubrzavanja čestica dolazi do ciklotronskog zračenja u radio-valnom području. Elektroni ubrzani prema površini sudaraju se s kromosferskim plinom te u procesu zakočnog zračenja dolazi do emisije netermalnog tvrdog rendgenskog zračenja ($E=10-100$ keV) na podnožjima petlje. Do emisije tvrdog rendgenskog zračenja dolazi i na vrhu petlje ubrzavanjem elektrona uvis. Plazma ubrzana prema površini zagrijava kromosferu kod podnožja petlje, zbog čega se javlja gradijent tlaka pod čijim se utjecajem vrući plin diže duž magnetskih silnica i isparava u koroni. Pri tome dolazi do postupnog porasta mekog rendgenskog zračenja koje doseže vrhunac nekoliko minuta nakon impulzivne emisije tvrdog rendgenskog zračenja. Meko rendgensko zračenje ($E=1-10$ keV) je rezultat procesa termalnog zakočnog zračenja koje nastaje prilikom sudara protona kromosfere i brzih elektrona ($T_e=10 \times 10^6$ K, $v_e=0.05c$). Tijekom faze postupnog raspada petlja se puni vrućim plinom i vraća u jednostavniju konfiguraciju niže energije.

Iznimno snažni bljeskovi emitiraju bijelu svjetlost koja nastaje prilikom sudara netermalnih elektrona manjih energija i kromosferske plazme. Bljesak vidljive svjetlosti obično se javlja na podnožjima petlje tijekom impulzivne faze. Bljeskovi u kojima se javljaju tokovi energetskih protona nazivaju se protonski bljeskovi. Protoni ulaze u nuklearne reakcije s atomskim jezgrama kromosfere, pri čemu dolazi do emisije γ -zračenja ($E \sim 1$ MeV) i pojave relativističkih neutrona.

Plazma koja erupcijom izlazi iz bljeska formira oblak ioniziranog plina u kromosferi i nižim dijelovima korone. Brzine čestica u oblaku kreću se od nekoliko 100 km/s do 1 500 km/s, dok se pojedine čestice ubrzavaju gotovo do brzine svjetlosti i stižu do Zemlje istovremeno kad i svjetlost bljeska (Vujnović, 1994). Ti ubrzani snopovi čestica koji se sastoje od elektrona i atomskih jezgri nazivaju se Sunčeve energetske čestice (skr. SEČ, *eng.* Solar energetic particles, SEP).

Posljedice na Zemlji. Rendgensko i EUV zračenje najsnažnijih bljeskova, uzrokuje dramatične promjene u Zemljinj ionosferi koje predstavljaju prvi poremećaj uzrokovan bljeskom. Zračenje zagrijava i dodatno ionizira gornju atmosferu tj. ionosferu zbog čega ona ekspandira. Promjene u ionosferi mogu omesti kratkovalnu radio komunikaciju, a zbog porasta trenja uzrokovanog ekspanzijom ionosfere može doći do propadanja orbita satelita. Nakon nekoliko desetaka minuta, Zemlju zapljusnu snopovi energetskih

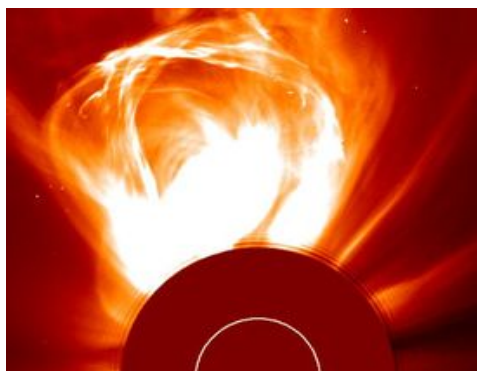
elektrona, a uskoro i protona. Čestično zračenje oštećuje satelite, a predstavlja opasnost i za astronaute. Kroz polarne lijevke čestično zračenje može ući u atmosferu i dodatno pridonijeti ionizaciji ionosfere.

1.2.2.5. *Koronini izbačaji mase*

Zbog dinamičkih fenomena koji ubrzavaju koroninu plazmu, Sunce postupno gubi materiju na dva načina. Prvi, stalno prisutan način naziva se Sunčev vjetar, a drugi predstavljaju sporadični eruptivni izbačaji velike količine mase zvani koronini izbačaji mase (skr. KIM, *eng.* coronal mass ejection, CME). To su najdramatičniji događaji u interplanetarnom prostoru koji odnose i do 1/10 ukupne mase korone tijekom nekoliko sati (Lang, 2009). Izbačaji mase remete tok Sunčevog vjetra i stvaraju poremećaje koji mogu imati ozbiljne posljedice na Zemlji.

Nastanak KIM. Erupcije bljeskova, prominencija i KIM najpoznatiji su primjeri procesa prespajanja magnetskih silnica. Proces prespajanja najvjerojatnije pokreće magnetska nestabilnost ili interakcija suprotno usmjerenih magnetskih tokova. Prespajanjem se oslobađa magnetska energija, no još nije potpuno razjašnjeno kako se ta energija pretvara u termalnu energiju bljeska ili mehaničku energiju prominencija i KIM.

Budući da nastaju u aktivnim područjima, KIM su zapravo poremećaji postojećih strujnica, kojima se sjaj i veličina povećavaju danima prije erupcije. Jaka magnetska polja aktivnih područja imaju veći magnetski tlak od magnetskog polja okolnog područja. Veći magnetski tlak utječe na ekspanziju jakih polja u područja slabijeg magnetskog polja, no magnetska napetost strujnica sprečava ekspanziju. Ravnoteža magnetskog tlaka i magnetske napetosti strujnica može danima podržavati oblak plazme u kromosferi. Pojava magnetske nestabilnosti ili magnetskog prespajanja može prevagnuti ravnotežu u korist gradijenta magnetskog tlaka usmjerenog prema van zbog čega se oblak plazme oslobađa sa Sunca u obliku erupcije (Lang, 2009). Nastali oblak plazme zrači u rendgenskom spektru, odvaja se sa Sunca i u obliku plazmoida putuje kroz Sunčev sustav. Nakon erupcije, na mjestu gdje se prije nalazila strujnica često se javlja tanka strujna ploha koja se uzdiže iz novoformirane strujnice.



Slika 8. Koronin izbačaj mase zabilježen 27. veljače 2000. godine pomoću LASCO detektora na SOHO satelitu. (preuzeto iz <http://solarscience.msfc.nasa.gov>).

Fizikalne osobine. KIM u bijeloj svjetlosti pokazuju trodijelnu strukturu (Lang, 2009.): sjajni vanjski rub, nakon čega slijedi tamnija šupljina koja okružuje sjajnu jezgru. Sjajni vanjski rub je područje komprimiranog plina korone kojeg potiskuje ekspandirajuće magnetsko polje. Šupljina je područje niske gustoće plazme, gdje vladaju visoki magnetski tlak i snažno magnetsko polje. Šupljina se prilikom erupcije širi i potiskuje materijal korone. Budući da je vrlo gusta, jezgra je najsjajniji dio KIM, a često se prepoznaje kao erumpirajuća prominencija, jer je vidljiva u emisijskim linijama kromosfere. No, ne pokazuju svi KIM klasičnu trodijelnu strukturu. Neki mogu imati šupljine bez pojave prominencija, dok kod ponekih može izostati vanjski rub. Neke od najvažnijih fizikalnih osobina KIM dane su u tablici 2.

Tablica 2. Fizikalne značajke KIM u blizini Sunca (preuzeto iz Lang, 2009).

Karakteristike	Vrijednosti
Izbačena masa	$1 \times 10^{12} - 5 \times 10^{13}$ kg
Prosječna kutna širina	47° (min. aktivnosti) 61° (maks. aktivnosti)
Heliografske širine	Ekvatorska područja (min. aktivnosti) Sve širine (maks. aktivnosti)
Učestalost javljanja	0.5 događaja/dan (min. aktivnosti) 6 događaja/dan (maks. aktivnosti)
Prividna brzina	100 - 3 400 km/s
Prosječna prividna brzina	300 km/s (min. aktivnosti) 500 km/s (maks. aktivnosti)
Vrijeme putovanja do Zemlje	100 sati
Prosječna kinetička energija	$10^{23} - 10^{24}$ J

Učestalost pojave, lokacija javljanja na Suncu i prosječna brzina KIM ovise o 11 godišnjem ciklusu Sunčeve aktivnosti. Blizu minimuma aktivnosti mogu se uočiti 0,5 KIM/dan, dok za vrijeme maksimuma aktivnosti učestalost javljanja raste do 6 KIM/dan. Budući da nastaju iz koroninih strujnica, vremenska i prostorna raspodjela KIM slična je raspodjeli strujnica i prominencija. Za vrijeme minimuma aktivnosti uglavnom se javljaju u blizini magnetskog ekvatora, dok se za vrijeme maksimuma aktivnosti javljaju u aktivnim područjima na svim širinama, čak i u blizini Sunčevih polova, iako rjeđe. Erupcije KIM na višim heliografskim širinama povezane su s prominencijama, dok su one na nižim širinama povezane s bljeskovima. Brzine im variraju od 50 do 3 400 km/s, dok se prosječne brzine od 300 do 500 km/s mogu usporediti s brzinama sporog Sunčevog vjetra. Brzi KIM ($v > 1\,000$ km/s) uzrokuju udarne valove u Sunčevom vjetru koji stižu do Zemlje za 2-4 dana.

Kao posljedica 2D projekcije, KIM poprimaju različite morfološke oblike, ali se ugrubo mogu svrstati u tri oblika (Bothmer & Daglis, 2007):

- 1) Halo KIM nastaju blizu središta Sunčevog diska i izgledaju kao postupno ekspanirajući halo oko Sunca. Mogu se pojaviti na prednjoj (okrenutoj prema Zemlji) ili na stražnjoj strani diska. Halo KIM mogu prouzročiti jake geomagnetske oluje na Zemlji, a otkrivaju se pomoću EUV i rendgenskog zračenja u središtu Sunčevog diska.
- 2) Parcijalni halo KIM imaju prividnu širinu 120° - 360° .
- 3) Rubne KIM događaju se iznad ruba Sunčevog diska, a širina im je manja od 120° .

Klasifikacija KIM. Prema Lang (2009) i ref. tamo, KIM se mogu svrstati u 2 klase: impulzivni KIM velikih brzina i akceleracije, i postupni KIM manjih brzina te manje i stalnije akceleracije.

Brzine poremećaja impulzivnih KIM kreću se oko 750-1 000 km/s, dok akceleracija iznosi oko $1\,000\text{ m/s}^2$. Ubrzavaju se u donjoj koroni ($r < 2R_s$) nakon čega se kreću konstantnom brzinom ili usporavaju. Brzi KIM češće su povezani s aktivnim područjima i Sunčevim bljeskovima.

Postupni KIM, oblika balona, s brzinama 400-600 km/s postupno se ubrzavaju u razdoblju od nekoliko sati. Akceleracijom manjom od 20 m/s^2 ubrzavaju se do udaljenosti od $30 R_s$. Postupni KIM češće se događaju u minimumu aktivnosti i uglavnom su povezani s prominencijama.

Pokretanje KIM. Sadašnja saznanja o kinematici impulzivnih KIM govore da se izbačaj događa u 3 faze (Schwenn, 2006 i ref. tamo): faza inicijacije, faza impulzivne akceleracije i faza propagacije. Faza inicijacije (traje oko 10 minuta) događa se prije pojave bljeska, a karakterizira ju polagano izdizanje materijala. Zatim slijedi impulzivna faza u kojoj se izbačaj ubrzava sa Sunca, sve dok ne postigne gotovo konstantnu brzinu. Impulzivna faza se podudara s fazom uzdizanja bljeska, a akceleracija prestaje pojavom maksimuma zračenja bljeska u mekom rendgenskom zračenju. Spori KIM ne pokazuju 3 faze razvoja, nego se polako ubrzavaju tijekom leta.

Akceleracije KIM variraju preko 3 reda veličine (nekoliko m/s^2 -nekoliko tisuća m/s^2), isto kao i trajanje akceleracije (nekoliko min.-nekoliko tisuća min.). Konačna brzina KIM kombinacija je magnitude i trajanja akceleracije (Bothmer & Daglis, 2007). Kod postupnih KIM teško je odrediti točno vrijeme početka erupcije, budući da joj prethodi faza postupnog izdizanja koja traje nekoliko sati.

Kada se prošire do udaljenosti od nekoliko R_s , većina KIM dosegnu gotovo konstantnu brzinu od 400 km/s. Izbačena masa pri toj brzini može stići do Zemlje za stotinjak sati noseći sa sobom prosječnu kinetičku energiju od 10^{23} - 10^{24} J. Količina energije koja se oslobodi pri savladavanju gravitacije i pokretanju mase usporediva je s energijom tipičnog bljeska, no kod KIM većina energije nalazi se u izbačenom materijalu, dok se energija bljeska troši na ubrzavanje čestica koje naknadno emitiraju intenzivno rendgensko i radio zračenje.

Popratne pojave. KIM su često povezane s različitim pojavama u koroni i kromosferi. U kromosferi se mogu zamijetiti bljeskovi i Moretonovi valovi, dok se u koroni javlja smanjenje sjaja površine Sunca (*eng.* dimming), rendgenski sigmoidi, post eruptivne arkade, erupcije prominencija i EIT valovi.

Prema Bothmer & Daglis (2007), oko 70% eruptivnih prominencija povezano je s erupcijama postupnih KIM. Iako je prevladavalo mišljenje da bljeskovi pokreću KIM, nedavna otkrića ustanovila su koevoluciju oba procesa koje uzrokuje zajednička magnetska nestabilnost. Većina bljeskova javlja se neovisno od KIM, čak i najveći bljeskovi klase M ili X nisu povezani s KIM u 40% slučajeva, dok se oko 60% KIM-a javlja neovisno o bljeskovima. No najbrži KIM iz aktivnih područja skoro su uvijek povezani s bljeskovima.

Interplanetarni KIM. KIM odnose magnetsko polje i velike količine plazme u heliosferu, a njihove interplanetarne manifestacije nazivaju se interplanetarni koronini izbačaji mase (skraćenica IKIM, *eng.* interplanetary coronal mass ejection, ICME). Tijekom širenja kroz heliosferu IKIM međudjeluju sa Sunčevim vjetrom i interplanetarnim magnetskim poljem (skr. IMP, *eng.* interplanetary magnetic field, IMF) pri čemu nastaju interplanetarni udari (skr. IP udari).

Udarne valove u interplanetarnoj plazmi uglavnom uzrokuju brzi KIM (Schwenn, 2006). Udarne fronta nastaje kompresijom, otklonom i zagrijavanjem Sunčevog vjetra ispred izbačaja mase, dok se IMP omata oko oblaka izbačaja koji ga tlači odozda. Komprimirana plazma koja nastaje između oblaka izbačaja i udarnog vala, a i sam oblak izbačaja mogu uzrokovati jaka odstupanja smjera magnetskog polja od smjera IMP-a, pri čemu može nastati komponenta IMP južne orijentacije ($B_z < 0$) koja je glavni uvjet za nastanak geomagnetskih oluja.

IKIM se ponekad šire kroz interplanetarni prostor u obliku magnetskog oblaka. To su izbačaji mase kod kojih se unutarne magnetsko polje širi u obliku magnetskih petlji čiji krajevi ostaju usidreni u fotosferi. Odlike magnetskih oblaka su intenzivno spiralno magnetsko polje, niska gustoća plazme i snažno IMP (Schwenn, 2006). Oblaci se gibaju iza IP udara i mogu se protezati više od 0.5 AJ.

Brzi KIM s pripadnim IP udarima odgovorni su za najjače geomagnetske oluje, no zbog unutarne strukture magnetskog polja oblaka na udaljenosti od 1 AJ može doći do nastanka jake južne komponente IMP zbog čega čak i spori magnetski oblaci mogu biti geoefektivni (Schwenn, 2006).

Jedna trećina IP udara pokazuje topologiju magnetskih oblaka, a ostale dvije trećine kompleksni su izbačaji koji se mogu pripisati interakcijama brzih i sporih KIM (Lang, 2009). Svaki deseti IP udar kojeg prouzroče IKIM stiže do Zemlje (Schwenn, 2006).

Posljedice na Zemlji. Efikasnost IKIM u interakciji s magnetosferom ovisi o količini i brzini izbačenog materijala te jakosti i smjeru magnetskog polja. Glavni faktor koji određuje utjecaj na magnetosferu je smjer komponente IMP-a okomite na ravninu ekliptike (B_z komponenta). Kada je B_z pozitivna polje ima sjevernu orijentaciju i nema značajan utjecaj na Zemlju, no kada je komponenta B_z negativna, orijentacija polja je

južna i suprotna orijentaciji Zemljinog magnetskog polja, zbog čega dolazi do prespajanja silnica IMP i geomagnetskog polja te ulaska energije izbačaja u magnetosferu.

KIM imaju veći utjecaj na Zemlju nego bljeskovi jer nose više plazme u većem volumenu što povećava vjerojatnost interakcije sa magnetosferom. Dok bljesak stvara SEČ u blizini Sunca, KIM pokreću interplanetarne udarne valove koji kontinuirano proizvode SEČ tijekom propagacije. Te energetske čestice prodiru kroz polarne kape u magnetosferu, a pogubne su za sustave komunikacije, satelite i ostalu elektroničku opremu, te za astronaute izvan zaštite Zemljinog magnetskog polja.

IKIM stižu do Zemlje za 2-4 dana nakon erupcije na Suncu. Kada stignu do Zemlje pokreću jake geomagnetske oluje koje mogu oštetiti komunikacijske satelite i uzrokovati nestanak električne energije. U ekstremnim slučajevima mogu inducirati električne struje u dalekovodima i naftovodima.

1.2.2.6. *Sunčeve energetske čestice*

Sunčeve energetske čestice (skr. SEČ) su Sunčevi elektroni, protoni i ostali ioni visokih energija koji se gibaju kroz interplanetarni prostor. Dinamički procesi u koroni i interplanetarnom prostoru, kao što su bljeskovi i udarni valovi ubrzavaju nabijene čestice na energije od nekoliko keV do nekoliko GeV. U bljeskovima su energije čestica oko 10 000 puta veće od energija čestica Sunčevog vjetra ($p \sim 20$ GeV, $e^- \sim 100$ MeV). Samo rijetki protoni najvećih energija (~ 1 GeV) mogu stići do Zemljine površine, dok se protoni nižih energija kanaliziraju u polarna područja i ulaze u ionosferu.

Vrste SEČ. SEČ nastaju u dva različita izvora koji posjeduju različite mehanizme akceleracije. Bljeskovi uzrokuju impulzivne događaje, dok interplanetarni udari KIM-a proizvode postupne događaje (Schwenn, 2006). Svojstva impulzivnih i postupnih događaja dana su u tablici 3.

Impulzivnim događajima dominiraju skoro relativistički tokovi elektrona ($E \sim 100$ keV, $v \sim 0.5c$) koji stižu do Zemlje za 20-ak minuta. Impulzivni događaji obogaćeni su rijetkim izotopom ^3He , čiji je udio barem 100 puta veći nego u koroni. Također pokazuju povećani udio teških iona visokog stupnja ionizacije. To su najčešći Sunčevi događaji na

1 AJ, a javljaju se i do 10 puta češće nego postupni. Mogu trajati satima, a područje javljanja im je ograničeno na $< 30^\circ$ heliografske širine, što se pripisuje ubrzavanju čestica u lokaliziranim erupcijama bljeskova na Suncu. Čestice se nakon erupcije kreću po spiralnim silnicama IMP-a, te predstavljaju prijetnju za Zemlju samo ako se erupcija dogodila na području koje je silnicom izravno povezano sa Zemljom. Ta područja su koncentrirana na zapadnoj polovici Sunca, oko 60° z. h. š..

Tablica 3. Svojstva impulzivnih i postupnih događaja Sunčevih energetskih čestica (preuzeto iz Bothmer & Daglis, 2007).

	Impulzivni događaji	Postupni događaji
Čestice	Bogati elektronima	Bogati protonima
$^3\text{He}/^4\text{He}$	≈ 1	$\approx 0,0005$
Fe/O	≈ 1	$\approx 0,1$
H/He	≈ 10	≈ 100
Trajanje bljeska	Impulzivno (minute, tvrdo rendgensko zračenje)	Postupno (sati, meko rendgensko zračenje)
Trajanje događaja	Sati	Dani
Koronograf	Ništa otkriveno	KIM, 96%
Područje akceleracije	Sunčevi bljeskovi	IP udari
Širinsko prostiranje	$< 30^\circ$	$\approx 180^\circ$
Događaja u godini	$\approx 1\ 000$	≈ 100

IP udari KIM proizvode najintenzivnije događaje s najvećim energijama, tzv. postupne ili protonske događaje. U postupnim događajima prevladavaju tokovi protona, a za razliku od impulzivnih imaju manji udio teških iona, dok im stanje odražava sastav i stupnjeve ionizacije korone. Za razliku od čestica impulzivnih događaja koje se gibaju duž magnetskih silnica IMP-a, KIM lakoćom prelaze preko silnica kontinuirano ubrzavajući čestice na svom putu. Zbog toga SEČ postupnih događaja pokazuju gladak i dug vremenski profil događaja koji traje danima, a prostorni raspon javljanja postupnih događaja iznosi oko 180° h. š..

Spori KIM, sa brzinama manjim od brzine ambijentalnog Sunčevog vjetra ne uzrokuju IP udare, pa ne dolazi ni do pojave SEČ, a samo 1% najbržih KIM ($v > 1\ 500$ km/s) proizvodi značajne SEČ događaje (Schwenn, 2006). Oko 96% postupnih događaja povezani su s erupcijama KIM, dok događaje najjačeg intenziteta (1-10 MeV) i najdužeg trajanja proizvode KIM nastali u blizini središnjeg meridijana.

Utjecaj na Svemirsko vrijeme (eng. *Space weather*). Tokovi SEČ utječu na Svemirsko vrijeme na dva načina (Schwenn, 2006): 1) relativistički protoni predstavljaju opasnost za

nezaštićene tehničke sustave i astronaute u Zemljinoj orbiti; 2) čestice prodiru u magnetosferu i izazivaju promjene u gornjoj atmosferi i ionosferi. Tokovi energetskih protona koji ulaze kroz polarne kape dodatno ioniziraju ionosferu i uzrokuju prekid kratkovalne radio komunikacije, uz to dolazi i do disocijacije atmosferskih atoma i molekula koja uzrokuje osiromašenje sloja ozona u polarnoj stratosferi. Relativistički elektroni koji se za vrijeme geomagnetskih oluja ubrzavaju unutar magnetosfere opasni su za komunikacijske satelite u geostacionarnoj orbiti.

1.3. Sunčev vjetar

Sunčev vjetar je kontinuirani tok potpuno ionizirane plazme koji se širi sa Sunca u svim smjerovima. Sastoji se od jednakog broja iona i elektrona. Ionska komponenta sastoji se p (~95%), He (~5%) te nešto manjeg udjela težih iona u različitim stupnjevima ionizacije. Iako Sunce kontinuirao otpušta vjetar, gubitak mase je neznatan. Svake sekunde Sunce izgubi oko 10^9 kg, što je manje od $2-3 \times 10^{-14}$ ukupne mase Sunca/godinu. Tokovima Sunčevog vjetra, Sunce je tijekom dosadašnjeg života izgubilo oko 0.01% ukupne mase.

Tablica 4. Srednje vrijednosti parametara Sunčevog vjetra na 1 AJ.
(preuzeto iz Lang, 2009).

Gustoća čestica, N	$10 \text{ čestica/cm}^3 (5 e^- \text{ i } 5 p)$
Brzina, v	300-800 km/s
Gustoća, ρ	$10-20 \text{ kg/m}^3 (p)$
Tok čestica, F	$10^{12}-10^{13} \text{ čestica/m}^2\text{s}$
Temperatura, T	$1.2 \times 10^5 \text{ K } (p)$ $1.4 \times 10^5 \text{ K } (e^-)$
Termalna energija čestica, kT	$2 \times 10^{-18} \text{ J} \approx 12 \text{ eV}$
Kinet. energija protona, $0.5 m_p v^2$	$10^{-16} \text{ J} \approx 1 \text{ keV}$
Termalna gustoća, NkT	10^{-11} J/m^3
Gustoća kinet. energije p , $0.5 N m_p v^2$	10^{-9} J/m^3
Radikalno magnetsko polje, H_r	2.5 nT
Alfvénova brzina, v_A	32 km/s
Brzina zvuka, c	41 km/s

Sunčev vjetar povlači magnetsko polje u interplanetarni prostor te stvara heliosferu, veliku šupljinu u obliku suze koja se pruža do udaljenosti 50-100 AJ i obuhvaća cijeli

Sunčev sustav. Sunčev vjetar i pripadno interplanetarno magnetsko polje nose sa sobom velike količine Sunčeve energije te utječu na formiranje planetskih magnetosfera i repova kometa, dok na Zemlji uzrokuju geomagnetsku aktivnost. Vrijednosti fizikalnih parametara Sunčevog vjetra na udaljenosti od 1 AJ dane su u tablici 4.

Nastanak Sunčevog vjetra. Sunčev vjetar rezultat je velike razlike u tlakovima korone i interplanetarnog prostora. Iako je vrlo rijetka, korona je dobar vodič topline, zbog čega je radijalni gradijent temperature vrlo mali ($T_{\text{korona}} \sim 10^6$ K; $T_{\text{sv na 1 AJ}} \sim 10^5$ K). Zbog utjecaja gravitacije gustoća korone pada brže s udaljenošću nego gradijent temperature što rezultira velikim gradijentom tlaka plina te dolazi do nadzvučne ekspanzije korone, tj. pojave vjetra koji postaje nadzvučan unutar nekoliko R_S . U Sunčevoj atmosferi postoji dinamička napetost između plazme i magnetskog polja. Tlak plina u fotosferi veći je od magnetskog tlaka, te je magnetsko polje zamrznuto u plazmi i prati njezino gibanje. U donjoj koroni, unutar aktivnih područja, magnetski tlak je veći od tlaka plina te je plazma zarobljena u magnetskom polju koroninih strujnica. U višim predjelima korone magnetsko polje slabi s udaljenošću, dok zbog iznimno brzog zagrijavanja korone tlak plina raste pa magnetsko polje ostaje zaleđeno u plazmi i Sunčev vjetar ga odnosi u interplanetarni prostor.

U početku vjetar polagano istječe sa Sunca, zatim počinje ubrzavati sve dok se ne oslobodi utjecaja Sunčeve gravitacije i poprimi relativno konstantnu brzinu (krajnja ili asimptotska brzina). No zagrijavanje korone tokovima topline ne može adekvatno opisati ubrzavanje Sunčevog vjetra, zbog čega je potrebno razmotriti i netermalne procese kao što su magnetohidrodinamički valovi (MHD valovi). Jedan od kandidata za ubrzavanje Sunčevog vjetra je disipacija Alfvénovih valova. To su transversalni MHD valovi koji se šire duž magnetskih silnica, a uključuju kolektivne oscilacije magnetskog polja i plazme. Alfvénovi valovi nastaju kao posljedica procesa prespajanja magnetskih silnica na površini Sunca prilikom čega dolazi do otpuštanja magnetske energije koja se valovima prenosi iz fotosfere u vanjsku atmosferu. Uzrok prespajanju su konvektivna gibanja u unutrašnjosti Sunca, zvučni valovi u fotosferi ili pojava dinamičkih procesa (npr. bljeskovi). Budući da magnetske silnice vibriraju pod utjecajem Alfvénovih valova, dolazi do pojave trenja s okolnim magnetiziranim materijalom, što rezultira zagrijavanjem korone i gušenjem vala.

1.3.1. Brzi i spori vjetar

Sunčev vjetar pokazuje bimodalnu strukturu brzih i sporih tokova čija prostorna raspodjela ovisi o heliografskoj širini i Sunčevom ciklusu. Emisija sporog vjetra ograničena je na $\pm 30^\circ$ h. š. od područja strujnog sloja (*eng.* current sheet), dok se brzi vjetar javlja na višim širinama. Budući da spori vjetar dolazi iz ekvatorskih područja Sunca, najčešće se zamjećuje u ravnini ekliptike, a ostaje i koncentriraniji nego brzi vjetar koji ispunjava većinu heliosfere. Razlike brzog i sporog vjetra dane su u tablici 5.

Tokovi brzog vjetra kreću se brzinama oko 750 km/s, relativno su uniformni, male gustoće protona i jednostavnog sastava sličnog sastavu fotosfere. Tokovi sporog vjetra sa brzinama 250-400 km/s, varijabilniji su, imaju veće gustoće protona i sastav sličan sastavu korone. Temperature p i e^- u brzom i sporom vjetru različite su, što je tipično za plin male gustoće. U brzom vjetru čestice veće mase imaju višu temperaturu ($T_p > T_e$), dok u sporom vjetru čestice manje mase imaju višu temperaturu ($T_e > T_p$).

Tablica 5. Karakteristike brzog i sporog vjetra. (preuzeto iz Lang, 2009).

	Brzi vjetar	Spori vjetar
Izvor	Koronine šupljine	Ekvatorijalne strujnice
Brzina	500-800 km/s	250-400 km/s
Gustoća protona, N_p	$3 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$	$10 \times 10^6 \text{ m}^{-3}$
Temperatura protona, T_p	$2.8 \times 10^5 \text{ K}$	$5.5 \times 10^4 \text{ K}$
Temperatura elektrona, T_e	$1.2 \times 10^5 \text{ K}$	$1.9 \times 10^5 \text{ K}$
Temperatura helija, T_{He}	$7.3 \times 10^5 \text{ K}$	$1.7 \times 10^5 \text{ K}$
Zastupljenost helija	0.036 (konstantna)	0.025 (vrlo varijabilna)
Magnetsko polje	2-10 nT	2-10 nT

Spori vjetar nastaje u aktivnim područjima oko Sunčevog ekvatora u tzv. pojasu strujnica (*eng.* streamer belt). To je područje zatvorenih magnetskih polja iznad kojih se nalaze klinaste strujnice. Vrh klinaste strujnice, tj. točka u kojoj se presijecaju otvorene i zatvorene silnice magnetskog polja nalazi se na $2.2 R_s$, a iznad vrha proteže se sloj struja (*eng.* current sheet). Zatvorena konfiguracija magnetskih polja u koroni priječi bijeg plina, pa spori vjetar izlazi duž otvorenih silnica koje se nalaze na rubovima klinastih strujnica. Spori vjetar se polako ubrzava uz šiljke strujnica i postiže krajnju brzinu od 300 km/s na udaljenosti od $25 R_s$.

Tokovi brzog vjetra (*eng.* high speed stream, HSS) nastaju u koroninim šupljinama, područjima otvorenih magnetskih silnica. Ispod površine Sunca supergranularne konveksijske ćelije koncentriraju magnetska polja u kromosfersku magnetsku mrežu ($10\text{--}100 \times 10^{-4}$ T) na kojoj je usidreno otvoreno magnetsko polje koroninih šupljina (10×10^{-4} T). Otvoreno magnetsko polje ekspandira s visinom u obliku koroninih lijevaka i ispunjava koronu. Vjetar nastaje na vrhovima lijevaka na visini od 20 000 km iznad fotosfere. Brzi vjetar opskrbljuje se plazmom iz mnoštva malih magnetskih strujnica koje supergranularna konvekcija dovodi u lijevak. Prespajanjem otvorenih silnica magnetskog polja koroninih šupljina i zatvorenih silnica magnetskih strujnica plazma se oslobađa u lijevak gdje se radijalno ubrzava MHD valovima duž otvorenih silnica prema van. Vjetar doseže krajnju brzinu od 750 km/s na udaljenosti 2.5-10 R_S .

1.3.2. Svojstva čestica Sunčevog vjetra

Termalno stanje plazme Sunčevog vjetra ovisi o mjestu nastanka u koroni i naknadnoj dinamici u heliosferi. Raspodjelu brzina čestica u termalnoj ravnoteži na određenoj temperaturi opisuje Maxwellova raspodjela, gdje većina čestica posjeduju prosječnu brzinu koja ovisi o temperaturi plina, dok se manji dio čestica nalazi u repovima raspodjele s manjim/većim brzinama od prosječne.

No, plazma korone i Sunčevog vjetra je nesudarna, rijetka, višekomponentna i neuniformna zbog čega u njoj prevladavaju kinetički procesi. Zbog tih osobina, a i zbog utjecaja makroskopskih sila, dolazi do odstupanja od lokalne termodinamičke ravnoteže što dovodi do iskrivljenja funkcije raspodjele brzina i pojave suprathermalnih čestica (Marsch, 2006), iznimno velikih brzina ($v \sim 50 v_{sv}$, v_{sv} -prosječna brzina Sunčevog vjetra). U prostoru brzina, suprathermalne čestice (strahl elektroni, netermalni ionski tokovi i diferencijalni tokovi težih iona) nalaze se između populacije čestica Sunčevog vjetra i Sunčevih energetske čestice.

Čestice Sunčevog vjetra dolaze iz dva različita izvora gdje poprimaju temperaturne karakteristike tih izvora, pa čestice iste vrste imaju različite temperature u brzom i sporom vjetru. Brzi vjetar nastaje u koroninim šupljinama gdje je plazma nesudarna i

rijetka i nije u termalnoj ravnoteži i gdje su temperature elektrona niže od temperatura protona. Vjetar se tamo ubrzava netermalnim procesima ovisno o smjeru magnetskog polja. Spori vjetar nastaje u ekvatorskom području gdje čestice manje mase imaju veće brzine od čestica veće mase što se i očekuje od višekomponentnog plina u termalnoj ravnoteži. Česti sudari unutar gustih središnjih dijelova koroninih strujnica prilagođavaju temperaturu čestica Maxwelllovoj raspodjeli, te brišu informacije o prethodnom ubrzavanju čestica. No na rubovima strujnica, na visinama oko $1.1 R_S$, korona je rijetka pa su i sudari među česticama rijetki, zbog čega se javljaju temperaturne razlike između čestica različite mase (Lang, 2009).

Elektroni. Zbog male mase nisu toliko važni za dinamiku Sunčevog vjetra, no osiguravaju kvazineutralnost plazme tvoreći električno polje. Raspodjela brzina elektrona pokazuje jaku anizotropiju, a sastoji se od populacije elektrona hladnije jezgre ($E \sim 10$ eV) koja dolazi od sudarne Colombove komponente, toplijih halo elektrona, dok se u brzom vjetru javlja i suprathermalna populacija elektrona (strahl elektroni, $E \geq 50$ eV) koja nosi toplinu duž magnetskog polja.

Protoni. Zbog manje sudarnosti i interakcije s MHD valovima raspodjele brzina protona sklone su znatnijim iskrivljenjima. Raspodjele brzina kreću se od Maxwelllove u sporom vjetru do netermalnih u brzom vjetru, a važne značajke su im anizotropija temperature i protonski tokovi sa brzinama oko $1.5 V_A$ ($V_A = B/(\mu_0 \rho)^{1/2}$, Alfvénova brzina-oko 1 000 km/s u donjoj koroni, 32 km/s na 1 AJ). Srednje brzine protona na udaljenosti od 1 AJ kreću se između 300-800 km/s, a kinetička temperatura T_p od 10^4 K do nekoliko 10^5 K. Porastom udaljenosti brzina protona ostaje konstantna. Temperatura protona u sporom vjetru $\sim R^{-1.21}$ što je očekivan rezultat za adijabatsku ekspanziju, dok se brzi vjetar hladi $\sim R^{-0.69}$ što govori da postoje dodatni mehanizmi zagrijavanja kao što je disipacija Alfvénovih valova. Posljedica zagrijavanja protona je anizotropija temperature koja u brzom vjetru pokazuje svojstvo $T_{p\perp} > T_{p\parallel}$ na lokalno magnetsko polje, dok je u sporom vjetru situacija obrnuta $T_{p\perp} < T_{p\parallel}$.

Teški ioni. Dolaze u raznim stupnjevima ionizacije udjela sličnog onom u koroni, izuzetak je He sa udjelom 3-5%. Temperatura iona proporcionalna je atomskoj masi u slučaju rijetkih sudara i ciklotronskog zagrijavanja (tada vrijedi: $T_i > m_i T_p$), ili je gotovo neovisna o masi i jednaka za sve ione u slučaju čestih sudara.

Budući da Colombovim sudarima $T_i \rightarrow T_p$ i $V_i \rightarrow V_p$, grijanje iona pomoću valova igra ključnu ulogu u njihovom oslobađanju iz korone. Zagrijavanje teških iona u brzom vjetru ovisno je o smjeru magnetskog polja, što se očituje u većoj temperaturi okomito na magnetsko polje ($T_{\perp}/T_{p\parallel} \gg 1$). Budući da je plazma skoro nesudarna, jedino moguće objašnjenje je zagrijavanje iona rezonancijom Alfvénovih valova s ciklotronskim kretanjem iona u magnetskom polju, tzv. ion-ciklotron procesom. Ciklotronske frekvencije težih iona niže su od frekvencija protona i elektrona, i nalaze se u području frekvencija na kojima su magnetski valovi najintenzivniji. Magnetski valovi dolaze u rezonanciju s ionima te im predaju energiju, prilikom čega se ioni ubrzavaju, a valovi guše.

Valovi griju teže ione i u interplanetarnim brzim tokovima, gdje su također brži od protona $V_i \leq V_p + V_A$ (V_A , lokalna Alfvénova brzina), a ponekad se gibaju na Alfvénovim valovima (na brijegu ili dolu) bez sudjelovanja u gibanju vala (Marsch, 2006).

1.3.3. *Magnetsko polje u heliosferi*

Zbog visoke električne vodljivosti plazme Sunčevo magnetsko polje zaleđeno je u plazmi Sunčevog vjetra, te ga vjetar vuče za sobom u interplanetarni prostor. Na taj se način formira interplanetarno magnetsko polje (skr. IMP, *eng.* interplanetary magnetic field, IMF) kao produžetak Sunčevog magnetskog polja u Svemir. IMP se prostire sve do granica heliosfere (područja utjecaja Sunca). Iako čestice plazme kreću radijalno sa Sunca, zbog rotacije se njihova putanja zavija u spiralu koja zaostaje za vrtnjom Sunca na većim udaljenostima. Moment količine gibanja čestica ovisi o mjestu izlaska sa Sunca, a kako je moment očuvan, komponenta brzine okomita na radijus vektor mora opadati s udaljenošću, tj. putanja čestica se zavija (Vujnović, 1994). Zajedno s putanjom čestica zavijaju se i silnice magnetskog polja te poprimaju oblik Arhimedove spirale, koja se još naziva i Parkerova spirala, prema Eugene Parkeru koji je 1958. godine razvio prvi hidrodinamički model Sunčevog vjetra s pripadnim magnetskim poljem. Smjer polja se zbog spiralnog oblika mijenja, od radijalnog blizu Sunca do skoro azimutalnog na velikim udaljenostima. Na udaljenosti 1 AJ kut između silnica magnetskog polja i

radijalnog smjera iznosi oko 45° . Radijalna komponenta magnetskog polja dipola pada s kvadratom udaljenosti ($B_r \sim r^{-2}$), zbog čega bi jakost polja na 1 AJ trebala iznositi 10^{-11} T. No, budući da je polje namotano u spiralu, osjeća se utjecaj azimutalne komponente koja pada linearno s udaljenošću ($B_\theta \sim r^{-1}$) te je polje na 1 AJ 100 puta jače i iznosi oko 10^{-9} T.

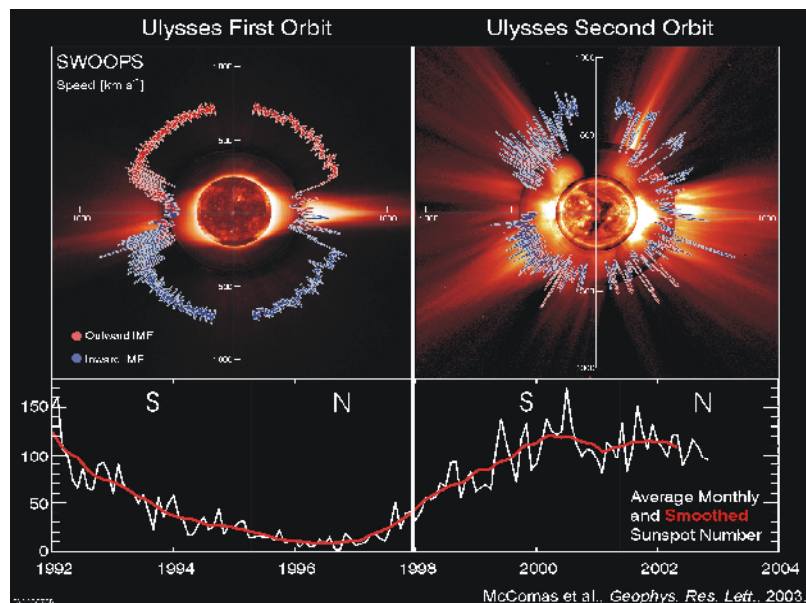
Duž ravnine Sunčevog magnetskog ekvatora susreću se silnice sa suprotnih strana dipola pa se zbog nagle promjene polariteta Sunčevog magnetskog polja duž ravnine ekvatora proteže magnetski neutralan sloj. Promjena polariteta inducira električnu struju koja se širi kroz heliosferu u tzv. heliosfernom sloju struja (skr. HSS, *eng.* heliospheric current sheet, HCS). Debljina sloja iznosi oko 10 000 km, a predstavlja produžetak Sunčevog magnetskog ekvatora u Sunčev vjetar. Nastaje na vrhovima klinastih strujnica tj. na prijelazu između zatvorenih magnetskih strujnica i otvorenih silnica koje odnosi Sunčev vjetar. HSS je nagnut s obzirom na ravninu ekliptike, zbog nagiba Sunčevog magnetskog dipola $\mathbf{M}$ naspram osi rotacije $\mathbf{\Omega}$, i iskrivljen, zbog kvadrupolne komponente Sunčevog magnetskog polja. Tijekom Sunčevog ciklusa nagib dipola se mijenja u odnosu na os rotacije. Blizu minimuma aktivnosti magnetski dipol i os rotacije skoro su poravnati te se HSS ugrubo podudara sa Sunčevom ekvatorijalnom ravninom, dok je u fazi opadanja aktivnosti kut znatan a HSS iskrivljen te se prilikom rotacije Sunca ljulja gore-dolje. Zbog iskrivljenosti HSS-a, unutar ekvatorske ravnine i ravnine ekliptika planeta, IMP se može podijeliti na nekoliko magnetskih sektora u kojima se naizmjenice javljaju magnetska polja suprotnih polariteta. Magnetski sektori korotiraju sa Suncem i prate spiralnu strukturu IMP-a. Korotacijom HSS-a sa Suncem, Zemlja je naizmjenice izložena magnetskim sektorima ispod i iznad HSS te osjeća pravilne, periodične promjene polariteta IMP-a.

1.3.4. *Sunčev vjetar u vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti*

Blizu minimuma Sunčeve aktivnosti Sunčevo magnetsko polje približno je dipolnog oblika. Na polovima se nalaze velike koronine šupljine s otvorenim magnetskim silnicama, a pojas strujnica okružuje Sunčev ekvator. Pri takvoj konfiguraciji magnetskog polja na višim heliografskim širinama javlja se gotovo konstantna brza komponenta

vjetra, dok se u relativno uskom pojasu oko ekvatora javlja spora komponenta (slika 9, lijevo) koja nastaje na vrhovima i podnožjima strujnica, te graničnim područjima između strujnica i koroninih šupljina.

U fazi pada Sunčeve aktivnosti, oko 2 godine prije minimuma, HSS je iskrivljen, a velike koronine šupljine pokazuju produžetke na niže heliografske širine. Nabori HSS-a i spuštanje koroninih šupljina omogućuju širenje brzog vjetra na niže heliografske širine te se brzi vjetar može zamijetiti i u ravnini ekliptike. U to vrijeme koronine šupljine su stabilne, te se brzi vjetar javlja na istim heliografskim duljinama tijekom nekoliko Sunčevih rotacija. Sa brzinama oko 600 km/s brzi vjetar stiže do Zemlje za 3 dana.



Slika 9. Brzina Sunčevog vjetra blizu Sunčevog minimuma (lijevo), i blizu Sunčevog maksimuma (desno) (preuzeto iz <http://science.nasa.gov>).

1.3.5. Sunčev vjetar u vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti

Blizu maksimuma aktivnosti raspadaju se globalna magnetska struktura i HSS. Prilikom promjene polariteta globalnog polja koronine šupljine se smanjuju i migriraju prema umjerenim i nižim heliografskim širinama, dok se strujnice šire po cijeloj površini Sunca. Nestaje i bimodalna struktura Sunčevog vjetra, pa su brzine vjetra varijabilnije i

manje, a brzi i spori vjetar se javljaju na svim heliografskim širinama (slika 9, desno). Vjetar nastaje u više izvora, kao što su koronine šupljine, koronine strujnice, koronini izbačaji mase i razne magnetske strukture povezane sa Sunčevom aktivnošću. Spori vjetar nastaje u strujnicama ili okolini malih koroninih šupljina, a brzi nastaje u unutrašnjosti najvećih koroninih šupljina, dok koronini izbačaji mase sporadično perturbiraju tok Sunčevog vjetra.

1.3.6. *Sunčev vjetar u interplanetarnom prostoru*

Procesi ubrzavanja čestica u interplanetarnom prostoru za vrijeme smanjene Sunčeve aktivnosti povezani su s brzim i sporim vjetrom. Jedan od mehanizama ubrzavanja čestica su Alfvénovi valovi koji se šire kroz brzi vjetar, no čestice se uglavnom ubrzavaju na područjima interakcije brzog i sporog vjetra na tzv. korotirajućim područjima interakcije (skr. KPI, *eng.* corotating interactive regions, CIR). Do interakcije tokova brzog i sporog vjetra dolazi zbog razlika u brzinama i radijusu zakrivljenosti putanja pojedinih komponenti vjetra. U slučaju kada brzi vjetar izvire iza područja nastanka sporog vjetra, na većim udaljenostima od Sunca brzi tok (veći radijus zakrivljenosti) dostiže spori tok (manji radijus zakrivljenosti) te nastaju područja interakcije (KPI) gdje dolazi do kompresije plazme i magnetskog polja što dovodi do porasta gustoće, temperature, tlaka i jakosti polja. Područja interakcije korotiraju sa Suncem, dok se plazma giba približno u radijalnom smjeru. Na prednjoj strani KPI ubrzavaju se čestice sporog vjetra, dok se na stražnjoj strani usporavaju čestice brzog vjetra. Područje kompresije gotovo je poravnato sa spiralnim magnetskim poljem, zbog čega je gradijent tlaka okomit na spirale te ima transverzalnu i radijalnu komponentu. Zbog smjera gradijenta tlaka spori vjetar se otklanja u smjeru rotacije Sunca, dok se brzi vjetar na stražnjoj strani otklanja u suprotnom smjeru. Kompresija i otklon vjetra u KPI ima značajan učinak na magnetsko polje koje prolazi kroz istu kompresiju kao i plazma. Kompresija magnetskog polja uzrokuje porast jakosti polja i otklon vektora polja izvan ravnine ekliptike. To je jedan od mehanizama nastanka komponente IMP-a južne orijentacije koja uzrokuje geomagnetske poremećaje. IMP je vektor s 3 komponente

smjera, od kojih su dvije (B_x i B_y) orijentirane paralelno s ravninom ekliptike, dok je treća komponenta B_z okomita na ravninu ekliptike. Na udaljenostima većim od 2 AJ dolazi do nastanka udarnih valova u KPI.

KPI su dominantne strukture u heliosferi u vrijeme minimuma i pada aktivnosti, kada su glavni izvor ubrzavanja čestica (na $E \sim$ nekoliko keV - nekoliko MeV). Kompresija i otklon plazme u KPI uzrokuje geomagnetsku aktivnost bez obzira na to da li je došlo do formacije udarnih valova koji rijetko nastaju unutar Zemljine orbite. Iza KPI stižu tokovi brzog vjetra ($v > 600$ km/s), a Alfvénovi valovi koji se šire kroz brzi vjetar uzrokuju otklone tokova protona i vektora IMP-a na vremenskoj skali od nekoliko minuta do nekoliko sati, što je još jedan mehanizam nastanka IMP-a južne orijentacije. Povremeni otkloni IMP prema južnoj orijentaciji uzrokuju geomagnetsku aktivnost slabog do umjerenog intenziteta, a budući da tokovi brzog vjetra nastaju u stabilnim koroninim šupljinama koje korotiraju sa Suncem i po nekoliko mjeseci, geomagnetska aktivnosti javlja se svakih 27 dana.

2. ZEMLJA

Zemlja je peti po veličini planet Sunčevog sustava, a najveći je i najgušći planet od četiri stjenovita planeta. Starost joj se procjenjuje na 4,54 milijardi godina, dok se život pojavio kojih milijardu godina poslije. Površina Zemlje sastoji se od tektonskih ploča koje plutaju na rastaljenom materijalu. Oko 71% površine prekriveno je oceanima a ostatak zauzimaju kontinenti. Zemljina os rotacije nagnuta je $23,4^\circ$ s obzirom na normalu orbitalne ravnine, a zbog rotacije ima oblik geoida ($R_{z,ekvator}=R_{z,pol}+21$ km, R_z -radijus Zemlje). Masa Zemlje iznosi oko $5,98 \times 10^{24}$ kg.

Unutrašnjost Zemlje podijeljena je na slojeve. Vanjski sloj ili kora sastoji se uglavnom od silikata, a od plašta je dijeli Mohorovičićev diskontinuitet (35 km). Plašt je podijeljen na gornji (kruti) i donji (tekući) plašt, a ispod njega nalazi se vanjska jezgra, područje niske viskoznosti koje okružuje krutu unutrašnju jezgru.

Kemijski sastav Zemlje: $Fe(32,1\%)$, $O(30,1\%)$, $Si(15,1\%)$, $Mg(13,9\%)$, $S(2,9\%)$, $Ni(1,8\%)$, $Ca(1,5\%)$, $Al(1,4\%)$. Zbog sedimentacije težih elemenata jezgra se uglavnom sastoji od $Fe(88,8\%)$, ponešto $Ni(5,8\%)$ i $S(4,5\%)$.

Sastav atmosfere jedinstven je u Sunčevom sustavu budući da sadrži visoki udio O_2 . Atmosfera sadrži: $N_2(78\%)$, $O_2(21\%)$, $Ar(0,9\%)$, $CO_2(0,033\%)$, $H_2(0,01\%)$, te He , Ne , CH_4 i ostale plinove u tragovima. Atmosfera se dijeli na troposferu, stratosferu, mezosferu i termosferu. Iznad njih je egzosfera koja postupno prelazi u magnetosferu, područje interakcije geomagnetskog polja i Sunčevog vjetra.

2.1. ZEMLJINO MAGNETSKO POLJE

Zemljino magnetsko polje se u prvom približenju može prikazati poljem magnetskog dipola. Os dipola prolazi kroz središte Zemlje i nagnuta je $11,3^\circ$ s obzirom na os rotacije. Dva antipodalna područja na kojima os dipola presijeca površinu Zemlje nazivaju se

Sjeverni i Južni geomagnetski polovi. Južni pol Zemljinog magnetskog polja nalazi se na sjevernoj polutci, a sjeverni pol je na južnoj polutci.

Ukupno geomagnetsko polje suma je dipolne komponente ($B \sim r^{-3}$) i nedipolnih komponenta višeg reda (kvadrupolne, oktopolne,...). Porastom udaljenosti od Zemlje komponente višeg reda padaju brže, pa na velikim udaljenostima Zemljino polje ima približno dipolni oblik. Doprinos nedipolnih komponenta ukupnom polju je oko 20%, zbog čega se stvarni magnetski polovi ne poklapaju s geomagnetskim polovima. Sjeverni i Južni magnetski polovi nalaze se na području gdje je magnetsko polje okomito na površinu. Područja magnetskih polova pomiču se do 15 km/god neovisno jedan o drugom, zbog čega i nisu antipodalni. Linija koja spaja magnetske polove odmaknuta je 530 km od središta Zemlje.

Karakteristike i nastanak polja. Jakost magnetskog polja na površini Zemlje raste od ekvatora prema polovima, u ekvatorskom području iznosi oko 30 000 nT, dok je na polovima dvostruko veća; na sjevernoj polutci oko 60 000 nT, a na južnoj oko 70 000 nT.

Budući da permanentni magnetizam nestaje pri višim temperaturama, unutrašnjost Zemlje može biti magnetizirana jedino bliže površini. Temperatura Zemljine jezgre (oko 4 000°C) veća je od Curieve temperature željeza (770°C), na kojoj dolazi do dezorijentacije elementarnih magneta željeza i gubitka magnetizacije sredstva, stoga su električne struje koje teku u vanjskoj jezgri uzrok magnetskog polja. Struje u vanjskoj jezgri nastaju zbog konvekcije rastaljenog željeza koja nastaje utjecajem Coriolisove sile te zbog sedimentacije težih elemenata vanjske jezgre na unutrašnju jezgru. Kada se tok rastaljenog željeza giba preko postojećeg magnetskog polja dolazi do indukcije električnih struja koje stvaraju sekundarno magnetsko polje iste orijentacije kao originalno polje. Generirano polje zarobljeno je u jezgri, te podržava postojeće polje (dinamo proces).

Prema obliku i mjestu nastanka razlikuje se:

- a) glavno polje - uzrokuju ga električne struje u unutrašnjosti Zemlje;
- b) polje kore - zauzima manja područja, doprinosi oko 200 nT. Uzrokuju ga magnetizirane stijene i električne struje u kori nastale promjenama vanjskog magnetskog polja (magnetske anomalije);

c) vanjsko polje - uzrokuju ga električne struje u ionosferi i magnetosferi. Pridonosi dnevnim varijacijama polja od 25 nT, te otklonu površinskog polja za 1° .

Vremenske promjene polja. Zemljino magnetsko polje podložno je promjenama na svim vremenskim skalama, od sekularnih (mileniji, tisućljeća i stoljeća) do kratkovremenih (dan, mjesec) promjena.

Dipolno polje podložno je kvaziperiodičkim reverzalima i sekularnim varijacijama. U periodu od 1840. do 1960. godine dipolni moment se smanjio za 8% s time da se pad i dalje nastavlja, a geomagnetski polovi putuju na zapad oko $0,05^\circ/\text{god}$. Najintrigantnije promjene dipolnog polja su tzv. reverzali i ekskurzije. Pod reverzalom se podrazumijeva promjena polariteta magnetskog polja, dok ekskurzija predstavlja zaustavljeni reverzal. Zemljino magnetsko polje mijenja polaritet u intervalima od nekoliko 10 000 godina do nekoliko milijuna godina sa srednjim periodom od 250 000 godina.

Period promjene nedipolne komponente manji je od 100 godina. Tipična promjena iznosi 10 nT/god, a cijela nedipolna komponenta pomiče se $0,2^\circ/\text{god}$ na zapad.

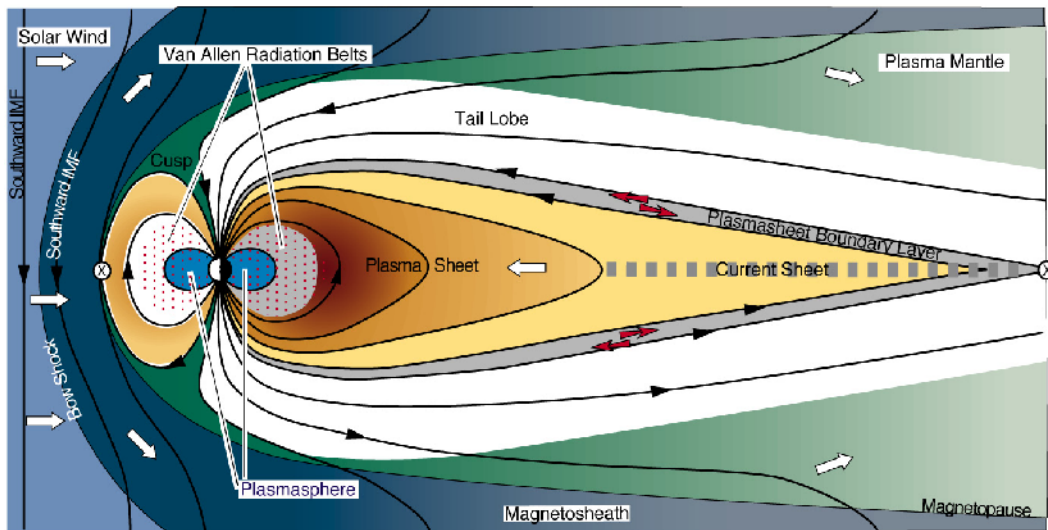
Magnituda vanjskog polja manja je i varijabilnija te nema dugotrajni učinak na glavno polje, a iznosi nekoliko 100 nT. Vanjsko polje pokazuje razne periode varijacije pod utjecajem Sunčevog vjetra, od dnevnog do 11 godišnjeg perioda.

2.2. MAGNETOSFERA

U toku Sunčevog vjetra Zemljino magnetsko polje izdubljuje šupljinu koja se naziva magnetosfera. Ona štiti površinu planeta od visokoenergetskih čestica Sunčevog vjetra, a karakterizira ju gusta atmosfera i ionosfera te jako magnetsko polje. Strukturu i vladanje magnetosfere određuje interakcija geomagnetskog polja i Sunčevog vjetra.

Geomagnetsko polje (60 000 nT) mnogo je jače od IMP-a (2-10 nT) i polja magnetskih oblaka (15-30 nT), zbog čega silnice IMP-a skreću oko magnetosfere. Budući da nabijene čestice ne mogu prelaziti preko magnetskih silnica, tok Sunčevog vjetra skreće oko planeta prateći silnice IMP-a. Iako je Sunčev vjetar vrlo rijedak, ima snažan utjecaj na magnetosferu. Dok normalno naprezanje Sunčevog vjetra na magnetosferu utječe na

veličinu i oblik, tangencijalno naprezanje određuje količinu energije koja prodire u magnetosferu. Tangencijalno naprezanje nastaje kao posljedica prespajanja silnica IMP-a i geomagnetskog polja te utječe na konvekciju silnica geomagnetskog polja sa dnevne na noćnu stranu magnetosfere (Bothmer & Daglis, 2007).



Slika 10. Struktura magnetosfere (preuzeto iz <http://space.rice.edu>).

Struktura magnetosfere. Struktura magnetosfere prikazana je na slici 10. Brzina Sunčevog vjetra veća je od brzine zvuka i Alfvénove brzine, pa interakcijom Sunčevog vjetra i geomagnetskog polja ispred dnevne strane magnetosfere nastaje udarni val (*eng.* bow shock). Na području udarnog vala Sunčev vjetar se usporava na podzvučne brzine, otklanja i grije. Prema Langu (2006), udarni val se u vrijeme mirnih uvjeta Sunčevog vjetra nalazi na 10-12 R_z . Čestice Sunčevog vjetra koje uspiju prodrijeti kroz udarni val, dolaze u magnetski omotač (*eng.* magnetosheath) gdje se dodatno usporavaju (ioni ~1 keV, e^- ~100 eV). Gustoća plazme u omotaču iznosi oko 20 čestica/cm³, no još uvijek je veća od gustoće magnetosferske plazme (1-10 čestica/cm³). Iza magnetskog omotača nalazi se granica magnetosfere, tj. magnetopauza. U prvom približenju, magnetopauza nastaje na udaljenosti 8-11 R_z gdje su dinamički tlak Sunčevog vjetra ρV_{sv}^2 i magnetski tlak Zemljinog magnetskog polja $B^2/2\mu_0$ izjednačeni, no pri snažnim udarima Sunčevog vjetra može se povući unutar orbita geostacionarnih satelita (Bothmer & Daglis, 2007).

Djelovanjem Sunčevog vjetra noćna strana magnetosfere izdužuje se u magnetski rep (*eng.* magnetotail) koji izgleda kao rep kometa i proteže se daleko iza Mjesečeve orbite do nekoliko stotina R_z (Pulkkinen, 2007). U repu se pohranjuje energija Sunčevog vjetra koja se oslobađa za vrijeme magnetskih podoluj i oluja. Magnetski rep je podijeljen na sjeverni i južni dio (*eng.* tail lobes) koji su međusobno odijeljeni slojem plazme. To su gotovo prazna područja ($0,01$ čestica/cm³) s relativno jakim magnetskim poljem koje konvergira iznad polova. Magnetsko polje sjevernog dijela repa usmjereno je prema Zemlji, dok je polje južnog dijela usmjereno od Zemlje. Silnice sjevernog i južnog djela jednim se krajem spajaju s polarnim kapama, dok se drugim krajem spajaju sa IMP-om, zbog čega na udaljenosti 200-220 R_z u magnetski rep ulazi plazma Sunčevog vjetra. Na udaljenostima većim od 20 R_z , polja sjevernog i južnog djela skoro su antiparalelna i konstantne jakosti (oko 20 nT), zbog čega u ekvatorijalnoj ravnini nastaje neutralni sloj plazme (*eng.* plasma sheet), (Pulkkinen, 2007). To je područje zatvorenih magnetskih silnica, niske gustoće plazme i slabog magnetskog polja (nekoliko nT). Kroz sloj plazme teče električna struja tzv. struja neutralnog sloja (*eng.* cross-tail current) usmjerena od zore prema sumraku. Unutrašnja granica sloja plazme nalazi se na 11 R_z , pa je utjecaj struje neutralnog sloja važniji u području repa nego u unutrašnjoj magnetosferi, jer magnetsko polje struje utječe na izduživanje magnetskog repa. Čestice sloja plazme imaju energije oko keV, a gustoća plazme ovisi o gustoći Sunčevog vjetra i ima prosječnu vrijednost 0.4-2 čestica/cm³. Pod utjecajem magnetosferskog konveksijskog električnog polja, plazma kontinuirano teče iz sjevernog i južnog repa prema Zemlji i prema području struja neutralnog sloja. Sloj plazme je vrlo nestabilno područje te se za vrijeme podoluj i oluja tamo javljaju brzi tokovi plazme, magnetsko prespajanje i velikoskalne rekonfiguracije polja.

Auroralni ovali su ovalna područja oko Sjevernog i Južnog geomagnetskog pola u kojima se javlja polarna svijetlost (aurora). Unutar ovala nalaze se polarne kape, područja otvorenih magnetskih silnica. Polarne kape su projekcija magnetskog repa na ionosferu, te su putem silnica magnetskog repa povezane sa IMP-om. Tipične pojave u području polarnih kapa su polarna kiša i polarni vjetar. Razdjelnica između silnica noćne i dnevne strane nalazi se nad polovima u obliku lijevka (*eng.* cusp), koji omogućuje ulazak plazme iz magnetskog omotača u ionosferu. Projekcija lijevka na ionosferu naziva se dnevni

oval. To je područje gdje se za vrijeme polarne zime može zamijetiti aurora. Najsajnije aurore povezane su s tzv. Birkelandovim strujama, a javljaju se na noćnom ovalu koji je projekcija sloja plazme na sjevernu i južnu polutku.

2.2.1. Magnetosferska električna polja

Električna polja u magnetosferi su konvekcijsko polje povezano sa Sunčevim vjetrom i korotacijsko polje nastalo zbog rotacije Zemlje. Električna polja imaju jak utjecaj na tok magnetosferske plazme, budući da njihovim djelovanjem dolazi do $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifta. Čestice nižih energija uglavnom se kreću pod utjecajem $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifta, a manje ovise o magnetskom driftu (gradijentni drift i drift zakrivljenosti), dok se čestice većih energija kreću pod utjecajem i magnetskog, i $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifta.

Konvekcijsko električno polje. Magnetosfersko konvekcijsko električno polje nastaje kao posljedica prespajanja antiparalelnih silnica IMP-a i geomagnetskog polja koje se događa na dnevnoj strani magnetosfere kada je IMP južne orijentacije. Prespajanjem se silnice geomagnetskog polja otvaraju, a u magnetosferu ulaze Sunčev vjetar i magnetsko polje. Sunčev vjetar odnosi otvorene silnice preko polarnih kapa u udaljeno područje prespajanja u repu, te tako pokreće magnetosfersku konvekciju s dnevne na noćnu stranu. Električno polje Sunčevog vjetra, usmjereno od zore prema sumraku ($\mathbf{E}_{sv} = -\mathbf{v}_{sv} \times \mathbf{B}_{sv}$), projicira se duž otvorenih magnetskih silnica u polarnu ionosferu gdje dolazi do horizontalnog $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drifta plazme preko polarnih kapa u smjeru ponoći. U udaljenom području prespajanja otvorene silnice se zatvaraju i vraćaju na dnevnu stranu, a plazma se na njima ubrzava prema unutrašnjoj magnetosferi. U magnetskom repu tada nastaje magnetosfersko konvekcijsko električno polje u smjeru sumraka ($\mathbf{E}_{konv} = -\mathbf{v} \times \mathbf{B}_{geo}$). Projekcija konvekcijskog polja u auroralnu zonu ionosfere uzrokuje gibanje plazme s noćne na dnevnu stranu. Javlja se tzv. ionosferska konvekcija; plazma se giba preko polarnih kapa prema ponoći (otvorene silnice; drift pod utjecajem električnog polja Sunčevog vjetra) te se vraća kroz auroralne ovale na dnevnu stranu (zatvorene silnice; drift pod utjecajem konvekcijskog polja). Efekti konvekcijskog polja ovise o jakosti IMP-a i veličini područja prespajanja na dnevnoj strani. Proces i povezan s konvekcijom jačaju

za vrijeme mirnih uvjeta, a taj osnovni tok uvijek je prisutan, čak i za vrijeme promjena povezanih s procesom podoluje. Prilikom magnetosferske konvekcije plazme prema Zemlji, dolazi do zonalnog razdvajanja naboja i nastanka električnog polja suprotnog smjera koje štiti unutrašnju magnetosferu od konvekcijskog polja, pa se u unutrašnjoj magnetosferi osjeća samo utjecaj korotacijskog polja.

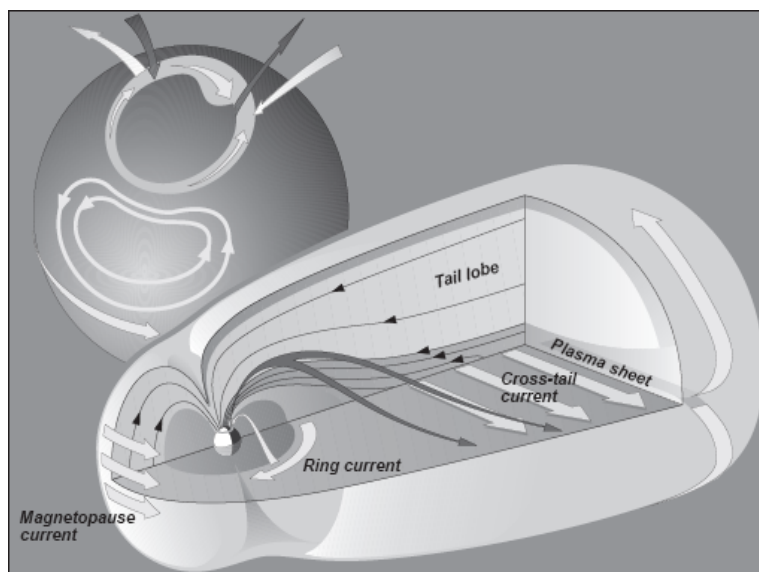
Korotacijsko električno polje. Zbog utjecaja trenja, neutralne atmosferske čestice korotiraju sa Zemljom, a česti sudari iona i elektrona sa neutralnim atomima prisiljavaju i ionosferu na korotaciju. Budući da i silnice geomagnetskog polja također korotiraju sa Zemljom, dolazi do nastanka električnog polja $\mathbf{E}_{\text{kor}} = -(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$ usmjerenog radijalno prema van koje pada sa r^{-2} ($\boldsymbol{\Omega}$ - brzina rotacije Zemlje).

2.2.2. Magnetosferske struje

Oblik magnetosfere održavaju intenzivne električne struje (slika 11): struja na magnetopauzi, struja neutralnog sloja, prstenasta struja i Birkelandove struje.

Struja magnetopauze predstavlja granicu između vanjskog interplanetarnog polja i unutrašnjeg geomagnetskog polja. Na magnetopauzi, prilikom međudjelovanja Sunčevog vjetra i geomagnetskog polja javlja se Lorentzova sila koja djeluje na čestice plazme. Sila je usmjerena okomito na geomagnetsko polje i na smjer brzine plazme, zbog čega dolazi do otklona putanja čestica. Pozitivno nabijene čestice kruže oko magnetskog polja u smjeru kazaljke na satu, a negativno nabijene čestice u suprotnom smjeru. Razdvajanje naboja stvara struju u smjeru sumraka na dnevnoj strani magnetopauze, a strujni krug se zatvara strujom u smjeru zore na noćnoj strani magnetopauze.

Sustav struja magnetskog repa proteže se na noćnoj strani magnetosfere (10-200 R_z). Struja teče kroz sloj plazme (struja neutralnog sloja) od zore prema sumraku te se grana duž magnetopauze u dva toka ispod i iznad sloja plazme. Ponavljanje ovog toka duž magnetskog repa stvara sustav struja u obliku dva solenoida sa strujama koje teku u suprotnom smjeru. Struje magnetskog repa nastaju mehanizmom razdvajanja nabijenih čestica kao i struja magnetopauze, no budući da je magnetsko polje repa izduženo, čestice se gibaju skoro okomito na spojnicu Sunce - Zemlja (McPherron, 2010).



Slika 11. Magnetosferski sustavi struja (preuzeto iz Pulkkinen, 2006).

Prstenastu struju sačinjavaju ioni i elektroni zarobljeni na silnicama geomagnetskog polja. Ioni (uglavnom H^+ , He^+ i O^+ energija 10-200 keV) i elektroni gibaju se azimutalno oko Zemlje na udaljenosti 2-7 R_z (Pulkkinen, 2006). Prstenasta struja pojačava vanjske predjele geomagnetskog polja čime doprinosi ekspanziji magnetosfere, dok ga na unutrašnjim predjelima oslabljuje. Intenzitet struje ovisi o razini geomagnetske aktivnosti, zbog čega joj se u magnetski aktivnom periodu mijenja sastav prilikom pojačanog istjecanja iona iz ionosfere. Strujom tada prevladavaju ionosferski O^+ ioni i ponešto iona He^+ . Magnetskom olujom ubrizgavaju se čestice iz sloja plazme u unutrašnju magnetosferu, zbog čega struja privremeno jača te uzrokuje slabljenje Zemljinog polja za 1-2% (Stern, 2008). Struja slabi procesima razmjene naboja s česticama geokorone. Kretanje nabijenih čestica prstenaste struje suma je tri kvazi-periodička gibanja: 1) ciklotronskog gibanja oko vodećeg centra, djelovanjem Lorentzove sile; 2) gibanja duž silnica između polarnih zrcalnih točaka zbog konvergencije dipolnog polja; 3) azimutalnog gibanja po zatvorenoj ljusci oko osi dipola, koje je posljedica gradijentnog drifta i drifta zakrivljenosti.

Struje duž magnetskih silnica (*eng.* field-aligned currents), tzv. Birkelandove struje, povezuju ionosferu s magnetosferom i odgovorne su za prijenos energije Sunčevog vjetra u ionosferu. Budući da je ionosfera ohmski vodič, energija se dissipira te dolazi do

zagrijavanja ionosfere, pojave sekundarnih Hallovih struja (konvektivne electrojet struje), te ubrzavanja iona i elektrona. Ioni (uglavnom O^+) napuštaju ionosferu i pridonose prstenastoj struji, dok brzi elektroni uzrokuju polarnu svjetlost u auroralnim ovalima (Stern, 2008). Birkelandove struje ulaze u ionosferu na području auroralnih ovala, a teku u dva koncentrična strujna sloja oko geomagnetskih polova. Strujni slojevi nastaju različitim fizikalnim mehanizmima, ali se kroz ionosferu spajaju u zajednički strujni krug. Prvi strujni sloj (područje 1), koji ulazi u ionosferu na višim auroralnim širinama, povezan je magnetskim silnicama sa magnetskim repom, dok je drugi sloj (područje 2), koji se nalazi na nižim širinama povezan s unutrašnjom magnetosferom. Struja područja 1 ulazi u ionosferu duž magnetskih silnica na jutarnjoj strani, gdje se razdvaja na dvije grane. Jedna grana teče kroz dnevno područje polarnih kapa i izlazi na večernjoj strani (Hallova struja), dok druga grana (Pedersenova struja) teče prema strujnom sloju područja 2. Struja područja 2 teče u suprotnom smjeru, izlazi na jutarnjoj strani, teče preko noćne strane kao dio prstenaste struje te se vraća u ionosferu na večernjoj strani. Budući da Birkelandove struje teku u dva gotovo paralelna strujna sloja, magnetsko polje struja ograničeno je između strujnih slojeva, zbog čega su efekti Birkelandovih struja gotovo nevidljivi na površini Zemlje te su poremećaji geomagnetskog polja na površini uglavnom posljedica konvektivnih electrojet struja (McPherron, 2010).

Auroralne electrojet struje su jake horizontalne struje koje teku u auroralnoj ionosferi na visini oko 120 km. To je sekundarni ionosferski sustav struja kojeg pokreću Birkelandove struje, a sastoji se od dvije konvektivne electrojet struje. Na višim auroralnim širinama magnetsko polje je skoro okomito na površinu, pa je električno polje Birkelandovih struja horizontalno, zbog čega na elektrone i ione u auroralnoj ionosferi djeluje ukršteno magnetsko i električno polje te se javlja $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift. Na visinama oko 120 km, sudarnost iona sa neutralnim atomima je veća nego sudarnost elektrona te je ionski drift mnogo slabiji od elektronskog, zbog čega nastaje struja. Takve struje nazivaju se Hallove struje i prisutne su u vodiču smještenom u ukršteno električno i magnetsko polje. Konvektivne electrojet struje teku od podneva prema ponoći. Struja na području zore teče prema zapadu (zapadni electrojet), dok struja na području sumraka teče prema istoku (istočni electrojet). Zapadni electrojet oslabljuje magnetsko polje na površini, a istočni

electrojet ga pojačava. Tipični poremećaji zapadnog electrojeta su oko 500-1 000 nT, dok su poremećaji istočnog duplo manji (McPherron, 2010).

2.2.3. Magnetosferska plazma

Izvori magnetosferske plazme su Sunčev vjetar i Zemljina ionosfera, no relativna važnost ta dva izvora je nepoznata. Protoni su primarni ioni u Sunčevom vjetru i tokovima ionosferske plazme, a ioni He^+ također imaju miješano porijeklo. Ionosfera je izvor iona O^+ i O^{2+} , dok ioni He^{2+} , te ioni kisika višeg stupnja ionizacije dolaze iz Sunčevog vjetra. Za vrijeme pojačane geomagnetske aktivnosti veća je prisutnost ionosferske plazme u magnetosferi, pa se ioni O^+ mogu naći u prstenastoj struji, unutrašnjem sloju plazme i dalekom magnetskom repu, dok je pri mirnim uvjetima veći udio plazme Sunčevog vjetra (Rasikhkangas, 1998).

Doprinos Sunčevog vjetra. Tek oko 0.1% mase Sunčevog vjetra koji dolazi do magnetosfere uspijeva prodrijeti kroz zaštitni omotač (Lang, 2009). No, čak i ta malena količina ima značajan utjecaj na Zemljin okoliš. Vjetar ulazi u magnetosferu prilikom prespajanja suprotno usmjerenih silnica IMP-a i geomagnetskog polja. Budući da geomagnetsko polje proizvodi trodimenzionalnu strukturu magnetskih silnica, uvijek postoji područje na kojem su polja antiparalelna i gdje dolazi do prespajanja silnica (Bothmer & Daglis, 2007). U uvjetima južnog IMP-a proces prespajanja događa se na dnevnoj strani magnetosfere, gdje uzrokuje otvaranje silnica geomagnetskog polja i njihovo spajanje sa silnicama IMP-a. Budući da je IMP zaleđeno u plazmi, tok Sunčevog vjetra odnosi otvorene silnice i plazmu prema magnetskom repu. U dalekoj neutralnoj točki magnetskog repa, na udaljenosti 100-200 R_z , kvazistatičkim prespajanjem otvorene silnice se zatvaraju, a IMP se odvaja od geomagnetskog polja. U procesu prespajanja oslobađa se magnetska energija koja se pretvara u kinetičku energiju plazme. Na jednoj strani područja prespajanja plazma ulazi u magnetski rep na nižim širinama i ubrzava se prema unutrašnjoj magnetosferi, dok se na drugoj strani plazma ubrzava prema van i vraća u Sunčev vjetar. Prespajanjem na dnevnoj strani dolazi do erozije geomagnetskih silnica zbog čega se unutar magnetosfere javlja povratni tok zatvorenih silnica s noćne na

dnevnu stranu (magnetosferska konvekcija). U uvjetima sjevernog IMP-a prespajanje se događa iza linije terminatora. Plazma ulazi u magnetosferu kroz dvije neutralne točke na višim širinama i ubrzava se prema i od Zemlje. Budući da je prespajanje stacionarni proces, javlja se tok zatvorenih silnica geomagnetskog polja s dnevne na noćnu stranu kako bi se nadomjestio izgubljeni magnetski tok na noćnoj strani. Količina plazme koja ulazi u magnetosferu modulirana je orijentacijom IMP, tj. ovisi o području prespajanja. Kada je IMP južne orijentacije, prespajanje se događa na dnevnoj strani magnetopauze gdje je IMP jače, a područje prespajanja se proteže preko čitave dnevne magnetopauze, zbog čega je unos plazme u magnetosferu puno veći.

Doprinos Zemljine atmosfere. Zemljina atmosfera pridonosi populaciji neutralnih i nabijenih čestica u magnetosferi prvenstveno putem procesa u geokoroni, ionosferi i plazmasferi (Pulkkinen, 2007).

Geokorona je oblak neutralnog vodika koji se proteže do $15.5 R_z$. Iako magnetsko polje ne utječe na neutralne atome i molekule, u ovom području dolazi do Colombovih sudara i procesa razmjene naboja između neutralnih atoma i brzih iona. Sudari su glavni mehanizam gubitka energije i naboja energetskih čestica, te doprinose smirivanju uvjeta nakon geomagnetske oluje. Prilikom sudara, spori neutralni atom vodika gubi elektron i postaje ion, no zbog niske energije ne doprinosi značajno populaciji energetskih čestica. S druge strane, brzi ion dobiva elektron i postaje brzi neutralni atomi, a budući da geomagnetsko polje ne može zadržati neutralne čestice, atom napušta magnetosferu.

Na visinama iznad 80 km, gdje Sunčevo zračenje ionizira atmosferu prostire se ionosfera. Magnetosfera i ionosfera povezane su putem silnica geomagnetskog polja koje ulaze u ionosferu na višim širinama. Dok ionosferska plazma na nižim širinama korotira sa Zemljom, plazma se na višim širinama giba pod utjecajem konvekcijskog električnog polja (ionosferska konvekcija). Posljedice djelovanja konvekcijskog polja su Birkelandove struje duž magnetskih silnica u magnetosferi i konvekcijske electrojet struje u auroralnoj zoni ionosfere. Duž silazne grane Birkelandovih struja ionosferski elektroni ubrzavaju se uvis i doprinose populaciji magnetosferske plazme, dok se duž uzlazne grane magnetosferski elektroni ubrzavaju u ionosferu (polarna kiša). Elektroni polarne kiše pobuđuju i ioniziraju atome i molekule ionosfere prilikom čega se javlja polarna svjetlost i tok težih ionosferskih komponenta (N_2 , O_2 i O) u magnetosferu (Stern, 2008).

Za vrijeme pojačane geomagnetske aktivnosti polarna kiša jača i lokalizira se na noćnom dijelu ovala te se javlja pojačano istjecanje iona iz ionosfere. U području polarnih kapa javlja se tok iona iz ionosfere u magnetosferu koji se naziva polarni vjetar. To su hladni tokovi iona usmjereni duž otvorenih silnica, brzina obrnuto proporcionalnih masi iona (uglavnom H^+ i He^+).

Iznad ionosfere nalazi se plazmasfera, područje unutrašnje magnetosfere. Proteže se od 4-5 R_z do visine geostacionarnih orbita gdje se pretvara u tok laganih iona (polarni vjetar). Plazmasfera je područje oblika torusa unutar zatvorenih silnica geomagnetskog polja. Ispunjena je gustom ($10^{-1} - 10^0$ čestica/cm³) i hladnom (~ 1 eV) ionosferskom plazmom (uglavnom p , te $He^+ \sim 20\%$) (Pulkkinen, 2007). Plazmasfera se puni ionosferskom plazmom koja se širi uvis duž geomagnetskih silnica sa umjerenih i nižih širina, a korotacijsko električno polje vuče plazmu u korotacijsko gibanje. Međudjelovanje konvekcijskog i korotacijskog polja stvara granicu plazmasfere tzv. plazmapauzu, čija lokacija ovisi o relativnoj jakosti obaju električnih polja. Za vrijeme pojačane geomagnetske aktivnosti, konvekcijsko polje jača i gura plazmapauzu prema Zemlji, pri tome guli vanjske dijelove plazmasfere i odnosi hladnu plazmu u magnetosferu. Za vrijeme smanjene aktivnosti korotacijsko polje jača, plazmasfera ekspandira, te započinje proces punjenja ionosferskom plazmom. Plazmapauza predstavlja granicu unutar koje je hladna plazma zarobljena na zatvorenim putanjama oko Zemlje, dok se plazma izvan granice giba pod utjecajem konvekcijskog polja, te odlazi u vanjsku magnetosferu ili ju odnosi Sunčev vjetar. Unutar plazmasfere nalaze se radijacijski pojasevi i prstenasta struja.

Radijacijski ili van Allenovi pojasevi su područja oblika lukovica koja okružuju Zemlju. Ispunjeni su nabijenim česticama visokih energija koje se gibaju na zatvorenim silnicama geomagnetskog polja. Elektroni se gibaju u smjeru zore, a protoni u smjeru sumraka. Drift energetskih čestica radijacijskih pojaseva pod utjecajem je konfiguracije magnetskog polja, dok na hladne čestice plazmasfere djeluje i električno polje.

Unutrašnji van Allenov pojas nalazi se na udaljenosti 1.1-3.3 R_z , a sadrži uglavnom protone ($E > 10$ MeV) i elektrone ($E > 500$ keV). Porijeklo čestica u pojasu pripisuje se raspadu neutrona nastalih sudarima Sunčevih energetskih čestica ili galaktičkih kozmičkih zraka visokih energija sa atmosferskim atomima i molekulama. Neutroni

reflektirani prema radijacijskim pojasevima raspadaju se na protone i elektrone koji ostaju zarobljeni u magnetskom polju na duži period. Iako je izvor čestica slab, pojasevi su puni budući da je brzina gubitka čestica mala. To je relativno stabilna populacija čestica, ali je podložna povremenim perturbacijama pod utjecajem geomagnetskih oluja. Os geomagnetskog dipola odmaknuta je otprilike 530 km, od središta Zemlje zbog čega pojasevi nisu simetrično postavljeni oko Zemlje. Zbog toga unutrašnji pojas doseže minimalnu visinu od 250 km iznad Atlantskog oceana nedaleko od Brazilske obale. Ta tzv. Južnoatlantska anomalija zauzima prostor kojim često prolaze sateliti niskih orbita, pa energetske čestice pojasa često uzrokuju probleme na satelitima (Rasihkangas, 1998).

Vanjski van Allenov pojas zauzima prostor u unutrašnjoj magnetosferi na udaljenosti 3-9 R_z , a sadrži nabijene čestice atmosferskog i Sunčevog porijekla. Protoni vanjskog pojasa posjeduju mnogo niže energije nego protoni unutrašnjeg pojasa, dok najviše energije u vanjskom pojasu posjeduju elektroni (nekoliko stotina keV-nekoliko MeV). Visokoenergetski dio populacije nabijenih čestica (e^- , $E \sim 1$ MeV) pripisuje se populaciji vanjskog pojasa, dok brojniji dio populacije sa nižim energijama (uglavnom ioni $E \sim 65$ keV) tvori prstenastu struju (Rasihkangas, 1998). Vanjski pojas nastaje ubrizgavanjem plazme iz magnetskog repa koja se događa tijekom geomagnetske oluje zbog čega je zajedno sa prstenastom strujom puno dinamičniji od unutrašnjeg pojasa. Njihovoj promjenjivosti dodatno doprinosi i razmjena naboja s atomima geokorone prilikom čega dolazi do gubitka čestica.

2.3. GEOMAGNETSKA AKTIVNOST

Prespajanje IMP-a i geomagnetskog polja pokreće u magnetosferi geomagnetsku aktivnost, koja se manifestira kao magnetske oluje i podoluje. Budući da je Zemljin dipol skoro okomit na ravninu ekliptike, snaga prespajanja uglavnom ovisi o južnoj orijentaciji B_z komponente IMP-a, dok je brzina prespajanja proporcionalna električnom polju Sunčeva vjetra ($\mathbf{E} = -\mathbf{V}_{SV} \times \mathbf{B}_{IMP}$). Razina geomagnetske aktivnosti ovisi o parametrima Sunčevog vjetra tj. brzini i gustoći plazme te orijentaciji i jakosti IMP-a. Promjene

dinamičkog tlaka (promjene u gustoći plazme) uzrokuju promjenu oblika magnetosfere, dok promjena električnog polja (nastala zbog promjena brzine čestica i jakosti IMP-a) uzrokuje fluktuacije geomagnetskog polja. Utok energije u magnetosferu najviše ovisi o B_z komponenti, pa su strukture Sunčeva vjetra (KIM, KPI) koje posjeduju jaku južnu B_z komponentu i najveće brzine plazme najučinkovitiji pokretači geomagnetske aktivnosti (Bothmer & Daglis, 2007). Sposobnost struktura Sunčeva vjetra u uzrokovanju geomagnetske aktivnosti tj. geoeftektivnost, mjeri se pomoću geomagnetskih indeksa. Kada geomagnetska aktivnost ima praktičnu važnost za Zemaljsku tehnologiju govori se o Svemirskom vremenu. Fizikalno porijeklo geomagnetske aktivnosti su struje nastale međudjelovanjem električnog polja Sunčevog vjetra i Zemljine magnetosfere. To su kompleksni sustavi magnetosferskih i ionosferskih struja čije su glavne komponente struje magnetopauze i magnetskog repa, prstenasta struja i electrojet struje. Electrojet struje i prstenasta struja glavni su pokretači fluktuacija Zemljinog magnetskog polja na površini planeta.

2.3.1. Geomagnetski indeksi

Razina geomagnetske aktivnosti mjeri se pomoću geomagnetskih indeksa. To su numerički parametri koji se baziraju na mjerenjima poremećaja magnetskog polja sa geomagnetskih opservatorija. Mogu se podijeliti u dvije grupe: 1) indeksi koji opisuju planetarnu aktivnost (K, Kp, Ap, i dr.); 2) indeksi koji opisuju određene pojave koje uzrokuju geomagnetske poremećaje (Dst, AE, i dr.).

AE indeks

AE indeks (*eng.* Auroral Electrojet index) uveli su Davis i Sugiura 1966. godine kao mjeru globalne aktivnosti electrojet struja u auroralnoj zoni. Indeks se izvodi na temelju mjerenja poremećaja horizontalne komponente magnetskog polja H, s 12 mjernih postaja smještenih na području auroralne zone ($\varphi > 70^\circ$ s.z.š., tablica 6).

Vrijednosti poremećaja H mjere se kao funkcija univerzalnog vremena (UT). Mjerenja se normaliziraju pomoću osnovne vrijednosti (*eng.* base value) koja se izračunava za

svaki mjesec i za svaku pojedinu postaju. Osnovna vrijednost dobiva se usrednjavanjem podataka 5 međunarodno najmirnijih dana, te se oduzima od jednominutnih mjerenja dobivenih za taj mjesec. Između podataka sa svih postaja odabire se najmanja i najveća vrijednost (preuzeto sa <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/onAEindex.html>). Najmanji podatak, tj. maksimalna negativna vrijednost komponente H naziva se AL indeks (Auroral Lower), a najveći podatak tj. maksimalna pozitivna vrijednost naziva se AU indeks (Auroral Upper). AE indeks se tada definira kao razlika maksimalne i minimalne vrijednosti ($AE = AU - AL$).

Tablica 6. Popis mjernih postaja za AE indeks.
(preuzeto sa <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/onAEindex.html>).

Mjerna postaja	IAGA	Zemljopisne koordinate		Geomag. koordinate	
	Oznaka	Širina(°N)	Dužina(°E)	Širina(°N)	Dužina(°E)
Abisko	ABK	68.36	18.82	66.04	115.08
Dixon Island	DIK	73.55	80.57	63.02	161.57
Cape Chelyuskin	CCS	77.72	104.28	66.26	176.46
Tixie Bay	TIK	71.58	129.00	60.44	191.41
Cape Wellen	CWE	66.17	190.17	61.79	237.10
Barrow	BRW	71.30	203.25	68.54	241.15
College	CMO	64.87	212.17	64.63	256.52
Yellowknife	YKC	62.40	245.60	69.00	292.80
Fort Churchill	FCC	58.80	265.90	68.70	322.77
Poste-de-la-Baleine	PBQ	55.27	282.22	66.58	347.36
Narsarsuaq	NAQ	61.20	314.16	71.21	36.79
Leirvogur	LRV	64.18	338.30	70.22	71.04

Negativne perturbacije H javljaju se u mjerenjima kada se mjerne postaje nalaze pod utjecajem zapadne struje, pa AL indeks predstavlja maksimalni intenzitet zapadne electrojet struje i mjera je intenziteta faze ekspanzije podoluje u magnetosferi (Pulkkinen, 2007). Pozitivne vrijednosti javljaju se pri istočnoj electrojet struji, pa AU indeks predstavlja maksimalni intenzitet istočne struje i mjera je jakosti konvekcije u sustavu magnetosfera-ionosfera (Pulkkinen, 2007). Prema tome, AE indeks je mjera jakosti ukupne horizontalne struje, a odstupanja AE indeksa od nominalne dnevne vrijednosti predstavljaju magnetosferske podoluje. Ostale magnetosferske struje ne utječu previše na mjerenja u auroralnoj zoni, jer su ionosferske struje puno bliže površini Zemlje nego magnetosferske struje, no površinska indukcija može doprinijeti povećanju indeksa i do 40% (Pulkkinen, 2007).

Dst indeks

Satne vrijednosti Dst indeksa (Sugiura, 1964.) izvode se na temelju mjerenja na 4 magnetskih postaja (tablica 7) smještenih na širinama 20-40°. Budući da su lokacije postaja dovoljno daleko od auroralnih i ekvatorijalnih struja koje znatno utječu na magnetske poremećaje na tlu, mjerenja s tih postaja dominantno predstavljaju utjecaj prstenaste struje na horizontalnu komponentu magnetske perturbacije H.

Tablica 7. Popis mjernih postaja za Dst indeks
(preuzeto iz <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/onDstindex.html>).

Mjerna postaja	Zemljopisne koordinate		Geomag. koord.
	Širina(°E)	Dužina(°)	Dipol. dužina(°)
Hermanus	19.22	-34.40	-33.3
Kakioka	140.18	36.23	26.0
Honolulu do 4.mj. 1960.	201.90	21.30	21.0
od 4.mj. 1960.	210.98	21.32	21.1
San Juan do 1.mj 1965.	293.88	18.38	29.9

Dst indeks (*eng.* Disturbance storm time index) direktna je mjera satnog srednjaka horizontalne perturbacije H, pa indeks daje približnu vrijednost intenziteta prstenaste struje. Budući da je intenzifikacija prstenaste struje ključni parametar za ocjenu jakosti magnetske oluje, Dst indeks koristi se za karakterizaciju oluja. Ako se indeks izvodi kao funkcija univerzalnog vremena (UT), njegova varijacija prati razvoj i jačinu magnetskih oluja. Čak i u odsutnosti oluja indeks prati poremećaje manje magnitude, pa vremenska varijacija Dst-a pruža kvantitativnu mjeru geomagnetske aktivnosti koja se može korelirati s ostalim solarnim i geofizičkim parametrima.

Izvod Dst indeksa (preuzeto iz <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/onDstindex.html>). Za svaku postaju izračunavaju se godišnje srednje vrijednosti H iz 5 najmirnijih dana svakog mjeseca. Osnovna vrijednost H definira se za svaku postaju, a izražena je kao polinom drugog reda u vremenu:

$$H_{base}(\tau) = A + B\tau + C\tau^2 \quad (2.3.1.1.)$$

gdje je τ vrijeme od početka referentne epohe. Koeficijenti polinoma računaju se metodom najmanjih kvadrata iz godišnjih srednjaka za tekuću godinu te četiri prethodne godine.

Satna (UT) osnovna vrijednost $H_{base}(T)$ oduzima se od satnih mjerenja $H_{obs}(T)$:

$$\Delta H(T) = H_{obs}(T) - H_{base}(T) \quad (2.3.1.2.)$$

a, devijacije $\Delta H(T)$ formiraju bazu podataka za derivaciju indeksa. Nakon toga se za svaku postaju definira varijacija poremećaja $D(T)$:

$$D(T) = \Delta H(T) - S_q(T) \quad (2.3.1.3.)$$

gdje su $S_q(T)$ satne vrijednosti srednje godišnje varijacije polja u mirnim uvjetima (*eng.* solar quiet day variation). $D(T)$ se usrednjuje preko 4 postaje i normalizira prema dipolnom ekvatoru:

$$Dst(T) = \frac{D(T)}{\cos \varphi} \quad (2.3.1.4.)$$

gdje nazivnik predstavlja srednjak kosinusa dipolnih širina postaja. Tako definirani Dst indeks ima srednju vrijednost nula za vrijeme 5 međunarodno najmirnijih dana.

Interpretacija indeksa. Na ekvatorijalnim i umjerenim širinama perturbacija H komponente može se aproksimirati uniformnim osnosimetričnim magnetskim poljem usmjerenim prema jugu, a Dst indeks predstavlja to polje poremećaja na području ekvatora magnetskog dipola. Polje poremećaja uglavnom nije osnosimetrično te se sastoji od dva dijela, simetričnog dijela koji predstavlja utjecaj prstenaste struje i asimetričnog dijela koji predstavlja utjecaj parcijalne prstenaste struje koja zatvara strujni krug područja 2 Birkelandovih struja (Pulkkinen, 2007). U fazi razvoja oluje asimetrična komponenta polja poremećaja može postati veća od simetrične, a ovako definirani Dst indeks mjeri samo jakost simetričnog dijela polja poremećaja.

Vrijednosti Dst indeksa daju se kao satne vrijednosti, dok se SYM-H indeks (Dst visoke rezolucije) računa na sličan način, ali za 1 minutni signal. ASY-H indeks je mjera asimetričnog polja poremećaja a izračunava se kao razlika maksimalnog i minimalnog poremećaja horizontalne komponente polja na 6 mjernih postaja rasutih preko cijele površine Zemlje. SYM-H, ASY-H i Dst indeks osjetljivi su ne samo na prstenastu struju, nego i na ostale magnetosferske i ionosferske struje, te na struje inducirane unutar Zemlje. Za vrijeme mirnog razdoblja doprinosi ostalih struja su mali, dok za vrijeme magnetskih oluja mogu porasti i do 50% (Pulkkinen, 2007 i ref. tamo).

Kp indeks

Planetarni Kp indeks (*njem.* Kennziffer Planetarisch) uveo je Bartels 1949. godine kao mjeru geomagnetskih poremećaja na planetarnoj skali. To je kvazilogaritamski parametar u obliku dnevnih 3-satnih vrijednosti, sa skalom od 0 do 9 izraženom u trećinama, tj. 5- je $4\frac{2}{3}$, 5 je 5, 5+ je $5\frac{1}{3}$. Računa se kao srednja vrijednost poremećaja magnetskog polja na osnovi mjerenja s 13 mjernih postaja smještenih na umjerenim širinama (44-60°). Na tim širinama se za vrijeme mirnih uvjeta ne osjeća utjecaj auroralnih struja, pa Kp indeks tada bilježi utjecaj prstenaste struje, struja magnetopauze i magnetskog repa, no za vrijeme aktivnog perioda kada se auroralna zona širi prema ekvatoru, indeks bilježi i bilježi utjecaj auroralnih i Birkelandovih struja. U opisu sezonskih varijacija geomagnetske aktivnosti, Kp indeks daje samo broj magnetskih oluja. (preuzeto iz http://www-app-3.gfz-postdam.de/kp_index/description.html).

Ap indeks

Ap indeks je mjera globalne geomagnetske aktivnosti na umjerenim širinama za određeni dan (UT). Izvodi se na temelju mjerenja perturbacija magnetskog polja iz mjernih postaja smještenih na umjerenim širinama, a računa se na sličnim osnovama kao Kp indeks. Trosatni ap indeks i dnevni Ap indeks predstavljaju linearne pandane Kp indeksa. U tablici 8 nalazi se linearna skala za derivaciju vrijednosti ap indeksa na temelju Kp indeksa. Indeks ap poprima vrijednosti 0-400, a svaka jedinica odgovara približnoj promjeni polja od 2 nT.

Tablica 8. Linearna skala za izvod trosatnog ap indeksa pomoću vrijednosti Kp (preuzeto iz http://www-app-3.gfz-postdam.de/kp_index/description.html).

Kp	0 ₀	0 ₊	1 ₋	1 ₀	1 ₊	2 ₋	2 ₀	2 ₊	3 ₋	3 ₀	3 ₊	4 ₋	4 ₀	4 ₊
ap	0	2	3	4	5	6	7	9	12	15	18	22	27	32
Kp	5 ₋	5 ₀	5 ₊	6 ₋	6 ₀	6 ₊	7 ₋	7 ₀	7 ₊	8 ₋	8 ₀	8 ₊	9 ₋	9 ₀
ap	39	48	56	67	80	94	111	132	154	179	207	236	300	400

Tablica je načinjena tako da se za postaju na 50° dipolne širine ap može smatrati kao raspon najporemećenijeg od dvaju horizontalnih polja (u jedinicama od 2 nT). Dnevni Ap

indeks se tada računa kao srednjak 8 vrijednosti ap indeksa za svaki dan (preuzeto iz http://www-app-3.gfz-postdam.de/kp_index/description.html).

2.3.2. Dinamika magnetskih podoluja i oluja

Energija, moment i plazma Sunčevog vjetra ulaze u magnetosferu prilikom prespajanja magnetskih silnica na područjima magnetopauze gdje su IMP i geomagnetsko polje antiparalelni. Proces prespajanja je prisutan za vrijeme mirnih i poremećenih uvjeta. Mirni uvjeti su periodi stalnog IMP-a i sporijih tokova plazme kada je prisutna stalna konvekcija i niski stupanj auroralne aktivnosti, dok se za vrijeme poremećenih uvjeta kada je IMP južne orijentacije, javljaju magnetske oluje i podoluje. Pokretači magnetskih oluja su udarni valovi u interplanetarnoj plazmi ili područja interakcije brzog i sporog Sunčevog vjetra, dok podoluje nastaju prilikom pojačanog prespajanja na dnevnoj strani magnetosfere. Uvjeti za nastanak magnetske podoluje javljaju se kada je IMP neznatno južne orijentacije (oko -5 nT) otprilike 1 sat, dok se oluje javljaju kada IMP ima jaku južnu komponentu u periodu od nekoliko sati. Dok se podoluje mogu pojaviti neovisno o oluji, za vrijeme magnetskih oluja često se javljaju intenzivne podoluje u polarnim područjima. Oluje ubrizgavaju znatne količine plazme iz magnetskog repa u unutrašnju magnetosferu, dok je kod podoluja taj proces slabiji. Poremećaji magnetskog polja za vrijeme podoluja mogu se zamijetiti u auroralnim područjima, a kreću se od 500 nT do 2 000 nT, dok su poremećaji polja magnetskih oluja globalne naravi i kreću se oko 100 nT .

2.3.2.1. *Magnetske podoluje*

Varijabilnost orijentacije IMP-a uzrokuje povremeno punjenje i disipaciju energije u magnetosferi koje se naziva magnetska podoluja. Obično se pojavi 4-5 podoluja na dan koje u prosjeku traju 2-3 sata. Za vrijeme podoluje, auroralna aktivnost jača na ponoćnom

području i prolazi kroz promjene koje se nazivaju auroralna podoluje. Na površini se zamjećuje niz magnetskih poremećaja tzv. polarna magnetska podoluje.

Prema Rasihkangas (1998), podoluje ima tri faze: faza rasta, faza ekspanzije i faza oporavka.

Faza rasta započinje okretanjem IMP-a na južni smjer i početkom prespajanja na dnevnoj strani magnetosfere. Uvjeti za nastajanje podoluje javljaju se kada brzina prespajanja na dnevnoj strani postane veća nego u repu, zbog čega raste broj otvorenih silnica i šire se polarne kape. Na dnevnoj strani magnetosfere dolazi do erozije magnetskog polja koje se preko polarnih kapa povlači u magnetski rep, dok se magnetopauza povlači na 10-11 R_z . Višak magnetskog toka pohranjuje se u magnetskom repu kao slobodna energija, zbog čega dolazi do jačanja magnetskog polja i ekspanzije repa na većim udaljenostima od Zemlje. Erozijski magnetski tok vrši dodatni pritisak na magnetski rep u Zemljinoj blizini, te dolazi do kompresije sloja plazme i jačanja struje neutralnog sloja koja rasteže magnetske silnice u smjeru repa, dok na udaljenosti 6-15 R_z dolazi do formacije tankog i intenzivnog strujnog sloja. Prilagodбом sustava novoj ravnoteži jača magnetosferska konvekcija zatvorenih silnica na dnevnu stranu koja prazni sloj plazme. Faza rasta obično traje oko 1 sat, a označava vremenski period od početka pojačanog prespajanja na dnevnoj strani do trenutka nastanka nove neutralne točke u Zemljinoj blizini. Faza rasta se u ionosferi manifestira širenjem aurore na niže širine što je posljedica rasta magnetskog repa, te postupnim jačanjem i spuštanjem konvektivnih elektrojet struja na niže širine što je posljedica pojačane konvekcije. AE indeks koji mjeri intenzitet ionosferskih struja pokazuje lagani porast koji započinje prilikom okretanja IMP na južnu orijentaciju.

Fazom ekspanzije, koja traje oko 30 minuta, započinje aktivni dio podoluje povezan s oslobađanjem energije u magnetskom repu. Kada neutralni strujni sloj u Zemljinoj blizini postane dovoljno tanak i nestabilan na udaljenosti 15-30 R_z nastaje druga neutralna točka. Prva neutralna točka je daleka točka prespajanja (na 100-200 R_z) povezana sa magnetosferskom dinamikom u mirnim uvjetima. Između dviju neutralnih točaka nalazi se područje zatvorenih magnetskih silnica ispunjeno plazmom, tzv. plazmoid ili magnetski otok. Napredovanjem procesa prespajanja plazmoid raste, a kada se prekine i zadnja silnica sloja plazme, plazmoid se otpušta u Sunčev vjetar i odnosi dio energije

unesene prespajanjem na dnevnoj strani. Nakon otpuštanja plazmoida, brzina prespajanja raste, a proces se širi na magnetski rep gdje dolazi do zatvaranja otvorenih silnica geomagnetskog polja (Stern, 2008). Novozatvorene silnice magnetskog repa ustvari su razvučene silnice dipolnog polja, koje se ubrzavaju prema Zemlji i vraćaju u dipolni oblik (dipolarizacija) odnoseći pri tome slobodnu energiju iz repa. Energija se troši na zagrijavanje plazme, te se u Zemljinoj blizini zamjećuju nagli porasti tokova brze plazme (e^- i ioni (uglavnom p) energija 10-100 keV) i ubrizgavanje čestica u unutrašnju magnetosferu. Zbog smicanja između brzih tokova koji istječu iz područja prespajanja i ambijentalnog toka plazme dolazi do poremećaja struje neutralnog sloja. Dio struje neutralnog sloja u Zemljinoj blizini nestaje, te se struja preusmjeruje preko postojećeg ionosferskog sustava struja i tvori tzv. podolujni strujni klin (*eng.* substorm current wedge, SWC). Struja ulazi u ionosferu duž magnetskih silnica na istočnoj strani klina i izlazi na zapadnoj strani klina, a krug se zatvara zapadnom electrojet strujom (podolujni electrojet) na ponoćnoj strani ionosfere. Najuočljiviji znak podoluje na tlu je jačanje aktivnosti polarne svjetlosti u auroralnoj zoni. Pri mirnim uvjetima, u ponoćnoj auroralnoj zoni često se zamjećuju auroralni lukovi, no za vrijeme podoluje dolazi do naglog jačanja najjužnijeg auroralnog luka u ponoćnom sektoru tzv. auroralni prekid (*eng.* auroral break up), koji se brzo širi prema sjeveru i zapadu. Na površini se javljaju poremećaji magnetskog polja do 2 000 nT (oko 2% ukupnog polja auroralne zone). Poremećaji polja nastaju jačanjem podolujne electrojet struje, a očituju se kao nagli porast AE indeksa.

Završna faza ili faza oporavka traje oko 90 minuta. Završetkom podoluje, magnetsko polje i tokovi plazme u Zemljinoj blizini vraćaju se u stanje mirnih uvjeta, a magnetski rep se stanjuje. Bliska neutralna točka pomiče se niz rep na mjesto neutralne točke mirnih uvjeta. Smanjuje se intenzitet aurora i ionosferskih struja, koje se vraćaju na više širine.

2.3.2.2. *Magnetske oluje*

Normalna satna varijabilnost IMP-a uzrokuje podoluje prilikom promjene orijentacije IMP-a od sjeverne do južne pa ponovo do sjeverne, ali povremeno Sunčev vjetar donosi

strukture plazme i polja koje unose energiju u magnetosferu kroz puno duži period (>3 h; Pulkkinen, 2007). U tim uvjetima nastaju magnetske oluje koje traju od 12 sati do nekoliko dana. Magnetske oluje nastaju kao posljedica interakcije magnetosfere sa KPI ili udarnim valovima IKIM. Za vrijeme oluja dolazi do povećanog unosa energije u magnetosferu i ubrizgavanja znatne količine plazme iz magnetskog repa u unutrašnju magnetosferu što dovodi do jačanja prstenaste struje. Na površini se zamjećuju poremećaji magnetskog polja od 100 nT do čak 500 nT koji su posljedica jačanja prstenaste struje (doprinos struje u mirnim uvjetima je oko 20 nT; Stern, 2008). Tijekom trajanja oluje auroralni ovali se šire prema ekvatoru a polarna svijetlost se javlja na umjerenim širinama. Budući da je olujna aktivnost najizraženija na području ekvatora, razvoj i intenzitet oluje prati se pomoću Dst indeksa (tablica 9).

Tablica 9. Vrijednosti pojedinih parametara za određene intenzitete oluja (preuzeto iz Rasihkangas, 1998).

Intenzitet oluje	Dst (nT)	B_z (nT)	dT (h)
Jaka	-100	-10	3
Umjerena	-50	-5	2
Slaba (podoluja)	-30	-3	1

Prema Rasihkangasu (1998), oluja se događa u tri faze s obzirom na Dst indeks:

Početna faza traje od nekoliko minuta do 1 sat, a nastaje prilikom dolaska IP udarnih valova na dnevnu stranu magnetosfere koji uzrokuju porast dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra na magnetopauzi. Porast dinamičkog tlaka Sunčevog vjetra uzrokuje naglu kompresiju geomagnetskog polja i intenzifikaciju struje magnetopauze. Te promjene se na površini zamjećuju kao naglo jačanje magnetskog polja koje se naziva sudden storm commencement (SSC). Dst indeks naglo raste i poprima pozitivne vrijednosti.

Glavna faza traje 30 minuta - nekoliko sati, a glavno joj je obilježje nagli pad jakosti magnetskog polja na površini. Kada IMP okrene na južni smjer, započinje magnetsko prespajanje na dnevnoj strani, a unutar jedan sat javlja se pojačana konvekcija s noćne na dnevnu stranu. Plazma se iz magnetskog repa ubrzava prema Zemlji i prodire u unutrašnju magnetosferu gdje doprinosi jačanju prstenaste struje i puni vanjski van

Allenov pojas. Uz konvekciju i ubrizgavanje plazme prstenastoj struji doprinose i ioni O^+ nastali kao nusprodukt polarne svjetlosti u polarnoj ionosferi. Snažno konvekcijsko električno polje guli vanjske slojeve plazmasfere i gura je prema Zemlji, a zajedno sa plazmasferom primiče se i prstenasta struja. Poremećaji magnetskog polja nastali jačanjem prstenaste struje uzrokuju globalno smanjenje površinskog magnetskog polja na nižim i umjerenim širinama što se može uočiti kao nagli pad Dst indeksa na negativne vrijednosti do nekoliko stotina nT.

Faza oporavka traje od nekoliko desetaka sati do 1 tjedan, a započinje prilikom okretanja IMP-a na sjevernu orijentaciju. Konvekcija i ubrizgavanje plazme se smanjuju te dolazi do postupnog slabljenja prstenaste struje. Jakost magnetskog polja vraća se u normalu, a isto tako i vrijednosti Dst indeksa.

2.3.2.3. Periodične i neperiodične magnetske oluje

KIM i KPI su IP strukture koje pod određenim uvjetima ($B_z < 0$) mogu uzrokovati geomagnetske oluje. IP strukture su jako, umjereno i slabo geoeftivne ako njihovim djelovanjem nastaju oluje intenziteta $Dst \leq -100$ nT, -100 nT $\geq Dst \geq -50$ nT, i -50 nT $\geq Dst \geq -30$ nT. Dok umjerene i slabe oluje mogu nastati djelovanjem IKIM i KPI, oluje najvećeg intenziteta sa $Dst < -100$ nT nastaju uglavnom pod utjecajem IKIM. KPI uzrokuju tek oko 10-15% oluja s intenziteta oko -100 nT (Gopalswamy, 2008).

Magnetske oluje mogu se klasificirati kao periodične i neperiodične (tranzijentne) oluje. Neperiodične oluje uglavnom se javljaju u vrijeme maksimuma Sunčeve aktivnosti, a nastaju kao posljedica djelovanja IKIM na magnetosferu. Koherentna struktura magnetskog polja IKIM, velike brzine plazme, fluktuacije IMP-a i gustoće plazme koje nastaju djelovanjem udarnih valova su efektivni pokretači geomagnetske aktivnosti, pod uvjetom da su komprimirana B_z komponenta IMP-a iza IP udara ili magnetsko polje unutar magnetskog oblaka južne orijentacije. Budući da je geomagnetska aktivnost u korelaciji s brzinom i gustoćom plazme, jakosti magnetskog polja i južnom B_z komponentom, prijenos energije Sunčevog vjetrova u magnetosferu najefikasniji je prilikom dugotrajne (nekoliko sati) južne B_z komponente IMP-a (< -10 nT), dok aktivnost dodatno

pojačavaju velike brzine plazme Sunčevog vjetra ($>1\,000\text{ km/s}$). Zato su IKIM glavni pokretači intenzivnih magnetskih oluja sa $Dst < -100\text{ nT}$ (Bothmer & Daglis, 2007).

Tijekom pada Sunčeve aktivnosti, KIM su slabijeg intenziteta i javljaju se rjeđe pa geomagnetsku aktivnost najčešće uzrokuju brzi tokovi Sunčevog vjetra iz velikih i stabilnih koroninih šupljina koje pokazuju produžetke na niže heliografske širine. Brzim tokovima Sunčevog vjetra šire se Alfvénovi valovi (transverzalni valovi koji se gibaju okomito na IMP) koji uzrokuju jake fluktuacije IMP-a i brzine vjetra. Kada su koronine šupljine stabilne i traju nekoliko Sunčevih rotacija, Zemlja je otprilike svakih 27 dana izložena brzim tokovima Sunčevog vjetra, zbog čega se geomagnetska aktivnost javlja otprilike svakih 27 dana. Koronine šupljine evoluiraju i mogu poprimiti kompleksne oblike zbog čega se pojava geomagnetske aktivnosti ponekad ne podudara sa periodom od 27 dana (Gopalswamy, 2008). Produžeci koroninih šupljina na niže heliografske širine uzrokuju pojavu brzih tokova na području heliosfernog sloja struja, zbog čega dolazi do interakcije brzog i sporog Sunčevog vjetra te nastanka geoeftivnih struktura tzv. KPI (pod uvjetom $B_z < 0$). KPI rijetko posjeduju udarne valove na 1 AJ ili kontinuiranu B_z komponentu, te uglavnom pokreću geomagnetsku aktivnost umjerenog i slabog intenziteta. Nakon prolaska olujnog perioda uzrokovanog KPI koji obično traje manje od 1 dana, tokovi brzog vjetra iza KPI pokreću geomagnetsku aktivnost putem fluktuacija B_z komponente IMP-a nastalih pod utjecajem Alfvénovih valova (Tsurutani et al., 1995). Južna orijentacija B_z povezana s Alfvénovim fluktuacijama uzrokuje sporadično prespajanje IMP-a i geomagnetskog polja, što stimulira produžene periode podolujnih aktivnosti i dovodi do kontinuirano duge aktivnosti te visokih vrijednosti AE indeksa tzv. HILDCAA (High Intensity Long Duration Continuous AE Activity). Geoeftivnost valova najveća je pri najvećim brzinama Sunčevog vjetra kada su im amplitude najveće (Tsurutani et al., 1994). Intenzitet i trajanje periodičnih oluja vrlo su varijabilni te ovise o kompresiji IMP-a, njegovoj orijentaciji i trajanju. Jakost polja IMP-a unutar KPI na udaljenosti od 1 AJ ne prelazi vrijednosti od 20 nT, B_z komponenta je $< -10\text{ nT}$ i vrlo varijabilna smjera, a varijacija brzine tokova brzog vjetra u usporedbi sa sporim vjetrom veća je tek za faktor 2 (Bothmer & Daglis, 2007). To su glavni razlozi zašto brzi tokovi uzrokuju oluje umjerenog ($-100\text{ nT} \leq Dst \leq -50\text{ nT}$) i slabog intenziteta ($-50\text{ nT} \leq Dst \leq -30\text{ nT}$), dok se ponekad aktivnost prstenaste struje ne može ni zamijetiti ($Dst < -30\text{ nT}$).

Ako se zanemari intenzitet pojedinih oluja i uzme u obzir samo broj geomagnetski poremećenih dana ($A_p \geq 40$), primjećuje se pojačana aktivnost u padajućoj fazi Sunčevog ciklusa, što znači da KPI ubrizgavaju podjednaku količinu energije u magnetosferu, ali kroz duži period. Interplanetarni pokretači oluja sa stupnjem intenziteta $A_p > 20$ mogu se svrstati u 5 kategorija: 1) $A_p < 30$ - spori vjetar u blizini HSS; 2) $A_p < 60$ - KPI praćeni brzim vjetrom (500-700 km/s); 3) $A_p < 150$ - IKIM u međudjelovanju s KPI; 4) $A_p < 170$ - B_z komponenta IMP-a koja nastaje obavljanjem polja oko IKIM ili B_z magnetskog oblaka; 5) $A_p < 200$ - višestruke IKIM; (Bothmer & Daglis, 2007).

2.3.3. Varijabilnost geomagnetske aktivnosti

Prema Rasihkangasu (1998), izvori varijacija geomagnetske aktivnosti u vremenu su:

- 1) varijabilnost Sunčeve aktivnosti, tj. varijabilnost Sunčevog vjetra;
 - a) 11 godišnji i 22 godišnji Sunčevi ciklusi;
 - b) 1.3 godišnja varijabilnost.
- 2) godišnja varijabilnost zbog Zemljine revolucije koja izlaže Zemlju različitim heliografskim širinama sa različitim stupnjem aktivnosti.
- 3) polugodišnja varijacija zbog revolucije Zemlje oko Sunca
- 4) periodična varijabilnost zbog rotacije Sunca sa periodima od 27 i 13-14 dana.

22-godišnja varijabilnost. 22 godišnji ciklus sastoji se od 11 mirnih i 11 aktivnih godina. Aktivnost je viša u drugoj polovici parnog Sunčevog ciklusa i prvoj polovici neparnog ciklusa, ali razlog još nije poznat.

11-godišnja varijabilnost. Zamjećuju se tri maksimuma:

- 1) Maksimum neperiodične geomagnetske aktivnosti javlja se prije maksimuma pjega, povezan je s bljeskovima i IKIM, a manifestira se kao jačanje olujne aktivnosti.
- 2) Dvije godine nakon maksimuma pjega javlja se maksimum periodične i neperiodične geomagnetske aktivnosti s višom amplitudom neperiodične aktivnosti.
- 3) U fazi opadanja Sunčevog ciklusa javlja se većinom periodična aktivnost s višom amplitudom podolujne aktivnosti.

1.3 godišnja varijabilnost zamijećena je u auralnim podacima, ali još nije objašnjena.

Godišnja varijabilnost. Zbog nagiba osi rotacije Sunca s obzirom na ravninu ekliptike, Zemlja je izložena najvišim heliografskim širinama (gdje je brzina vjetra najveća) u vrijeme proljetnog i jesenskog ekvinocija. Aktivnost je najjača ili u proljeće ili u jesen, s time da jedna faza traje nekoliko godina. Ako proljetni maksimum uzrokuju polja usmjerena prema Suncu, jesenski maksimum uzrokuju polja usmjerena od Sunca, pa slučaj kada je jedan od ekvinocija aktivniji ovisi o aktivnosti polja određenog polariteta. Promjena faze tj. premještanje maksimuma aktivnosti s jednog ekvinocija na drugi ovisi o promjeni polariteta magnetskog polja.

Polugodišnja varijabilnost. Nastaje zbog godišnje promjene orijentacije Zemljine dipolne osi u odnosu na liniju koja povezuje Zemlju i Sunce, što uzrokuje promjenu položaja Zemljinog polja u odnosu na IMP. Geomagnetska aktivnost je maksimalna dva puta godišnje, za vrijeme ekvinocija, kada je dipol nagnut tako da je projekcija južne komponente polja IMP-a na geomagnetsko polje najveća.

Periodična varijabilnost. Postoji veza između geomagnetske/auroralne aktivnosti i perioda rotacije Sunca (na udaljenosti od 1 AJ iznosi 27.3 dana). Tu periodičnu olujnu aktivnost koja proizvodi oluje umjerenog intenziteta, a čija geoefektivnost ovisi o južnoj komponenti IMP-a, uzrokuju tokovi brzog vjetra iz koroninih šupljina sa brzinama 500-800 km/s. Interval od 13.5 dana uočava se prilikom pojave 2 toka brzog vjetra po Sunčevoj rotaciji.

3. UTJECAJ BRZIH TOKOVA SUNČEVOG VJETRA NA GEOMAGNETSKU AKTIVNOST

Cilj ovog rada je ispitivanje geoeftektivnosti brzih tokova Sunčevog vjetra, koji potječu iz ekvatorskih produžetaka koroninih šupljina i uzrokuju 27-dnevnu periodičnu geomagnetsku aktivnost umjerenog intenziteta. Periodična geomagnetska aktivnost najizraženija je tijekom padajuće faze Sunčevog ciklusa (oko dvije godine prije Sunčevog minimuma) kada su koronine šupljine najveće, dugotrajne i stabilne (Watari, 1997 i ref. tamo). Zbog dugotrajnosti, koronine šupljine mogu se uočiti tijekom nekoliko Sunčevih rotacija, a kako period rotacije Sunca na udaljenosti 1 AJ iznosi oko 27 dana, brzi vjetar koji izvire iz njih uzrokuje geomagnetsku aktivnost svakih 27 dana.

Geomagnetska aktivnost posljedica je interakcije Sunčevog vjetra i magnetosfere prilikom koje dolazi do prijenosa energije u magnetosferu. Energija ulazi na dnevnoj strani magnetopauze kada se procesom prespajanja suprotno usmjerenih silnica IMP-a (B_z komponenta južne orijentacije) i geomagnetskog polja (sjeverne orijentacije) magnetosfera otvara i omogućuje ulazak Sunčeva vjetra. Glavni pokretač periodične geomagnetske aktivnosti tijekom padajuće faze Sunčevog ciklusa je južna B_z komponenta IMP-a nastala kompresijom magnetskog polja na području interakcije brzog i sporog vjetra ili fluktuacijama polja uzrokovanim Alfvénovim valovima u samim brzim tokovima. Manifestacija geomagnetske aktivnosti magnetske oluje i podoluje koje se zapažaju kao promjene jakosti magnetskog polja mjerene na površini Zemlje, a posljedica su jačanja intenziteta ionosferskih i magnetosferskih struja.

Budući da ne postoje direktne metode utvrđivanja ukupne energije Sunčevog vjetra koja ulazi u magnetosferu, koriste se metode procjene raspoložive energije bazirane na geomagnetskim indeksima koji se izvode na temelju promjena jakosti geomagnetskog polja mjerenih na površini Zemlje, a služe kao aproksimativni parametri disipacije energije. Iz parametara Sunčevog vjetra konstruiraju se geomagnetski aktivni parametri Sunčevog vjetra kao procjene prijenosa energije u magnetosferu. Efektivnost parametara ispituje se korelacijskom analizom s određenim geomagnetskim indeksima (Finch & Lockwood, 2007). Uz vremenske nizove parametra V (brzina p), n (gustoća p), T

(temperatura p) i B (jakost IMP), u analizi se često koriste i kombinacije V , B i n čije se fizikalno značenje može interpretirati na slijedeći način:

1. BV [V/m] - predstavlja jakost interplanetarnog električnog polja Sunčevog vjetra $\mathbf{E} = -\mathbf{V}_{SV} \times \mathbf{B}_{IMP}$, koje je proporcionalno brzini prespajanja na dnevnoj strani magnetosfere, a odgovorno je za pokretanje konvekcije unutar magnetosfere i ionosfere.
2. B^2V [W/m²] - predstavlja Poyntingov tok Sunčevog vjetra $\mathbf{S} = (\mathbf{E} \times \mathbf{B})/\mu_0$, koji je mjera prijenosa energije Sunčevog vjetra u magnetosferu prilikom procesa prespajanja na dnevnoj strani magnetosfere. Budući da vrijedi $\mathbf{E} = -\mathbf{V}_{SV} \times \mathbf{B}_{IMP}$, magnituda Poyntingovog vektora tada iznosi $|\mathbf{S}| = |\mathbf{E} \times \mathbf{B}|/\mu_0 = VB^2/\mu_0$.
3. BV^2 [W/C] ili [(V/m)*(m/s)] - produkt jakosti električnog polja Sunčevog vjetra koje ubrzava čestice i brzine čestica koje ulaze u strujni sloj (Verbanac et al., 2010).
4. B^2V^2 [Wm⁻¹s⁻¹] - snaga dinamika Sunčevog vjetra (Verbanac et al., 2010).
5. nBV^2 [(m⁻²s⁻¹)*(V/m)] ili [Vm⁻³s⁻¹] - predstavlja tok električnog polja.
6. nV^2 [Pa/kg] - predstavlja dinamički tlak Sunčevog vjetra.

3.1. Podaci

U ovom radu analizirani su podaci geomagnetskih indeksa (AE, Ap, Dst), površina koroninih šupljina (CH) i parametara Sunčevog vjetra (n , B , V) u periodu od 60. do 261. dana 2006. godine. Analizirani vremenski period nalazi se u padajućoj fazi 23. Sunčevog ciklusa koji je postigao minimum u mjesecu rujnu 2008. godine. 23. Sunčev ciklus je prvi Sunčev ciklus za kojeg postoje istovremeni, opsežni i uniformni podaci za Sunčeve i interplanetarne fenomene. U promatranom periodu Sunčevim vjetrom dominiraju brzi tokovi i KPI, dok su 124.-126., 191.-192., 231.-232. i 242.-247. dana utvrđene pojave KIM. Svi KIM bili su spori s brzinama 450-550 km/s sličnim brzinama ambijentalnog Sunčevog vjetra. Zbog malih brzina KIM nije došlo do nastanka udarnih valova te je njihova geoeftektivnost bila slaba. Iznimka je period 231.-232. dana kada je djelovanjem

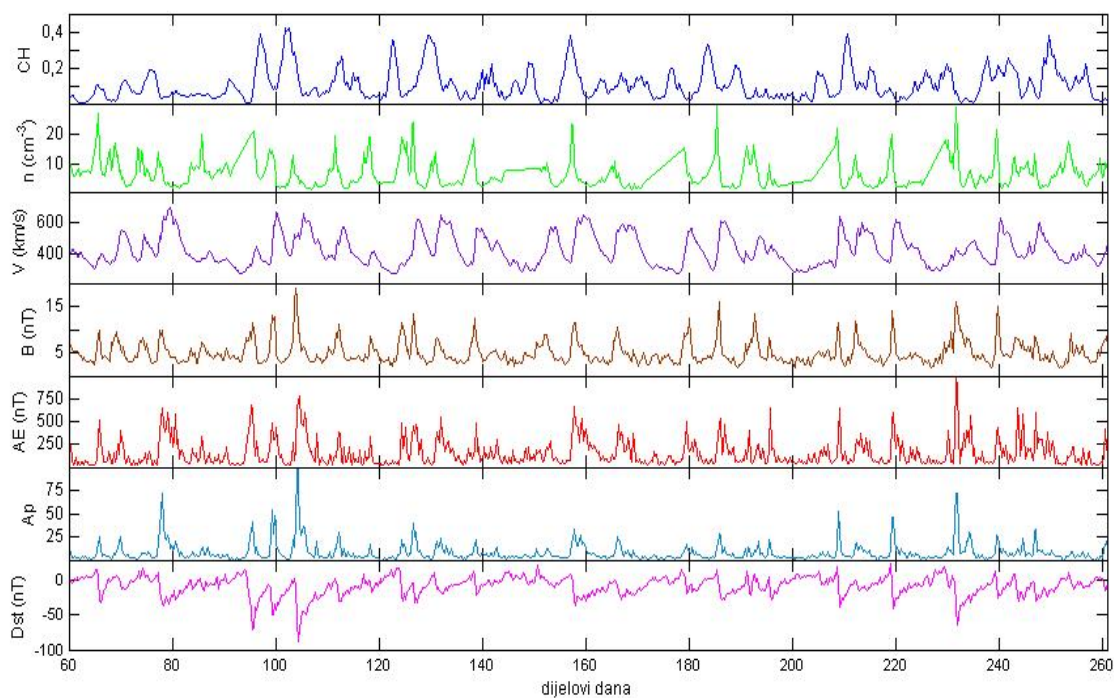
KIM nastala oluja umjerenog intenziteta. U periodu 242.-247. dana došlo je do nastanka udarnog vala zbog naleta brzog toka Sunčeva vjetra na KIM.

Vrijednosti površina koroninih šupljina (CH) utvrđene su na temelju slika, načinjenih u mekom rendgenskom zračenju, koje su dobivene pomoću Soft X-ray Imager (SXI) instrumenta sa GOES-12 satelita (<http://sxi.ngdc.noaa.gov/>). GOES (Geosynchronous Operational Environmental Satellite) su primarno meteorološki sateliti u geostacionarnoj orbiti. Kruže oko Zemlje u ekvatorskoj ravnini na visini 35 800 km, brzinom rotacije Zemlje. Geostacionarna orbita omogućuje SXI instrumentu integriranom na GOES 12 satelitu pogled na Sunce 24 sata na dan (osim za vrijeme ekvinocija, kada satelit ulazi u Zemljinu sjenu 1 sat dnevno). SXI snima Sunčev disk svake minute, što omogućuje praćenje pojava na Suncu (koronine šupljine, bljeskovi i KIM) koje uzrokuju Svemirsko vrijeme. Koronine šupljine su područja otvorenih silnica Sunčevog magnetskog polja koje se šire u interplanetarni prostor. Takva konfiguracija magnetskog polja omogućuje bijeg plazme iz korone zbog čega nastaje brzi vjetar. Male gustoće plazme koroninih šupljina posljedica su nastanka vjetra, pa se šupljine na slikama načinjenim u spektru mekog rendgenskog zračenja zamjećuju kao tamne površine. Podaci površina koroninih šupljina (CH) dobiveni su mjerenjem vidljive površine koroninih šupljina na isječku oko središnjeg meridijana širine $\pm 10^\circ$ heliografske dužine. Vrijednosti CH dane su kao omjer površine koronine šupljine vidljive na isječku oko središnjeg meridijana i ukupne površine isječka (Vršnak et al., 2007). Ovakav profil podataka ne obuhvaća cijelu površinu koroninih šupljina nego samo dio površine vidljive na isječku. Ako se na isječku nalazi više koroninih šupljina, CH daje ukupnu površinu svih šupljina vidljivih na isječku, zbog čega se iz podataka ne može razlučiti njihov broj.

Parametri Sunčevog vjetra su: gustoća protona n [br. protona/cm³], brzina protona (srednja brzina Sunčevog vjetra) $|V|$ [km/s], te jakost magnetskog polja $|B|$ [nT]. Podaci su dobiveni pomoću Solar Wind Electron Proton and Alpha Monitor (SWEPAM) instrumenta i magnetometra (MAG) sa Advanced Composition Explorer (ACE) satelita (<http://www.srl.caltech.edu/ACE/ASC/level2/>). Satelit se nalazi u 1. libracijskoj točki (Lagrangeova ili L1 točka) smještenoj između Zemlje i Sunca na udaljenosti 1.5 milijuna km od Zemlje. Pozicija satelita omogućuje mjerenje (24 h/dan) svojstva IMP-a i Sunčevog vjetra izvan utjecaja geomagnetskog polja. Satelit šalje podatke parametara

Sunčevog vjetra u realnom vremenu oko 30 minuta prije nego što Sunčev vjetar stigne do Zemljine magnetosfere.

Kao pokazatelji geomagnetske aktivnosti korištene su satne vrijednosti Dst i AE indeksa sa stranica Svjetskog centra podataka za geomagnetizam, Kyoto (the World Data Center for Geomagnetism, Kyoto: <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dstae/index.html>), te 3-satne vrijednosti Ap indeksa sa stranica <http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/cgi-bin/kp-cgi>. Dst indeks mjeri intenzitet prstenaste struje, a izvodi se na temelju mjerenja poremećaja magnetskog polja na magnetskim postajama smještenim na 20-40° zemljopisne širine. AE indeks predstavlja mjeru aktivnosti electrojet struja u auroralnoj zoni ($\phi > 70^\circ$ s.z.š.), dok je Ap indeks mjera geomagnetske aktivnosti u umjerenim širinama. Ovakav odabir geomagnetskih indeksa omogućuje praćenje magnetskih podoluja i oluja, te daje uvid u geomagnetsku aktivnost na svim zemljopisnim širinama. Iz satnih vrijednosti Dst i AE indeksa, te 3-satnih vrijednosti Ap indeksa izračunati su 6-satni srednjaci Dst, AE i Ap indeksa za 0, 6, 12 i 18 sati (UT) svakog dana.



Slika 12. Vremenski nizovi podataka za period 60.-261.dana 2006. godine: površine koroninih šupljina (CH), gustoće protona n , brzine protona V , jakosti magnetskog polja B i geomagnetskih indeksa.

Na slici 12 prikazani su, od vrha prema dnu, vremenski nizovi 6-satnih vrijednosti CH, parametara Sunčevog vjetra (n , V , B), te geomagnetskih indeksa (AE, Ap, Dst). Rotacijom Sunca, a i samom evolucijom koroninih šupljina, mijenja se površina šupljina CH vidljiva na isječku oko središnjeg meridijana. Maksimumi vrijednosti CH ovise o širinskoj rasprostranjenosti šupljina, dok širina maksimuma ovisi o dužinskoj rasprostranjenosti. Budući da su koronine šupljine izvor brzog Sunčevog vjetra, prelazak šupljine preko isječka oko središnjeg meridijana uzrokuje promjene u mjerenim parametrima Sunčevog vjetra (n , V , B) koje izravno utječu na geomagnetsku aktivnost. Korelacije površine i pozicije CH s vremenskim varijacijama i amplitudama parametara brzih tokova Sunčevog vjetra na 1 AJ utvrdili su Vršnak et al. (2007). Maksimumi n , B , T i V javljaju se u prosjeku jedan, dva, tri i četiri dana nakon maksimuma površine CH. Dok brze tokove Sunčevog vjetra karakterizira mala gustoća i jakost magnetskog polja, te velike brzine vjetra, područja interakcije koja nastaju ispred brzih tokova posjeduju male brzine vjetra, te velike vrijednosti gustoće i jakosti magnetskog polja. Najprije se, nailaskom KPI, zamjećuje porast gustoće zbog kompresije plazme na području interakcije brzog i sporog Sunčevog vjetra, koji se na slici 12 može zamijetiti otprilike 1-2 dana poslije maksimuma CH. Vrijednosti maksimuma n kreću se oko $10\text{-}30\text{ p/cm}^3$ što je za red veličine veća vrijednost nego gustoća p ambijentalnog Sunčevog vjetra. Na području KPI dolazi i do kompresije IMP-a što uzrokuje porast jakosti polja B čiji maksimum slijedi nakon maksimuma n , a prije maksimuma V . Maksimalne vrijednosti 6-satnih srednjaka magnetskog polja na područjima interakcije kreću se oko $10\text{-}19\text{ nT}$. Nakon prolaska KPI nailazi brzi tok, pri čemu n naglo pada, dok se B postupno smanjuje, pa se minimumi B mogu zamijetiti u brzom toku (najbolje se vidi oko 160.-220. dana). Na slici 12 mogu se uočiti brzi tokovi Sunčevog vjetra sa $V > 600\text{ km/s}$ kao maksimumi vrijednosti V . Brzi tokovi pokazuju karakteristični profil; nagli porast i postupni pad brzine (Tsurutani et al., 1994). Neki od karakterističnih primjera vidljivi su oko 150.-170. i 210.-230. dana. Pojedini brzi tokovi posjeduju nepravilne profile koji se mogu interpretirati kao superpozicija nekoliko manjih tokova (npr. između 140.-150. dana) ili kao interakcija KIM i brzog toka (oko 247. dana). U promatranom razdoblju zamijećena su tri brza toka po rotaciji. Period javljanja svakog toka iznosi oko 27 dana što odgovara periodu rotacije Sunca na 1 AJ. Tok 1 ($V_{maks}=550\text{-}670\text{ km/s}$) javlja se oko 71., 100., 127.,

154., 180., 209. i 235. dana. Oko 5 dana nakon maksimuma toka 1, javlja se tok 2 ($V_{maks}=600-700$ km/s), a oko 7 dana iza toka 2 javlja se tok 3 ($V_{maks}=500-620$ km/s). Ovakav raspored brzih tokova ukazuje na postojanje triju dugotrajnih koroninih šupljina na nižim heliografskim širinama koje se ne mogu vidjeti u podacima CH.

Geoefektivnost brzih tokova varira u vremenu, pa brzi tok tijekom svake rotacije uzrokuje geomagnetsku aktivnost različitog intenziteta. Geomagnetska aktivnost prati se pomoću varijacija geomagnetskih indeksa (AE, Ap i Dst). Najveće varijacije geomagnetskih indeksa javljaju se oko 80., 100., 220. i 230. dana, u vremenu kada je zamijećena veća jakost magnetskog polja. Dst indeks koji predstavlja slabljenje geomagnetskog polja zbog jačanja intenziteta prstenaste struje, pokazuje negativne varijacije $-30 \text{ nT} < \text{Dst} < -89 \text{ nT}$, što ukazuje na olujnu aktivnost slabog do umjerenog intenziteta. U promatranom razdoblju pojavile su se četiri oluje umjerenog intenziteta s vrijednostima Dst indeksa $-89 \text{ nT} < \text{Dst} < -50 \text{ nT}$, i to 95., 99., 104., i 232. dana. Svaka od tih oluja povezana je s jakosti magnetskog polja $|B| > 11 \text{ nT}$. Oluja 232. dana uzrokovana je nailaskom KIM. Od devet oluja slabog intenziteta ($-50 \text{ nT} < \text{Dst} < -30 \text{ nT}$), dvije oluje (124. i 244. dana) uzrokovane su nailaskom KIM, dok oluja 192. dana koja je također uzrokovana nailaskom KIM ima $\text{Dst} > -30 \text{ nT}$. Pozitivne vrijednosti Dst indeksa javljaju se u vrijeme prolaska sporog vjetrova ($V < 400$ km/s), tj. prilikom nailaska KPI. Iako su na području interakcije brzine male, porast gustoće za red veličine zbog kompresije plazme na KPI glavni je uzrok porasta dinamičkog tlaka na magnetopauzi koji uzrokuje porast površinskog magnetskog polja, a time i porast Dst indeksa na pozitivne vrijednosti. AE indeks predstavlja aktivnost elektrojet struje u auroralnoj zoni i mjera je podolujne aktivnosti. U promatranom razdoblju maksimumi AE indeksa kreću se oko 450-1 000 nT. Vrijednosti AE indeksa ($> 685 \text{ nT}$) iznimno su visoke tijekom glavnih faza oluja umjerenog intenziteta 95., 104. i 232. dana, dok su za vrijeme oluja slabog intenziteta nešto niže ($450 \text{ nT} < \text{AE} < 670 \text{ nT}$). Fluktuacije AE indeksa ($400 \text{ nT} < \text{AE} < 640 \text{ nT}$) koje su se pojavile bez većih promjena u Dst indeksu mogu se interpretirati kao podolujna aktivnost bez značajne pojave olujne aktivnosti (npr. 132., 179. i 196. dana). Maksimumi aktivnosti AE indeksa javljaju se prilikom nastanka oluje i postupno se smanjuju tijekom glavne faze i faze oporavka koja može trajati i do nekoliko dana. Ti produljeni periodi pojačane AE aktivnosti (najbolje vidljivo oko 80. i 160. dana) nazivaju se HILDCAA.

Njih uzrokuju Alfvénovi valovi velikih amplituda koji se šire kroz brze tokove Sunčevog vjetra (Tsurutani et al., 1995). HILDCAA je period pojačane podolujne aktivnosti tijekom kojeg dolazi do dodatnog ubrizgavanja energije u prstenastu struju što se očituje kao pad Dst indeksa (10-ak nT). Prema Tsurutaniu et al. (1995) ta dodatna energija je glavni uzrok dugog trajanja faze oporavka oluja koje mogu trajati i do nekoliko dana. Intervali niskih vrijednosti AE indeksa javljaju se nakon prolaska brzih tokova kada su Alfvénovi valovi odsutni i magnetsko polje slabo, a gustoća plazme raste. Ap indeks koji predstavlja globalnu geomagnetsku aktivnost u umjerenim širinama osjetljiv je na podolujnu i olujnu aktivnost, te se iz vrijednosti Ap indeksa ne može točno utvrditi koliki je utjecaj olujne ili podolujne aktivnosti na geomagnetsku aktivnost umjerenih širina. Ap indeks bolje reagira na olujnu aktivnost tijekom oluja umjerenog intenziteta kada je intenzitet prstenaste struje veći i kada se zamjećuju najveće vrijednosti Ap indeksa ($50 < Ap < 100$). No maksimumi Ap indeksa ($40 < Ap < 70$) mogu se zamijetiti i u vrijeme oluja slabog intenziteta (78., 127., 209. i 219. dana) kada Ap indeks bolje reagira na podolujnu aktivnost. U promatranom razdoblju zamijećeno je osam geomagnetski poremećenih dana ($Ap > 40$).

3.2. Metoda

Za utvrđivanje postojanja/nepostojanja veze između parametara Sunčevog vjetra (koji opisuju brze vjetrove) i geomagnetskih indeksa (koji opisuju odgovor magnetosfere na brze tokove Sunčevog vjetra) korištena je korelacijska analiza. Traži se koeficijent korelacije koji predstavlja najvjerojatniju korelaciju između vremenskih nizova mjerenja, te pravac regresije koji najbolje opisuje linearnu vezu između podataka.

Neka su $x(t)$ i $y(t)$ vremenski nizovi mjerenja parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa čije se vrijednosti neprekidno mijenjaju u vremenu t . Traži se koeficijent korelacije R koji predstavlja mjeru linearne zavisnosti između $x(t)$ i $y(t)$. Koeficijent korelacije poprima vrijednosti $-1 < R < 1$, gdje je -1 savršena negativna, a 1 savršena pozitivna korelacija između podataka, dok vrijednost 0 ukazuje na nepostojanje

korelacije. Često postoji značajni vremenski posmak u odgovoru magnetosfere na varijacije parametara Sunčevog vjetra, pa se $x(t)$ i $y(t)$ koreliraju s vremenskim posmakom, tj. traži se korelacija između $x(t)$ i $y(t+dt)$.

Neka su $\{x_t\}_{t=1,n}$ i $\{y_t\}_{t=1,n}$ vremenski nizovi 6-satnih vrijednosti, a vremenski korak iznosi $dt=0.25$ dana (6h). Tada je koeficijent korelacije $R(k)$ s vremenskim posmakom $\Delta t=kdt$ mjera linearne zavisnosti između vrijednosti x_t i vrijednosti $y_{t+\Delta t}$ koja nastupa Δt vremena nakon x_t :

$$R(k) = \frac{(n-k) \sum_{t=1}^{n-k} x_t y_{t+k} - \sum_{t=1}^{n-k} x_t \sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k}}{\sqrt{\left((n-k) \sum_{t=1}^{n-k} x_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-k} x_t \right)^2 \right) \left((n-k) \sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k}^2 - \left(\sum_{t=1}^{n-k} y_{t+k} \right)^2 \right)}}, \quad k = 0, 1, \dots, n-1 \quad (3.2.1.)$$

Za negativne vremenske posmake Δt , $R(k)$ je:

$$R(k) = \frac{(n+k) \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} y_t - \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} \sum_{t=1}^{n+k} y_t}{\sqrt{\left((n+k) \sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k}^2 - \left(\sum_{t=1}^{n+k} x_{t-k} \right)^2 \right) \left((n+k) \sum_{t=1}^{n+k} y_t^2 - \left(\sum_{t=1}^{n+k} y_t \right)^2 \right)}}, \quad k = -1, \dots, -(n-1) \quad (3.2.2.)$$

Vrijednosti $R(k)$ dobivene za različite vremenske posmake Δt čine korelacionu funkciju $R(\Delta t)$ iz koje se može očitati vremenski posmak Δt pri kojem je koeficijent korelacije najveći. Taj vremenski posmak predstavlja vremenski odgovor magnetosfere na varijacije parametara Sunčevog vjetra. Što je Δt veći, to je manje parova $(x_t, y_{t+\Delta t})$ za računanje koeficijenta korelacije $R(k)$ zbog čega funkcija $R(\Delta t)$ postaje nepouzdana i može proizvesti lažne korelacije između podataka. Zbog te činjenice gledane su vrijednosti funkcije korelacije $R(\Delta t)$ za $\Delta t = \pm 10$ dana.

Nakon što je ustanovljeno postojanje korelacije između nizova podataka i vremenski posmak Δt pri kojem postoji najbolja korelacija, slijedi povezivanje vremenski pomaknutih nizova $x(t)$ i $y(t+\Delta t)$ nekom funkcijom koja bi omogućila da se iz zadane vrijednosti jedne varijable izračuna druga.

Neka su $\{x_t\}_{t=1,n-\Delta t}$ i $\{y_t\}_{t=1+\Delta t,n}$ vremenski pomaknuti nizovi 6-satnih vrijednosti parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa gdje je Δt vremenski posmak za najbolju korelaciju. Pretpostavljena je linearna veza između podataka te se traži pravac regresije u obliku: $y(t')=ax(t)+b$, gdje je t' pomaknuto ili retardirano vrijeme ($t'=t+\Delta t$).

Skup mjerenih podataka sastoji od $n-\Delta t$ vremenski pomaknutih parova x_t i y_t , tj. parova (x_i, y_i) , $i=1, \dots, n-\Delta t$. Jednadžba regresije za mjerene vrijednosti x_i i y_i tada glasi

$$y_i = ax_i + b + \varepsilon_i, \quad i=1, \dots, n-\Delta t \quad (3.2.3.)$$

gdje su ε_i odstupanja mjerenih vrijednosti y_i od predviđenih vrijednosti $ax_i + b$

$$\varepsilon_i = y_i - (ax_i + b), \quad i=1, \dots, n-\Delta t \quad (3.2.4.)$$

Najvjerojatniji pravac regresije nalazi se metodom najmanjih kvadrata gdje se traže koeficijenti pravca regresije a i b koji minimaliziraju sumu kvadrata odstupanja $\sum \varepsilon_i^2$,

$$f(a, b) = \sum_{i=1}^{n-\Delta t} [y_i - (ax_i + b)]^2 = \sum_{i=1}^{n-\Delta t} \varepsilon_i^2 \rightarrow \min \quad (3.2.5.)$$

Suma kvadrata odstupanja je minimalna kada vrijedi,

$$\frac{\partial f(a, b)}{\partial a} = 0 \quad \text{i} \quad \frac{\partial f(a, b)}{\partial b} = 0 \quad (3.2.6.)$$

Uz te uvjete dobiveni su koeficijenti a i b pravca regresije,

$$a = \frac{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i y_i - \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2} \quad \text{i} \quad b = \frac{\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i - \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i y_i}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2} \quad (3.2.7)$$

Pravac regresije je prilično tolerantan za mala odstupanja između podataka i linije, dok pri većim odstupanjima dolazi do znatnog prilagođavanja linije zbog čega je linearna regresija neotporna na velika odstupanja.

Nepouzdanosti koeficijenata pravca regresije a i b su,

$$M_a = \sqrt{\frac{1}{(n - \Delta t - 2)} \left[\frac{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} y_i \right)^2}{(n - \Delta t) \sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i \right)^2} - a^2 \right]} \quad \text{i} \quad M_b = M_a \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n-\Delta t} x_i^2}{n - \Delta t}} \quad (3.2.8)$$

Postupak je proveden na originalnim vremenskim nizovima i vremenskim nizovima iz kojih su izbačeni dani kada su se dogodile erupcije KIM. Analiza i obrada podataka rađena je pomoću MATLAB-a 7.7.0., a popis skripti dan je u prilogu.

3.3. Rezultati

U tablicama 10-14 prikazani su rezultati korelacijske analize za sve ispitane veze, gdje su a i b koeficijenti pravca regresije, R koeficijenti korelacije i Δt vremenski posmaci za najbolju korelaciju, a a/KIM , b/KIM , R/KIM i $\Delta t/KIM$ vrijednosti za vremenske nizove iz kojih su izbačeni dani kada su se javili KIM. Na slikama 13-22 prikazani su grafovi rasapa podataka za vremenski pomaknute podatke s pripadnim pravcima regresije te koeficijentima korelacije i vremenskim posmacima za najbolju korelaciju. U tablicama 15-19 nalaze se rezultati korelacijske analize za 2005. i 2006. godinu.

3.3.1. Korelacije između geomagnetskih indeksa

U ispitivanoj vezi između geomagnetskih indeksa (tablica 10), najbolji koeficijent korelacije ($R=0.81$) nađen je između AE i Ap indeksa za vremenski posmak $\Delta t=0$ dana. Koeficijenti korelacije Dst indeksa s AE i Ap indeksima pokazuju antikorelaciju uz negativni vremenski posmak ($\Delta t=-0.25$ dana), što znači da Dst indeks kasni 0.25 dana za vrijednostima AE i Ap indeksa. Koeficijenti korelacije vremenskih nizova bez KIM ne razlikuju se mnogo od koeficijenata originalnog niza te pokazuju slične korelacije između indeksa.

Tablica 10. Korelacije između geomagnetskih indeksa.

	a	a/KIM	b	b/KIM	R	R/KIM	Δt	$\Delta t/KIM$
Dst - AE	-7.41	-7.06	100.84	100.52	-0.73	-0.72	-0.25	-0.25
Dst - Ap	-0.51	-0.49	4.29	4.24	-0.71	-0.71	-0.25	-0.25
AE - Ap	0.057	0.056	-0.8	-0.8	0.81	0.81	0	0

Na slici 13 prikazani su grafovi rasapa vremenski pomaknutih nizova geomagnetskih indeksa s naznačenim pravcima linearne regresije, koeficijentima korelacije i vremenskim posmacima. Grafovi rasapa podataka otkrivaju približno linearnu vezu između geomagnetskih indeksa, dok se u vezi Dst-AE i Dst-Ap može uočiti nelinearna veza. Na slici 13a zamjećuje se porast rasapa AE indeksa oko pravca regresije padom Dst indeksa na

negativnije vrijednosti, što znači da podolujna aktivnost može biti značajna ili zanemariva u vrijeme jače olujne aktivnosti. Na grafu Dst-Ap (sl. 13b) također se zamjećuje porast rasapa Ap indeksa, koji je manji od rasapa AE indeksa. Za $Dst < -40$ nT (sl. 13a) vjerojatnije su veće vrijednosti AE indeksa, budući da se u vrijeme olujne aktivnosti javlja intenzivnija podolujna aktivnost. Za $Dst < -40$ nT vjerojatnije su i veće vrijednosti Ap indeksa (sl. 13b), jer tijekom jačih oluja Ap indeks bolje reagira na jačanje intenziteta prstenaste struje, dok se za $Ap > 40$ (poremećeni period) primjećuju veća odstupanja Ap indeksa od pravca regresije. Male vrijednosti AE i Ap indeksa vjerojatnije su za pozitivne vrijednosti Dst indeksa, tj. podolujna i Ap aktivnost je slaba tijekom početnih faza oluja (kada se javljaju pozitivne vrijednosti Dst indeksa). U vezi AE i Ap indeksa (sl. 13c), vidljiv je najmanji rasap podataka što opravdava visoki koeficijent korelacije između tih indeksa. Rasap Ap indeksa raste porastom AE indeksa, no pri većim vrijednostima AE indeksa vjerojatnije su veće vrijednosti Ap indeksa, što je razumljivo, jer tada Ap indeks snažnije reagira na izraženiju podolujnu aktivnost.

3.3.2. Korelacije površina koroninih šupljina i geomagnetskih indeksa

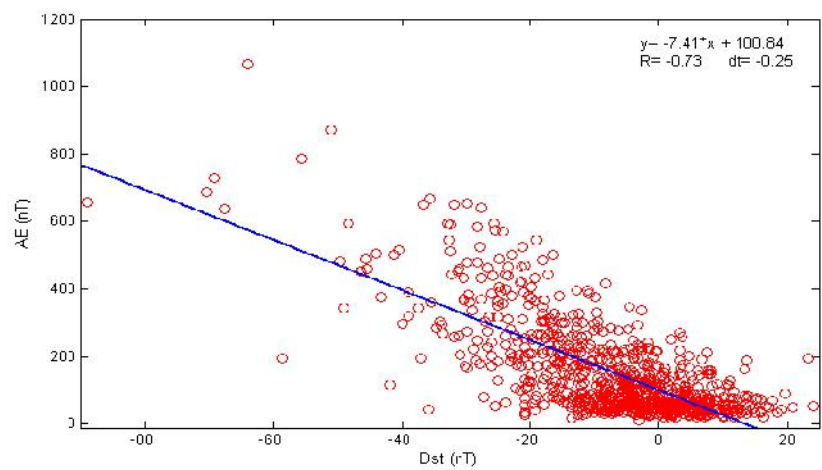
Koeficijenti korelacije CH sa Dst, AE i Ap indeksima prikazani u tablici 11 manji su od 0.4, tj. korelacije su slabe. Najbolji koeficijenti korelacije CH nađeni su s Ap ($R=0.36$, za $\Delta t=2.25$ dana) i AE indeksom ($R=0.35$, $\Delta t=2.50$ dana). Najmanji koeficijent korelacije ($R=-0.31$) uz najveći vremenski posmak ($\Delta t=3.50$ dana) nađen je za Dst indeks. Korelacija Dst indeksa je uz to i negativna što znači da se minimum Dst javlja 3.50 dana nakon maksimuma CH. Za vremenske nizove iz kojih su izbačeni KIM dobivene su nešto bolje korelacije između geomagnetskih indeksa, dok su vremenski posmaci za najbolju korelaciju ostali isti.

Tablica 11. Korelacija CH i geomagnetskih indeksa.

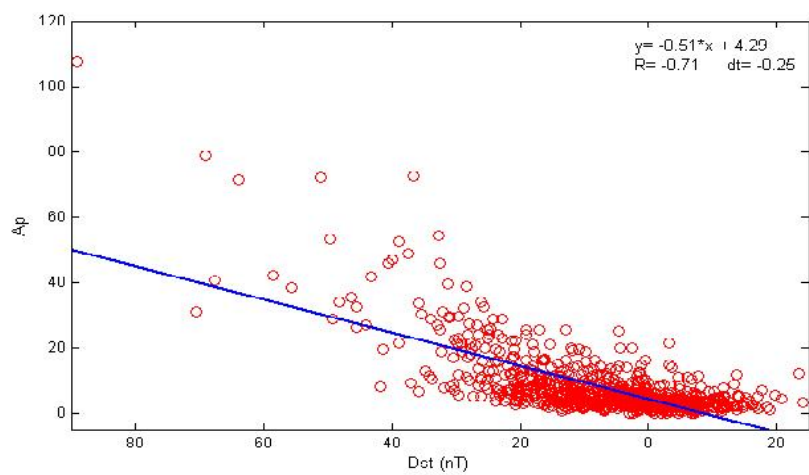
	<i>a</i>	<i>a/KIM</i>	<i>b</i>	<i>b/KIM</i>	<i>R</i>	<i>R/KIM</i>	Δt	$\Delta t/KIM$
CH - Dst	-51.09	-53.96	-2.12	-1.73	-0.31	-0.33	3.50	3.50
CH - AE	589.39	592.78	94.42	90.76	0.35	0.37	2.50	2.50
CH - Ap	42.36	43.70	3.61	3.26	0.36	0.39	2.25	2.25

Na slici 14 prikazani su grafovi rasapa za vremenski pomaknute nizove CH i geomagnetskih indeksa s naznačenim pravcima linearne regresije, koeficijentima korelacije i vremenskim posmakom. Graf rasapa CH-Dst (sl. 14a) otkriva linearnu vezu između podataka. Vrijednosti Dst indeksa nalaze se uglavnom unutar područja koje omeđuju pravci $Dst = a \cdot CH + 20 \text{ nT}$ i $Dst = a \cdot CH - 35 \text{ nT}$, a kako pravac regresije ima mali nagib, Dst indeks ne ovisi mnogo o vrijednostima CH. No, pri manjim vrijednostima CH (0.08-0.27) može se zamijetiti veći rasap podataka, što znači da je moguća značajna geomagnetska aktivnost i za male vrijednosti CH. Na slikama 14b i 14c vidljiv je porast rasapa AE i Ap indeksa porastom vrijednosti CH, ali za male vrijednosti CH (0-0.2) postoji veliki rasap podataka, tj. značajna podolujna i Ap aktivnost moguća je i za male vrijednosti CH iako je manje vjerojatna. Na grafu CH-Ap (sl. 14c) može se uočiti nelinearna veza. Nagibi pravca regresije u svim vezama su mali, što znači da linearna veza opisuje samo mali dio ovisnosti geomagnetskih indeksa o CH. Jedan od uzroka loših korelacija CH s geomagnetskim indeksima je taj što CH ne daju cijelu površinu koronine šupljine (koja može biti velika), nego samo dio vidljiv na isječku oko središnjeg meridijana zbog čega se ne vidi prava veza površine koroninih šupljina s geomagnetskom aktivnošću.

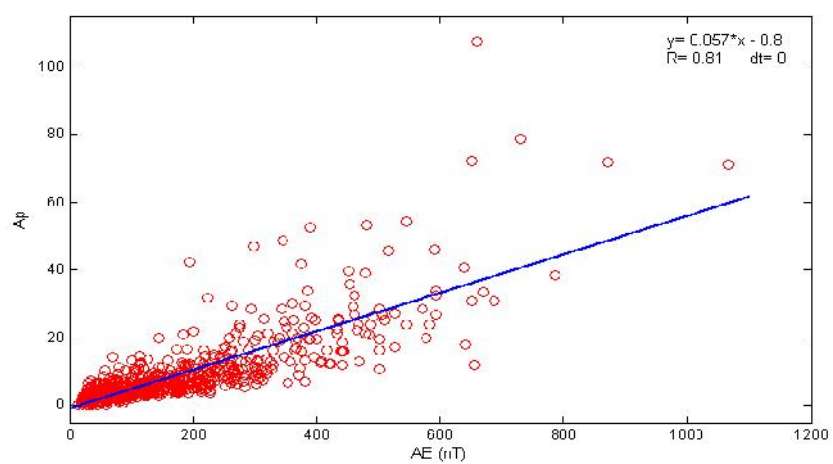
a)



b)

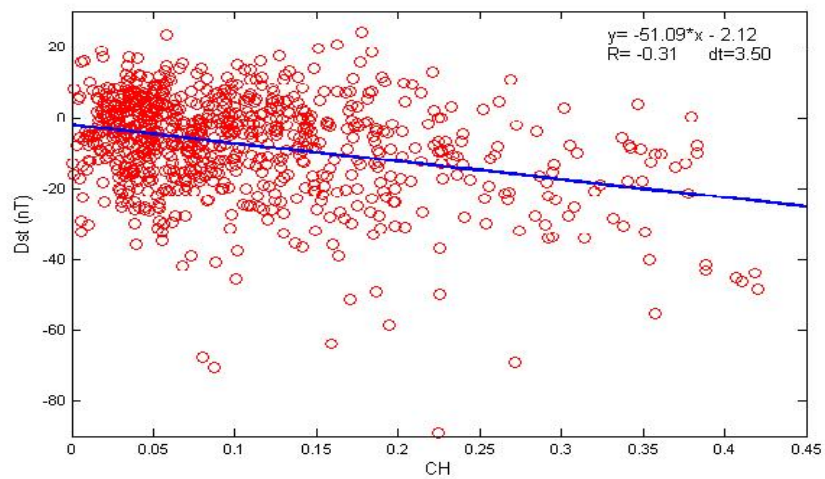


c)

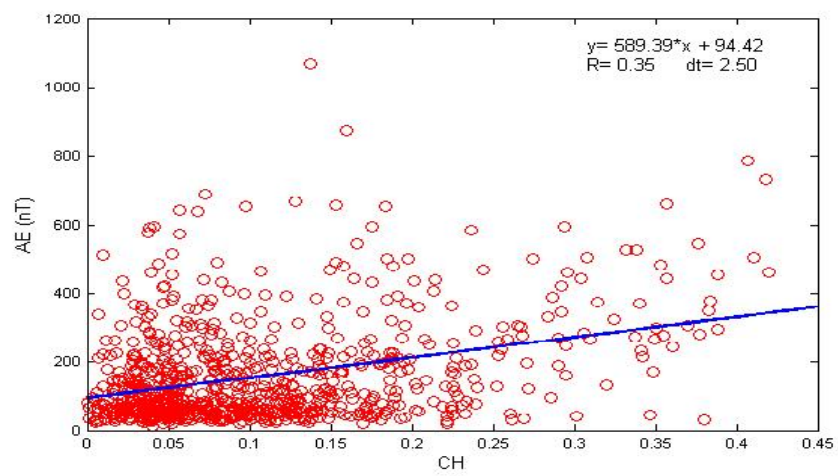


Slika 13. Vremenski pomaknute korelacije; a) Dst i AE indeksa; b) Dst i Ap indeksa; c) AE i Ap indeksa.

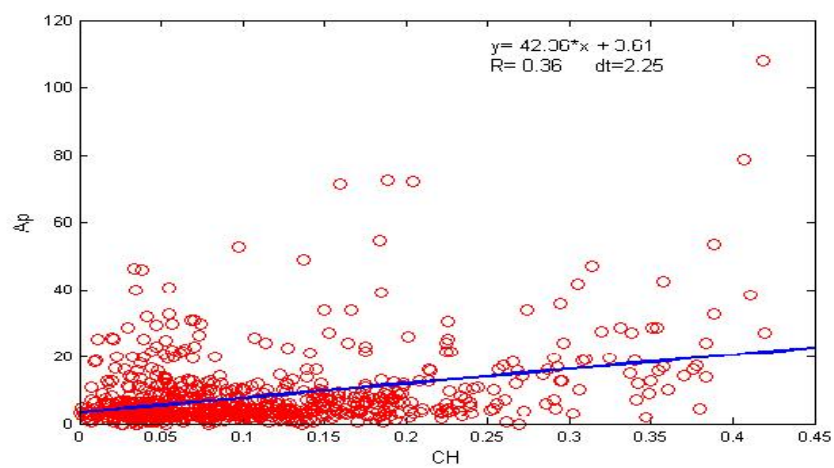
a)



b)



c)



Slika 14. Vremenski pomaknute korelacije; a) CH i Dst; b) CH i AE; c) CH i Ap.

3.3.3. Korelacije parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa

Vrijednosti koeficijenata korelacije između parametara Sunčevog vjetra i Dst indeksa koje su dane u tablici 12 pokazuju antikorelaciju Dst indeksa sa svim parametrima. Najveći koeficijenti korelacije Dst indeksa nađeni su s parametrima BV^2 i BV , dok je koeficijent korelacije s V tek nešto manji. Najmanji koeficijent korelacije nađen je s nV^2 i to pri najvećem vremenskom posmaku. Dst indeks kasni za parametrima Sunčevog vjetra u prosjeku 0.50 dana, osim u slučaju V -Dst kada su minimum Dst i maksimum V istovremeni. Koeficijenti korelacije nizova podataka bez KIM slični su koeficijentima korelacije potpunih nizova. Jedino se u vezi V -Dst može zamijetiti nešto bolja korelacija.

Najveći koeficijenti korelacije AE indeksa nađeni su bez vremenskog posmaka s BV^2 i BV (tablica 13), dok je najmanji koeficijent korelacije nađen s nV^2 . Koeficijenti korelacija ostalih parametara s AE indeksom nešto su niži ($R=0.63-0.60$) i pokazuju vremenski posmak $\Delta t = 0.25$ dana. Koeficijent korelacije s V nađen je uz najveći vremenski posmak koji je uz to i negativan ($\Delta t = -0.50$ dana, V kasni za AE indeksom 0.50 dana). Koeficijenti korelacije nizova podataka bez KIM slični su koeficijentima korelacije potpunih nizova, jedino se u vezi V -AE može zamijetiti bolja korelacija.

Koeficijenti korelacije Ap indeksa s parametrima Sunčevog vjetra (tablica 14) nađeni su bez vremenskog posmaka, osim parametra V čije vrijednosti kasne 0.75 dana za Ap indeksom. Najveći koeficijent korelacije Ap indeksa nađen je s parametrom BV , dok su koeficijenti s B^2V , BV^2 i B^2V^2 tek nešto manji. Najmanji koeficijenti korelacije nađeni su s V i nV^2 . Koeficijenti korelacije nizova podataka bez KIM slični su koeficijentima korelacije potpunih nizova, jedino se u vezi V -Ap može zamijetiti nešto bolja korelacija, dok se kod B , B^2V , nBV^2 i nV^2 najbolje korelacije javljaju s vremenskim posmakom 0.25 dana.

Geomagnetski indeksi pokazuju najbolje korelacije s BV^2 i BV parametrima, a najlošije s nV^2 . Ap indeks najbolje je koreliran s parametrima Sunčeva vjetra, osim s parametrom V koji pokazuje bolje korelacije s Dst i AE indeksom. Koeficijenti korelacije nizova podataka bez KIM pokazuju bolje korelacije geomagnetskih indeksa s parametrom V , a porast korelacije najviše se zamjećuje kod AE indeksa.

Tablica 12. Korelacije parametara Sunčevog vjetra sa Dst indeksom.

	a	a/KIM	b	b/KIM	R	R/KIM	Δt	$\Delta t/KIM$
V -Dst	-0.086	-0.089	29.14	30.6	-0.61	-0.65	0	0
B -Dst	-3.07	-3.13	7.83	8.07	-0.54	-0.53	0.75	0.75
BV -Dst	-0.007	-0.007	7.87	7.74	-0.65	-0.65	0.50	0.50
B^2V -Dst	-4.52×10^{-4}	-4.52×10^{-4}	-1.32	-1.27	-0.58	-0.56	0.50	0.50
BV^2 -Dst	-1.26×10^{-5}	-1.23×10^{-5}	4.83	4.83	-0.66	-0.67	0.50	0.50
B^2V^2 -Dst	-9.15×10^{-7}	-8.97×10^{-7}	-1.74	-1.67	-0.59	-0.58	0.50	0.50
nBV^2 -Dst	-7.71×10^{-7}	-8.56×10^{-7}	-2.25	-1.65	-0.47	-0.47	0.50	0.75
nV^2 -Dst	-8.63×10^{-6}	-8.87×10^{-6}	2.05	2.55	-0.42	-0.41	0.75	1.00

Tablica 13. Korelacije parametara Sunčevog vjetra s AE indeksom.

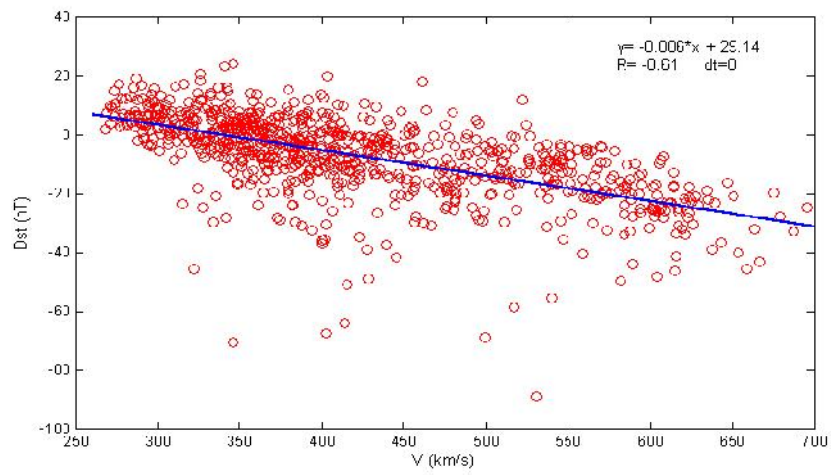
	a	a/KIM	b	b/KIM	R	R/KIM	Δt	$\Delta t/KIM$
V -AE	0.86	0.88	-207.36	-224.12	0.59	0.65	-0.50	-0.50
B -AE	36.7	37.23	-26.50	-28.79	0.63	0.64	0.25	0.25
BV -AE	0.077	0.074	-8.50	-4.11	0.68	0.69	0	0.25
B^2V -AE	0.005	0.005	89.67	88.61	0.61	0.61	0.25	0.25
BV^2 -AE	1.35×10^{-4}	1.30×10^{-4}	24.05	25.76	0.69	0.71	0	0
B^2V^2 -AE	9.62×10^{-6}	9.28×10^{-6}	96.24	94.86	0.61	0.61	0.25	0.25
nBV^2 -AE	1.00×10^{-5}	1.07×10^{-5}	88.61	83.58	0.60	0.60	0.25	0.25
nV^2 -AE	1.18×10^{-4}	1.18×10^{-4}	25.86	24.99	0.56	0.55	0.25	0.25

Tablica 14. Korelacije parametara Sunčevog vjetra s Ap indeksom.

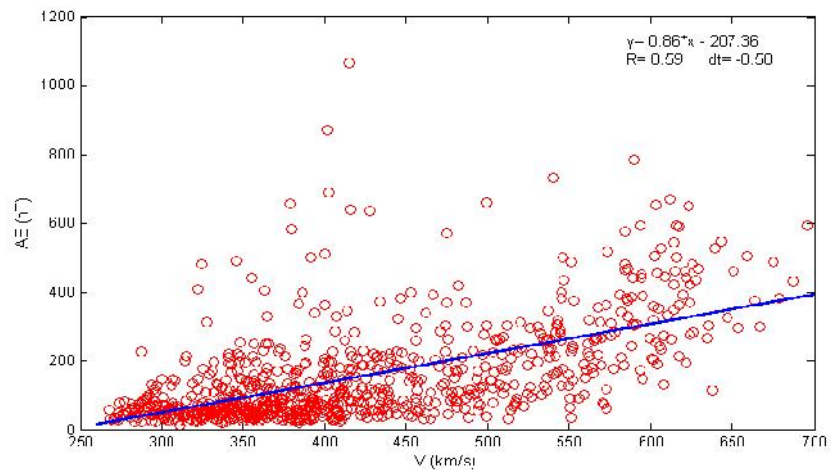
	a	a/KIM	b	b/KIM	R	R/KIM	Δt	$\Delta t/KIM$
V -Ap	0.057	0.058	-15.97	-16.78	0.56	0.61	-0.75	-0.75
B -Ap	2.91	2.93	-6.42	-6.41	0.71	0.72	0	0.25
BV -Ap	0.006	0.006	-5.13	-4.61	0.78	0.78	0	0
B^2V -Ap	4.26×10^{-4}	4.14×10^{-4}	2.29	2.41	0.76	0.75	0	0.25
BV^2 -Ap	1.03×10^{-5}	9.75×10^{-6}	-1.96	-1.66	0.75	0.76	0	0
B^2V^2 -Ap	8.47×10^{-7}	8.01×10^{-7}	2.78	2.93	0.76	0.75	0	0
nBV^2 -Ap	8.28×10^{-7}	8.51×10^{-7}	2.49	2.40	0.71	0.67	0	0.25
nV^2 -Ap	9.10×10^{-6}	8.81×10^{-6}	-1.97	-1.70	0.62	0.59	0	0.25

Na slikama 15-22 prikazani su grafovi rasapa parametara Sunčevog vjetra s geomagnetskim indeksima. Pravci regresije pokazuju porast najvjerojatnijih vrijednosti geomagnetskih indeksa porastom vrijednosti parametara Sunčevog vjetra. Usporedbom grafova rasapa Dst, AE i Ap indeksa mogu se zamijetiti različiti uzorci rasapa podataka. Rasap Dst indeksa ne pokazuje pravilnosti, no veća odstupanja Dst indeksa od pravca regresije (sl. 15a-22a) vidljiva su pri manjim vrijednostima parametara Sunčevog vjetra, pa je intenzivnija olujna aktivnost moguća i za manje vrijednosti parametara. Ovakva odstupanja nalaze se na svim grafovima Dst indeksa, a najmanje su vidljiva u vezama BV i BV^2 koje imaju najveće korelacije s Dst indeksom. AE i Ap indeksi pokazuju porast rasapa porastom parametara Sunčevog vjetra, pri čemu je rasap AE indeksa veći. To znači da su niske vrijednosti AE i Ap indeksa moguće za sve vrijednosti parametara Sunčevog vjetra, dok vjerojatnost visokih vrijednosti AE (sl. 15b-22b) i Ap (sl. 15c-22c) indeksa raste porastom parametara Sunčevog vjetra. Na grafu V -Dst (sl. 15a) najveća odstupanja Dst indeksa od pravca regresije nalaze se u području sporog vjetra (250-400 km/s), a predstavljaju početke glavnih faza oluja kada dolazi do naglog pada Dst indeksa. Veća odstupanja podataka od pravca regresije u području sporog vjetra mogu se primijetiti i na grafu V -AE (sl. 15b), dok su na grafu V -Ap (sl. 15c) manje primjetna i nalaze se oko $V=400$ km/s. U vezi AE i Ap indeksa s parametrom V može se primijetiti nelinearna veza, tj. vrijednosti AE i Ap indeksa jače odstupaju od pravca regresije u području brzog vjetra (550-700 km/s).

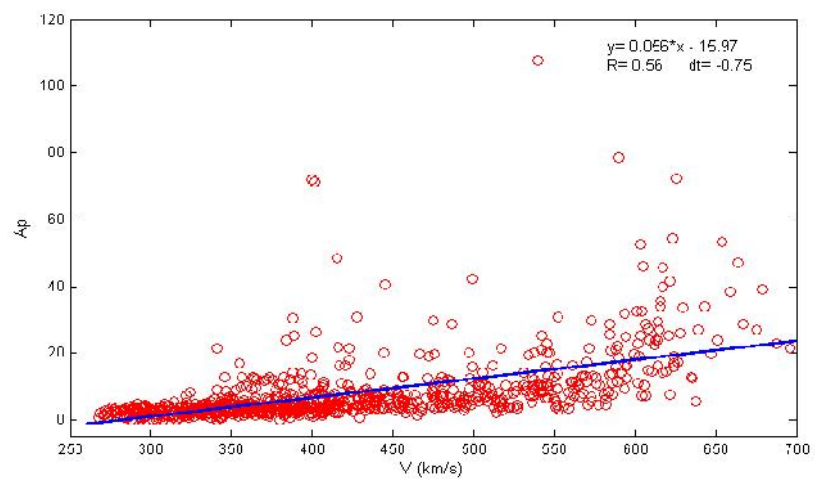
a)



b)

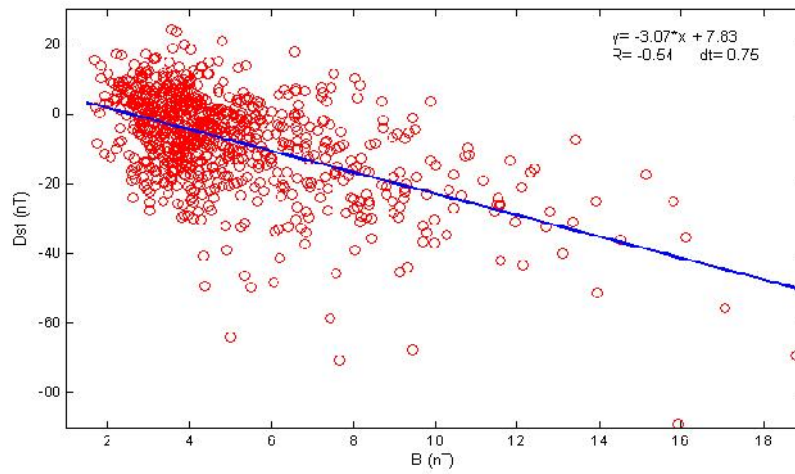


c)

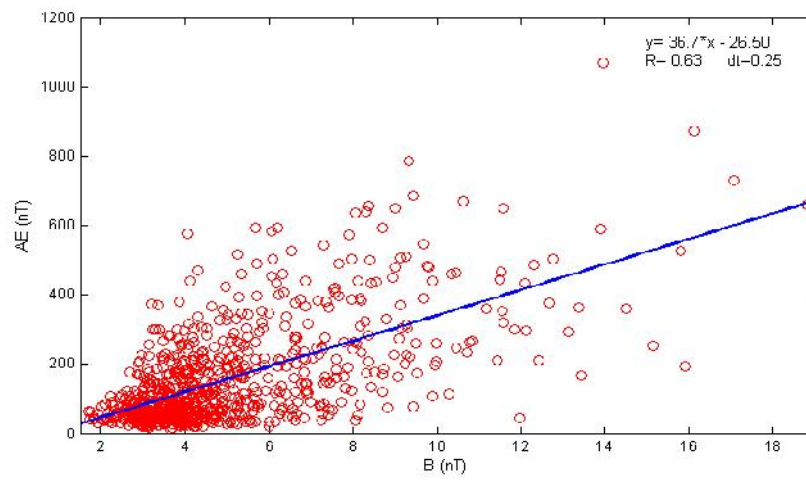


Slika 15. Vremenski pomaknute korelacije; a) V i Dst ; b) V i AE ; c) V i A_p .

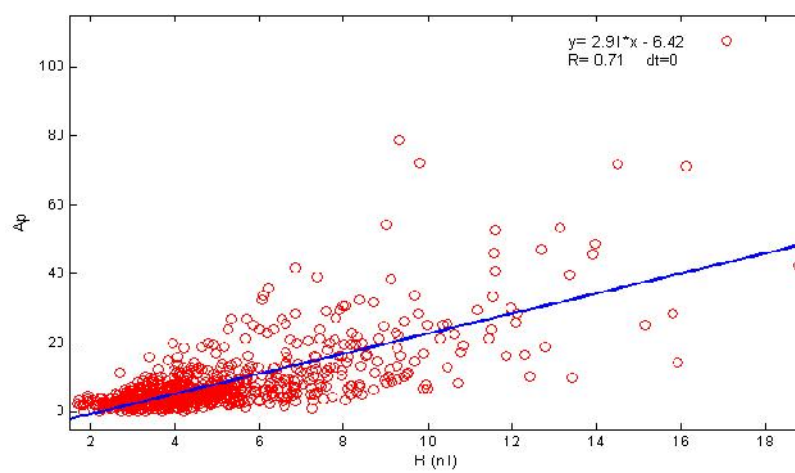
a)



b)

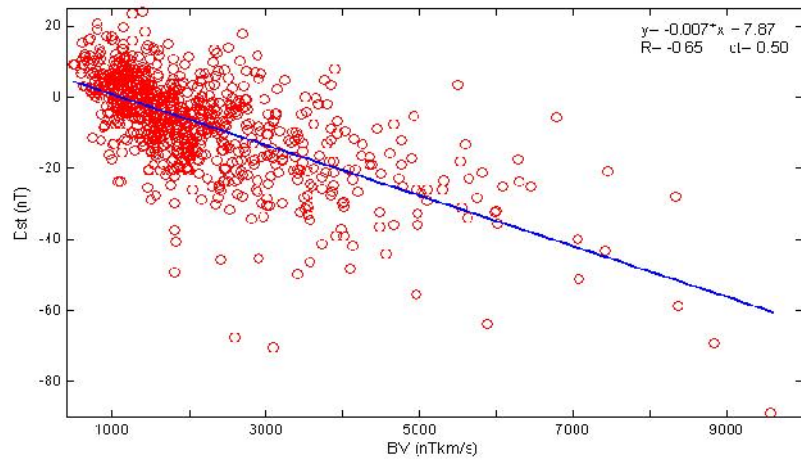


c)

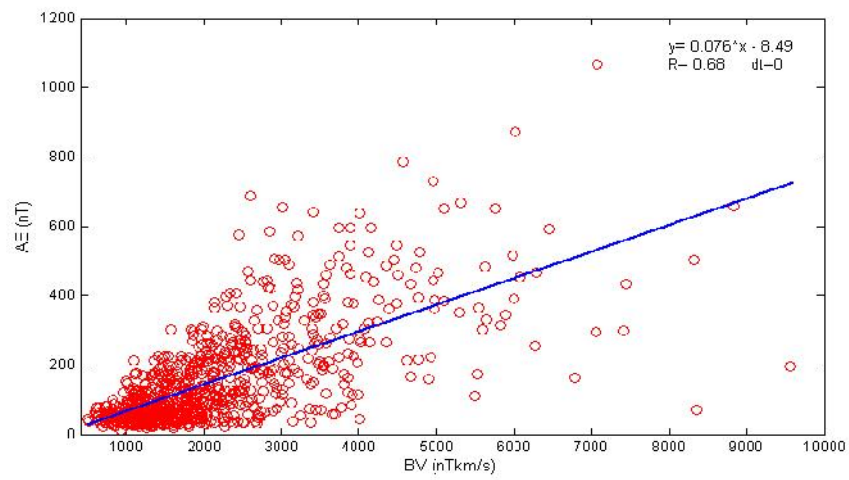


Slika 16. Vremenski pomaknute korelacije; a) B i Dst ; b) B i AE ; c) B i A_p .

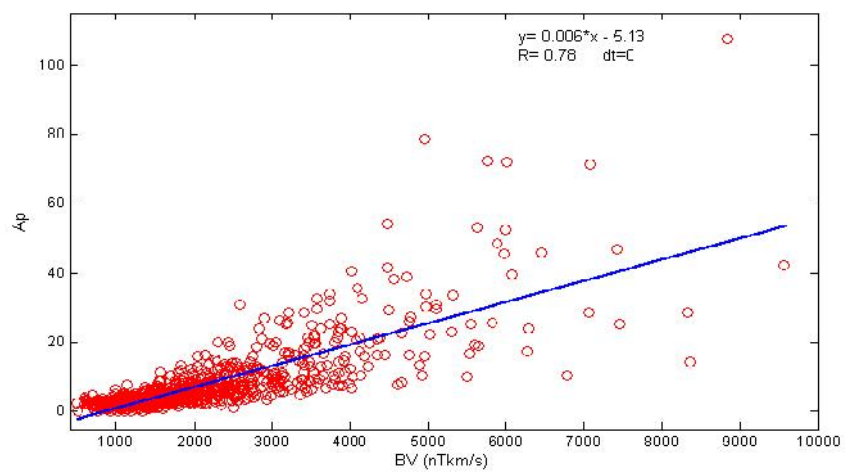
a)



b)

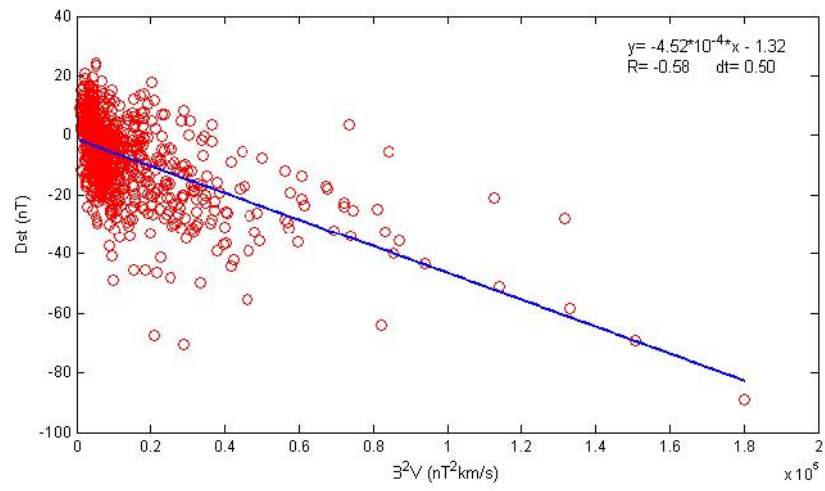


c)

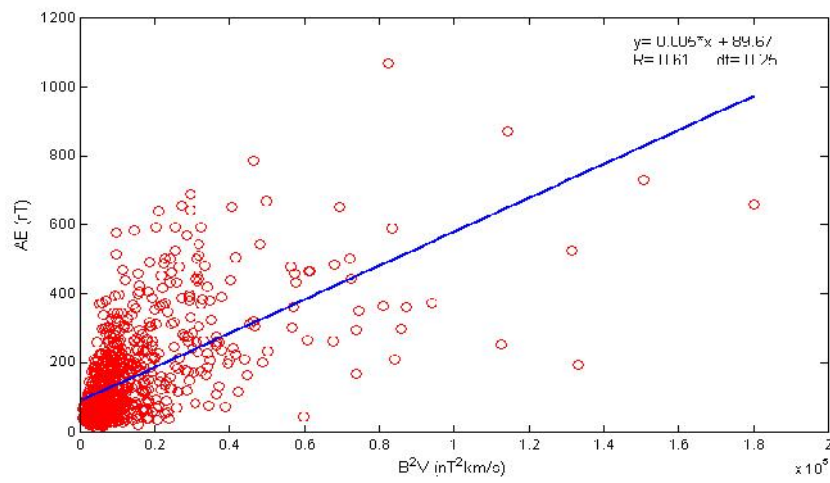


Slika 17. Vremenski pomaknute korelacije; a) BV i Dst ; b) BV i AE ; c) BV i A_p .

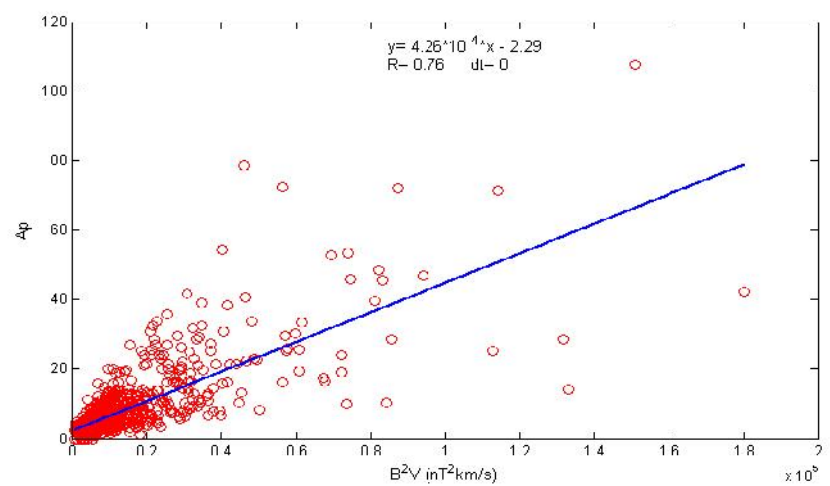
a)



b)

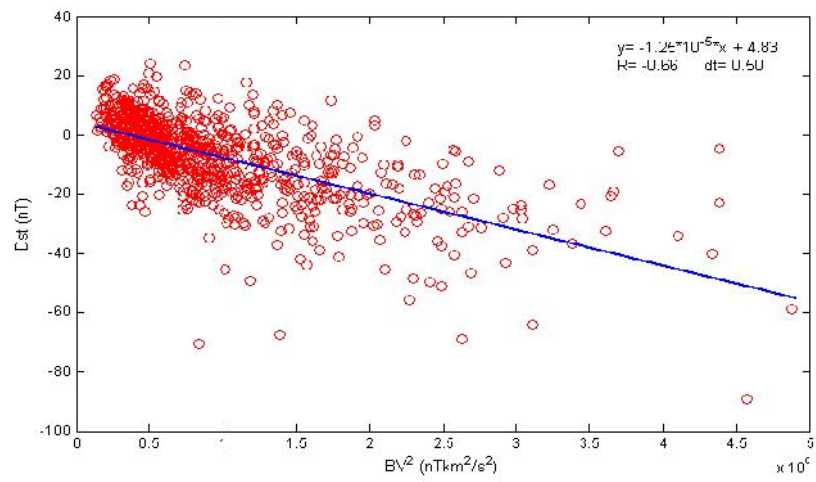


c)

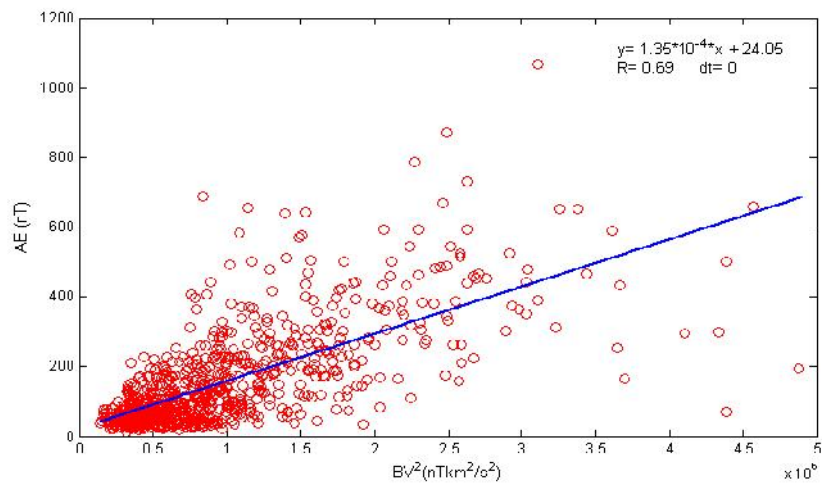


Slika 18. Vremenski pomaknute korelacije; a) B^2V i Dst; b) B^2V i AE; c) B^2V i Ap.

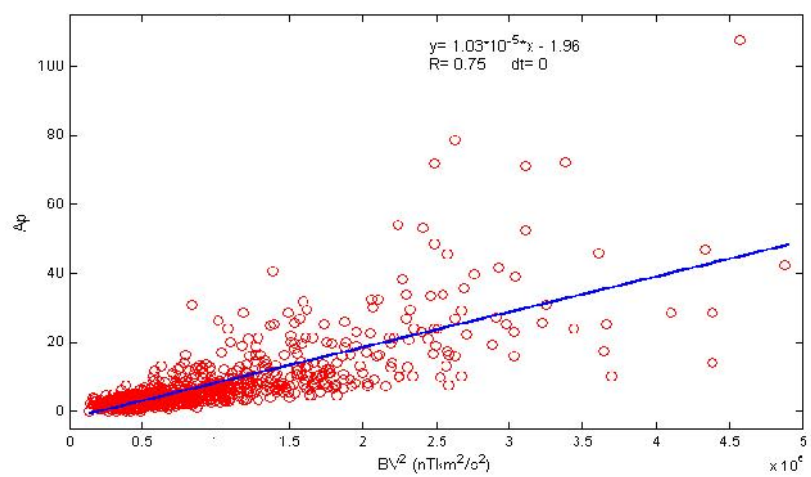
a)



b)

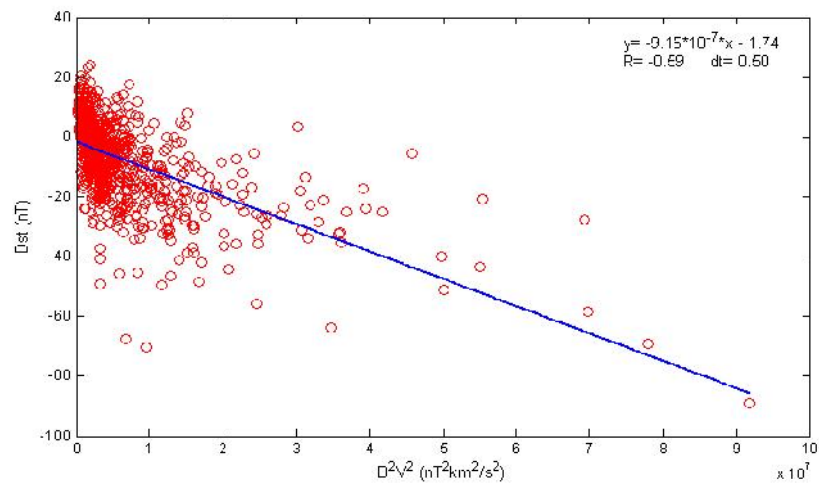


c)

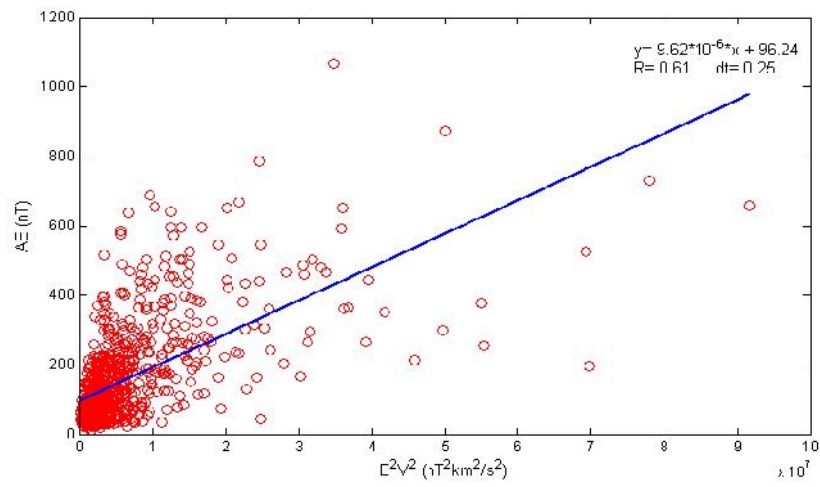


Slika 19. Vremenski pomaknute korelacije; a) BV^2 i Dst; b) BV^2 i AE; c) BV^2 i A_p .

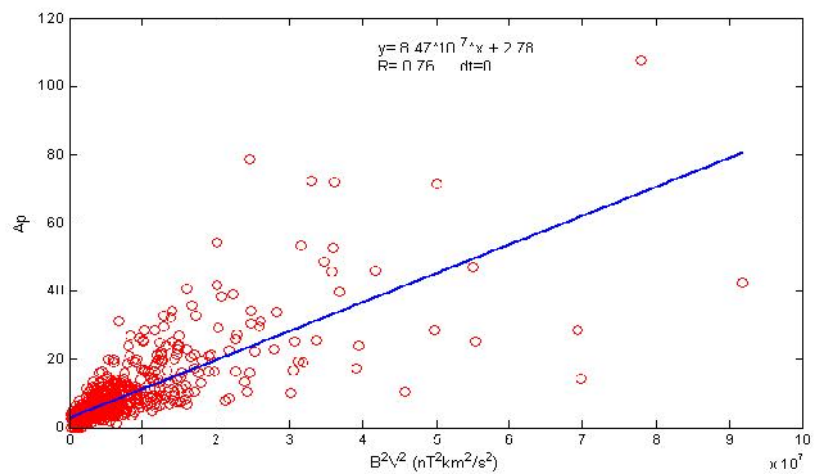
a)



b)

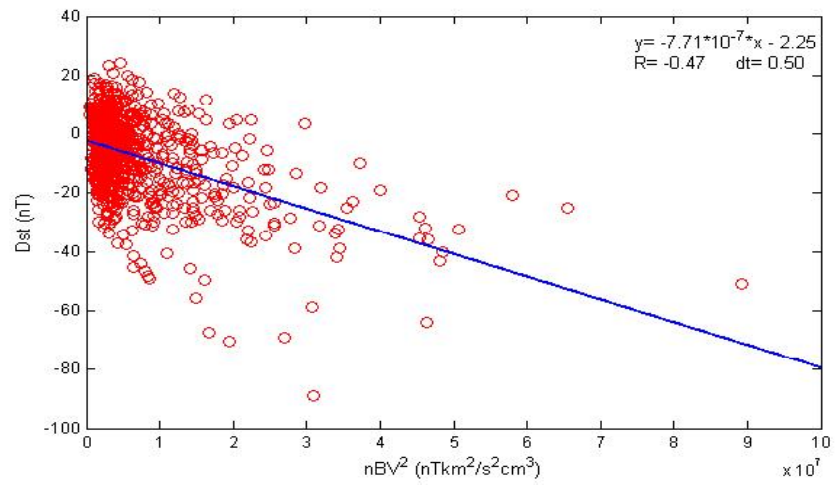


c)

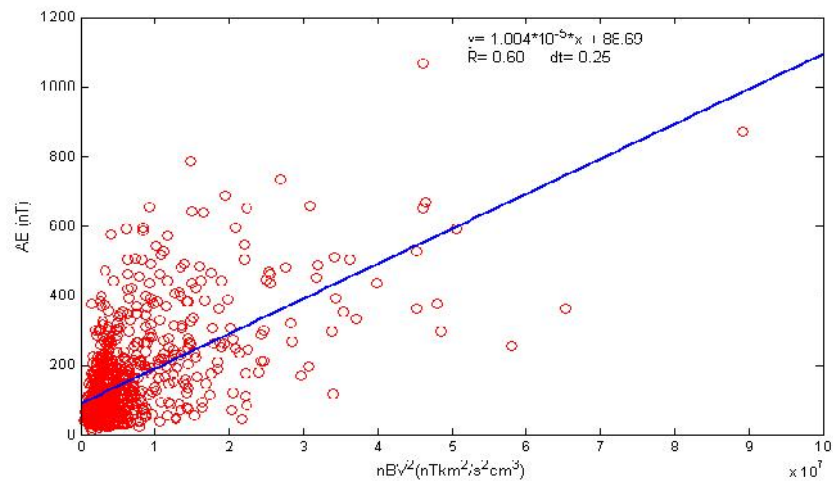


Slika 20. Vremenski pomaknute korelacije; a) B^2V^2 i Dst; b) B^2V^2 i AE; c) B^2V^2 i Ap.

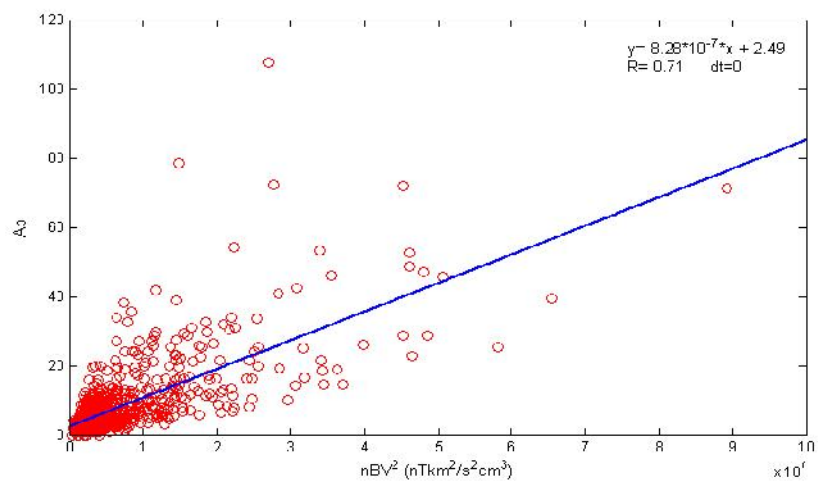
a)



b)

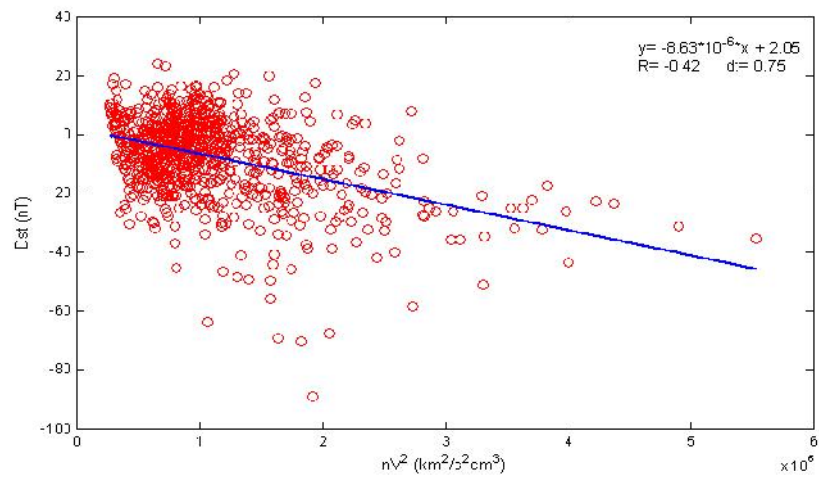


c)

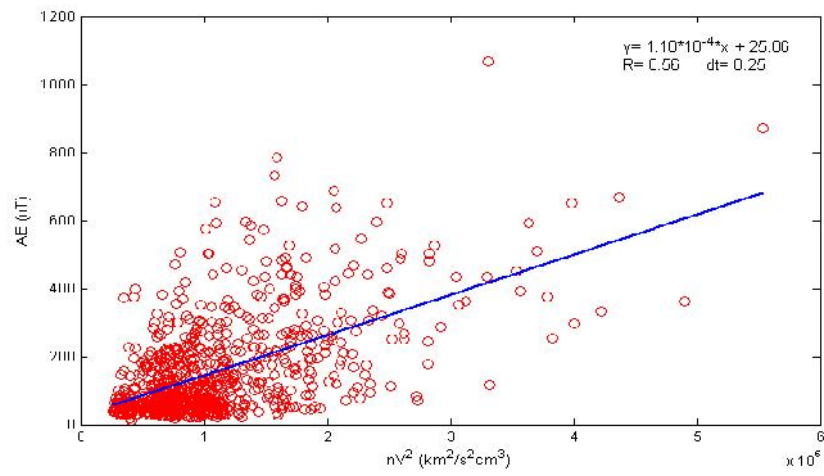


Slika 21. Vremenski pomaknute korelacije; a) nBV^2 i Dst ; b) nBV^2 i AE ; c) nBV^2 i A_p .

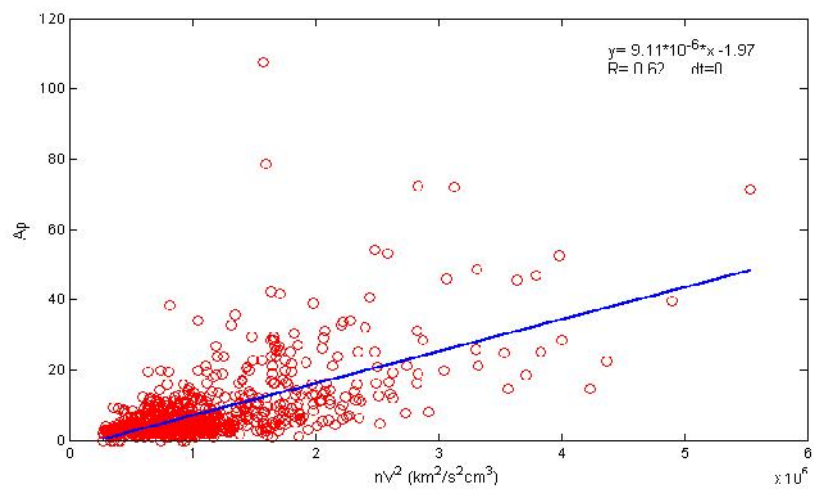
a)



b)



c)



Slika 22. Vremenski pomaknute korelacije; a) nV^2 i Dst ; b) nV^2 i AE ; c) nV^2 i A_p .

3.3.4. Usporedba rezultata za 2005. i 2006. godinu

Ispitane veze između parametara Sunčevog vjetra, CH i geomagnetskih indeksa (Dst, AE, Ap) za 2005. godinu iznesene su u radu Verbanac et al. (2010.). U 2005. godini analiziran je vremenski period od 25. do 125. dana, tj. dvostruko kraći niz podataka nego u 2006. godini. Rezultati analize za 2005. godinu zajedno s rezultatima za 2006. godinu dani su u tablicama 15-19, gdje su a_{05} , b_{05} , R_{05} i Δt_{05} vrijednosti koeficijenata pravca regresije, koeficijenta korelacije i vremenskog posmaka za najbolju korelaciju u 2005. godini, a a_{06} , b_{06} , R_{06} i Δt_{06} vrijednosti koeficijenata pravca regresije, koeficijenta korelacije i vremenskog posmaka za najbolju korelaciju u 2006. godini nizova iz kojih su izbačeni dani s KIM. Naknadno su izračunate nepouzdanosti koeficijenata pravaca regresije.

U tablici 15 nalaze se rezultati korelacijske analize Dst indeksa s parametrima Sunčevog vjetra za 2005. i 2006. godinu. Usporedbom rezultata utvrđene su bolje korelacije Dst indeksa s parametrima Sunčevog vjetra u 2006. godini, dok su u vezama Dst indeksa s nV^2 i nBV^2 koeficijenti korelacije u 2005. i 2006. godini slični. Koeficijenti korelacije Dst indeksa s parametrima V i B znatno su manji u 2005. godini. Dst indeks je u oba slučaja najbolje koreliran s parametrom BV^2 , dok je najmanji koeficijent korelacije Dst indeksa u 2005. godini nađen s parametrom B , a u 2006. godini s parametrom nV^2 . Najmanji vremenski posmak za najbolju korelaciju u oba slučaja nađen je u vezi V -Dst ($\Delta t=0$ dana), a najveći u vezi nV^2 -Dst.

Tablica 15. Korelacije parametara Sunčevog vjetra i Dst indeksa za 2005. i 2006. godinu

	a_{05}	a_{06}	b_{05}	b_{06}	R_{05}	R_{06}	Δt_{05}	Δt_{06}
V -Dst	-0.070 ± 0.005	-0.089 ± 0.004	13.4 ± 2.6	30.6 ± 1.7	-0.52	-0.65	0	0
B -Dst	-1.8 ± 0.3	-3.1 ± 0.2	-9.0 ± 1.6	8.0 ± 1	-0.35	-0.53	0.50	0.75
BV -Dst	-0.0052 ± 0.0004	-0.0071 ± 0.0003	-5.1 ± 1.4	7.6 ± 0.8	-0.52	-0.65	0.50	0.50
B^2V -Dst	$(-3.2 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	$(-4.5 \pm 0.2) \times 10^{-4}$	-13.4 ± 0.9	-1.3 ± 0.5	-0.43	-0.56	0.50	0.50
BV^2 -Dst	$(-9.3 \pm 0.7) \times 10^{-6}$	$(-1.2 \pm 0.1) \times 10^{-5}$	-6.7 ± 1.1	4.8 ± 0.6	-0.58	-0.67	0.25	0.50
B^2V^2 -Dst	$(-7.3 \pm 0.6) \times 10^{-7}$	$(-9.0 \pm 0.5) \times 10^{-7}$	-12.5 ± 0.9	-1.7 ± 0.5	-0.51	-0.58	0.50	0.50
nBV^2 -Dst	$(-7.0 \pm 0.7) \times 10^{-7}$	$(-8.6 \pm 0.6) \times 10^{-7}$	-13.4 ± 0.9	-1.7 ± 0.6	-0.45	-0.47	0.75	0.75
nV^2 -Dst	$(-8.0 \pm 0.8) \times 10^{-6}$	$(-8.9 \pm 0.7) \times 10^{-6}$	-8.7 ± 1.2	2.6 ± 0.9	-0.45	-0.41	1.25	1.00

Rezultati korelacijske analize AE indeksa s parametrima Sunčevog vjetra za 2005. i 2006. godinu dani su u tablici 16 iz koje se mogu utvrditi bolje korelacije AE indeksa s parametrima Sunčevog vjetra u 2006. godini, dok su u vezama AE indeksa s V , B^2V^2 , nBV^2 i nV^2 koeficijenti korelacije u 2005. i 2006. godini slični. Kao i u slučaju Dst indeksa, koeficijent korelacije AE indeksa s parametrom B u 2005. godini znatno je manji nego u 2006. godini, no koeficijenti korelacije s V slični su u obje godine. Budući da je razlika između R_{05} i R_{06} u vezi V -AE manja nego razlika u vezi V -Dst, razlike između korelacija R_{05} i R_{06} kombiniranih parametara manje su za AE indeks nego za Dst (pogotovo za parametre koji sadrže V^2). Najbolji koeficijent korelacije AE indeksa u 2005. i 2006. godini nađen je s parametrom BV^2 pri vremenskom posmaku 0 dana. Najmanji koeficijent korelacije AE indeksa u 2005. godini nađen je s parametrom B , a u 2006. godini s parametrom nV^2 . Negativni vremenski posmak za najbolju korelaciju u oba slučaja nađen je u vezi V -AE i iznosi -0.50 dana.

Tablica 16. Korelacije parametara Sunčevog vjetra i AE indeksa za 2005. i 2006. godinu.

	a_{05}	a_{06}	b_{05}	b_{06}	R_{05}	R_{06}	Δt_{05}	Δt_{06}
V -AE	0.97±0.06	0.88±0.03	-260±28	-224±16	0.64	0.66	-0.50	-0.50
B -AE	25.0±3	37.2±1.7	48±18	-29±9	0.41	0.64	0.25	0.25
BV -AE	0.071±0.005	0.074±0.003	-1.4±14.7	-4.11±7	0.60	0.69	0	0.25
B^2V -AE	0.0043±0.0004	0.005±0.0002	114±10	89±5	0.50	0.61	0.25	0.25
BV^2 -AE	$(1.30±0.07) \times 10^{-4}$	$(1.30±0.05) \times 10^{-4}$	16±11	26±6	0.70	0.71	0	0
B^2V^2 -AE	$(1.00±0.07) \times 10^{-5}$	$(9.28±0.44) \times 10^{-6}$	101±9	95±5	0.59	0.61	0.25	0.25
nBV^2 -AE	$(1.01±0.08) \times 10^{-5}$	$(1.07±0.05) \times 10^{-5}$	107±10	84±5	0.55	0.60	0.25	0.25
nV^2 -AE	$(1.17±0.09) \times 10^{-4}$	$(1.18±0.07) \times 10^{-4}$	40±13	25±8	0.56	0.55	0.75	0.25

Koeficijenti korelacije Ap indeksa s parametrima Sunčevog vjetra za 2005. i 2006. godinu koji se nalaze u tablici 17 pokazuju bolje korelacije Ap indeksa s parametrima Sunčevog vjetra u 2006. godini, osim u slučaju parametra V koji je bolje koreliran s Ap indeksom u 2005. godini. Koeficijenti korelacije Ap s parametrima BV^2 , B^2V^2 , nBV^2 i nV^2 u 2005. i 2006. godini su slični. Kao i u slučaju Dst i AE indeksa koeficijent korelacije Ap indeksa s parametrom B znatno je manji u 2005. godini, ali je korelacija s parametrom V bolja, pa su i razlike između R_{05} i R_{06} kombiniranih parametara manje nego kod Dst i

AE indeksa. Ap indeks je u 2005. godini najbolje koreliran s parametrom BV^2 . Najbolja korelacija u 2006. godini nađena je s parametrom BV , no koeficijent korelacije s BV^2 također je dobar. Najmanji koeficijent korelacije Ap indeksa u 2005. godini nađen je s parametrom B , a u 2006. godini s parametrom nV^2 . Negativni vremenski posmak za najbolju korelaciju u oba slučaja nađen je u vezi V -Ap.

Tablica 17. Korelacije parametara Sunčevog vjetra i Ap indeksa za 2005. i 2006. godinu.

	a_{05}	a_{06}	b_{05}	b_{06}	R_{05}	R_{06}	Δt_{05}	Δt_{06}
V -Ap	0.071 ± 0.004	0.058 ± 0.003	-22 ± 2	-17 ± 1	0.66	0.61	-0.50	-0.75
B -Ap	2.3 ± 0.2	2.9 ± 0.1	-2.2 ± 1.2	-6.4 ± 0.6	0.52	0.72	0.25	0.25
BV -Ap	0.0059 ± 0.0003	0.0059 ± 0.0002	-5.5 ± 0.9	-4.6 ± 0.4	0.70	0.78	0	0
B^2V -Ap	$(3.7 \pm 0.3) \times 10^{-4}$	$(4.1 \pm 0.1) \times 10^{-4}$	3.8 ± 0.7	2.4 ± 0.3	0.61	0.75	0	0.25
BV^2 -Ap	$(1.02 \pm 0.02) \times 10^{-5}$	$(9.8 \pm 0.3) \times 10^{-6}$	-3.1 ± 0.7	-1.7 ± 0.4	0.77	0.76	0	0
B^2V^2 -Ap	$(8.7 \pm 0.4) \times 10^{-7}$	$(8.0 \pm 0.3) \times 10^{-7}$	2.7 ± 0.6	2.9 ± 0.3	0.72	0.75	0	0
nBV^2 -Ap	$(8.4 \pm 0.5) \times 10^{-7}$	$(8.5 \pm 0.3) \times 10^{-7}$	3.6 ± 0.6	2.4 ± 0.3	0.64	0.67	0.25	0.25
nV^2 -Ap	$(8.6 \pm 0.6) \times 10^{-6}$	$(8.8 \pm 0.4) \times 10^{-6}$	-0.43 ± 0.93	-1.7 ± 0.5	0.58	0.59	0.25	0.25

Korelacije CH s geomagnetskim indeksima za 2005. i 2006. godinu dane su u tablici 18. Iz tablice je vidljivo da je CH bolje korelirana s Ap i AE indeksima u 2005. godini iako su korelacije nađene pri većem vremenskom pomaku, dok je korelacija Dst indeksa bolja u 2006. godini.

Tablica 18. Korelacija CH i geomagnetskih indeksa za 2005. i 2006. godinu.

	a_{05}	a_{06}	b_{05}	b_{06}	R_{05}	R_{06}	Δt_{05}	Δt_{06}
CH-Dst	-40 ± 7	-54 ± 6	-16 ± 1	-1.7 ± 0.8	-0.27	-0.33	3.75	3.50
CH-AE	751 ± 78	592 ± 55	121 ± 11	91 ± 7	0.43	0.37	3.00	2.50
CH-Ap	53 ± 6	44 ± 4	5.8 ± 0.5	3.3 ± 0.3	0.43	0.39	3.00	2.25

U tablici 19 nalaze se korelacije između geomagnetskih indeksa iz koje su vidljive bolje korelacije u 2005. godini.

Tablica 19. Korelacija između geomagnetskih indeksa za 2005. i 2006. godinu

	a_{05}	a_{06}	b_{05}	b_{06}	R_{05}	R_{06}	Δt_{05}	Δt_{06}
Dst-AE	-9.2 ± 0.4	-7.0 ± 0.3	18 ± 9	101 ± 4	-0.78	-0.72	-0.25	-0.25
Dst-Ap	-0.63 ± 0.03	-0.49 ± 0.02	-1.2 ± 0.7	4.2 ± 0.3	-0.75	-0.71	-0.25	-0.25
AE-Ap	0.06 ± 0.002	0.056 ± 0.002	-1.1 ± 0.5	-0.80 ± 0.3	0.89	0.81	0	0

Usporedbom rezultata za 2005. i 2006. godinu mogu se zamijetiti bolje korelacije parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa u 2006. godini. U obje promatrane godine Ap indeks pokazuje najbolje korelacije s parametrima Sunčevog vjetra (osim V), dok su korelacije Dst indeksa u oba slučaja najmanje i ujedno pokazuju najveće vremenske posmake. Parametar BV^2 najbolje je koreliran s geomagnetskim indeksima u oba slučaja, dok su najmanje korelacije u 2005. godini nađene s parametrom B , a u 2006. godini s parametrom nV^2 . Najmanje razlike između koeficijenata korelacije u 2005. i 2006. godini nađene su za nBV^2 i nV^2 , dok su najveće razlike nađene za parametar B , čije su loše korelacije glavni uzrok lošijih korelacija kombiniranih parametara u 2005. godini. Vremenski posmaci najbolje korelacije slični su i ne razlikuju se više od 0.25 dana (osim za CH). Nepouzdanosti koeficijenta a pravca regresije su za 1-2 reda veličine manje od a . Nepouzdanosti koeficijenta b pravca regresije su istog ili red veličine manje od b , no u vezama BV -AE (2005. i 2006.) te nV^2 -Ap (2005.) nepouzdanosti su veće od b .

3.3.5. Diskusija rezultata

Rezultati za 2006. godinu. Očekivano najbolje korelacije nađene su između geomagnetskih indeksa (tablica 10), budući da su varijacije indeksa podložne istim parametrima pobude. Poremećaji magnetskog polja koji se javljaju kao odgovor Zemljinog magnetskog polja na poremećaje Sunčevog vjetra mjere se na magnetskim postajama razasutim po čitavoj površini Zemlje. Iz tih poremećaja polja izvode se geomagnetski indeksi čije varijacije opisuju geomagnetsku aktivnost na svim širinama, pa jačanjem geomagnetske aktivnosti rastu i vrijednosti pojedinih geomagnetskih indeksa, a time i korelacije između indeksa. U promatranom razdoblju najbolja korelacija nađena je između AE i Ap indeksa koja se može objasniti većim utjecajem podolujne

aktivnosti na geomagnetsku aktivnost umjerenih širina. Tijekom intenzivne podolujne aktivnosti dolazi do jačanja i spuštanja electrojet struja s viših na umjerene širine gdje se nalaze mjerne postaje Ap indeksa. Zbog toga Ap bolje reagira na intenzivniju podolujnu aktivnost tijekom koje se javljaju i visoke vrijednosti AE indeksa, pa je korelacija AE-Ap dobra. Korelacija je nađena bez vremenskog posmaka što također ukazuje na činjenicu da AE i Ap mjere intenzitet iste struje (electrojet). U padajućoj fazi Sunčeva ciklusa podolujna aktivnost je izražena zbog utjecaja Alfvénovih valova koji se šire kroz brze tokove Sunčevog vjetra. Alfvénovi valovi uzrokuju povremene južne orijentacije B_z komponente zbog čega dolazi do sporadičnog prespajanja IMP-a i geomagnetskog polja na dnevnoj strani magnetopauze te ulaska energije Sunčevog vjetra u magnetosferu koja uzrokuje produžene periode podolujnih aktivnosti, a time i visoke vrijednosti AE indeksa tzv. HILDCAA. Geoefektivnost Alfvénovih valova povezana je s brzinom Sunčevog vjetra i najveća je kada su brzine Sunčevog vjetra maksimalne (Tsurutani et al., 1994). Prema Fares Saba et al. (1997) Ap indeks jače reagira na olujnu aktivnost tijekom faze razvoja oluja kada dolazi do jačanja intenziteta prstenaste struje. Efekt jačanja struje je nagli pad Dst indeksa i porast Ap indeksa zbog čega je i korelacija Dst-Ap dobra. No, korelacija AE-Ap je veća od Dst-Ap jer su oluje slabog i umjerenog intenziteta, pa je i intenzitet prstenaste struje i njezin utjecaj na Ap nešto manji. Tijekom glavnih faza oluja javlja se snažna, kontinuirana podolujna aktivnost kao posljedica pojačane konvekcije unutar magnetosfere. Konvekcijom se u unutrašnjoj magnetosferi i polarnoj ionosferi pohranjuje energija koja utječe na jačanje prstenaste i electrojet struja, što dovodi do pada Dst i porasta AE indeksa, pa je i korelacija Dst-AE dobra. U vrijeme snažne podolujne aktivnosti (HILDCAA) dolazi do ubrizgavanja energetskih p i e^- u plazmasferu, što dodatno utječe na jačanje prstenaste struje. Iz korelacija između geomagnetskih indeksa može se zaključiti bolja veza između podolujne aktivnosti (AE) i Ap aktivnosti tijekom geomagnetske aktivnosti izazvane brzim tokovima.

Najmanji koeficijenti korelacije s najvećim vremenskim posmacima nađeni su prilikom ispitivanja veze CH i geomagnetskih indeksa (tablica 11). Jedan od uzroka slabih korelacija je činjenica da CH mjeri samo dio površine koronine šupljine vidljive na isječku oko središnjeg meridijana, zbog čega se iz korelacija ne vidi prava ovisnost geomagnetske aktivnosti o površinama koroninih šupljina. Drugi uzrok je taj da

geomagnetska aktivnost ne ovisi samo o brzom vjetru iz koroninih šupljina, nego i o njegovoj propagaciji kroz interplanetarni prostor prilikom čega dolazi do promjena vrijednosti parametara Sunčevog vjetra, nastanka KPI i pojave B_z komponente važne za ulazak energije Sunčevog vjetra u magnetosferu. Veliki vremenski posmaci javljaju se jer je brzom vjetru potrebno oko 3 dana da stigne od Sunca do udaljenosti 1 AJ. Vremenski posmaci u vezama parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa bitno su manji, budući da su parametri mjereni u L1 točki (oko 30 min prije dolaska Sunčevog vjetra do magnetopauze). Korelacije CH s geomagnetskim indeksima pokazuju nešto jaču vezu brzih tokova iz koroninih šupljina s podolujnuom i Ap aktivnošću, budući da Alfvénovi valovi iz brzih tokova produžuju podolujnu aktivnost, a time i Ap aktivnost. Izbacivanjem KIM iz podataka dobivene su nešto bolje korelacije CH i geomagnetskih indeksa. U promatranom razdoblju geoefektivnost KIM nije bila značajna te je njihov utjecaj na geomagnetsku aktivnost, a time i na korelacije CH s geomagnetskim indeksima bio slab.

Koeficijenti korelacije Ap indeksa s parametrima Sunčevog vjetra najveći su za sve ispitivane veze i pokazuju najmanji vremenski posmak. Ap indeks najbolje reagira na promjene uzrokovane brzim tokovima Sunčevog vjetra i Alfvénovim valovima jer je mjera globalne geomagnetske aktivnosti i uzima u obzir efekte electrojet i prstenaste struje. Korelacije AE indeksa s parametrima Sunčevog vjetra nešto su manje, budući da se u vrijeme jače podolujne aktivnosti electrojet struje spuštaju na umjerene širine zbog čega vrijednosti AE indeksa ne opisuju precizno intenzivniju podolujnu aktivnost. Koeficijenti korelacije Dst indeksa najmanji su i antikorelirani za sve ispitivane veze te ujedno pokazuju najveće vremenske posmake. Dst indeks je mjera simetrične prstenaste struje, no u fazi razvoja oluje (glavna faza i početak faze oporavka) prstenasta struja izrazito je asimetrična zbog čega Dst ne opisuje dobro intenzivniju olujnu aktivnost, pa su i korelacije Dst indeksa manje. Prema Borovsky & Denton (2006), intenzitet prstenaste struje proporcionalan je velikoj gustoći i nižoj temperaturi sloja plazme te jakosti magnetosferske konvekcije. Iako su gustoće sloja plazme velike tijekom periodičnih oluja, temperature plazme vrlo su visoke, pa olujni proces uzrokovan brzim tokom više doprinosi populaciji čestica radijacijskog pojasa nego prstenastoj struji što se odražava na slabiji intenzitet periodičnih oluja. Uz to, KPI rijetko posjeduju udarne valove na 1 AJ ili

kontinuiranu B_z komponentu što također doprinosi slabijem intenzitetu periodičnih oluja. Iz korelacija geomagnetskih indeksa s parametrima Sunčevog vjetra primjećuje se bolja reakcija Ap indeksa na geomagnetsku aktivnost uzrokovanu brzim tokovima Sunčevog vjetra.

Koeficijenti korelacije V s geomagnetskim indeksima približno su jednaki. Dok je korelacija V -Dst među boljim korelacijama Dst indeksa s parametrima Sunčevog vjetra, korelacije V -AE i V -Ap su među lošijim korelacijama tih indeksa s parametrima. No, izbacivanjem sporih KIM korelacija V -AE postaje jedna od boljih korelacija tog indeksa s parametrima Sunčevog vjetra. Veza V -Dst može se objasniti time što oluja započinje nailaskom KPI, pa se za vrijeme glavne faze oluje (maksimalne negativne vrijednosti Dst) i faze oporavka kroz magnetosferu šire brzi tokovi, koji putem Alfvénovih valova produljuju olujnu aktivnost. Da se brzi tok širi kroz magnetosferu tijekom razvoja oluje vidljivo je iz vremenskog posmaka za najbolju korelaciju koji iznosi 0 dana (maksimum V i minimum Dst su istovremeni). Negativni vremenski posmaci u vezama V -AE i V -Ap (maksimum V kasni za maksimumom AE i Ap) sugeriraju nastanak geomagnetske aktivnosti nailaskom KPI koji dolaze ispred brzih tokova. Dobre korelacije AE indeksa s V posljedica su Alfvénovih valova iz brzih tokova Sunčevog vjetra koji uzrokuju produženu podolujnu aktivnost.

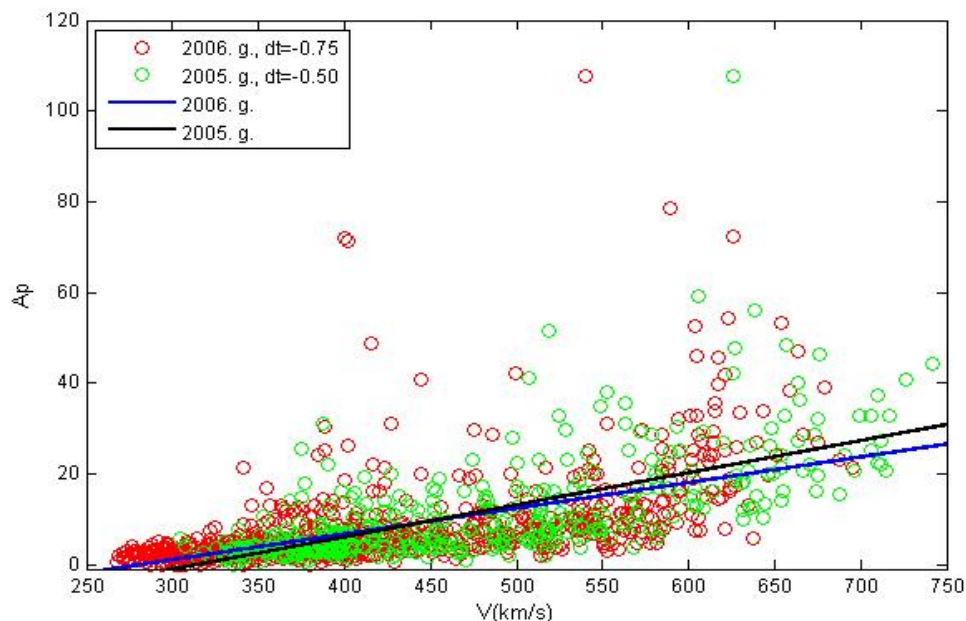
Parametar B najbolje je koreliran s Ap indeksom uz posmak 0.25 dana, budući da komprimirano magnetsko polje na KPI pokreće globalnu geomagnetsku aktivnost koja je na umjerenim širinama opisana Ap indeksom. Slabije korelacije B -Dst posljedica su slabijeg intenziteta periodičnih oluja, jer se dio energije koji ulazi u magnetosferu troši na ubrzavanje plazme koja puni radijacijski pojas (Borovsky & Denton, 2006).

Geomagnetski indeksi najbolje su korelirani s BV^2 i BV parametrima, što ukazuje na važnu ulogu električnog polja Sunčevog vjetra u prijenosu energije Sunčevog vjetra u magnetosferu. Električno polje proporcionalno je brzini prespajanja na dnevnoj strani magnetosfere i važno je za pokretanje magnetosferske konvekcije putem koje se energija prenosi prema ionosferi i unutrašnjoj magnetosferi. Fizikalni mehanizam u vezi BV^2 s geomagnetskim indeksima još nije dovoljno objašnjen. Verbanac et al. (2010) opisuju parametar BV^2 kao umnožak induciranog električnog polja u sloju struja (BV) i brzine plazme koja ulazi u sloj struja (V). Najmanje korelacije geomagnetskih indeksa nađene su

s nV^2 parametrom, dok su korelacije s nBV^2 tek nešto bolje. Ovi rezultati ukazuju na činjenicu da u promatranom razdoblju gustoća Sunčevog vjetra ima najmanji učinak na geomagnetsku aktivnost (parametar BV^2 najbolje je koreliran s geomagnetskim indeksima, a korelacije s nBV^2 parametrom su među najmanjima).

Korelacije nizova iz kojih su izbačeni KIM ne razlikuju se mnogo od korelacija originalnog niza, što znači da u promatranom razdoblju geoeftektivnost KIM nije bila značajna. Može se primijetiti jedino bolja korelacija V s geomagnetskim indeksima, jer su izbačene KIM koje su uzrokovale geomagnetsku aktivnost bile spore.

Usporedba 2005. i 2006. godine. Slika 23. prikazuje graf rasapa Ap indeksa u odnosu na parametar V za 2005. i 2006. godinu na kojem se mogu primijetiti nešto veće brzine Sunčevog vjetra u 2005. godini. Budući da je geoeftektivnost Alfvénovih valova povezana s brzinom Sunčevog vjetra i najveća je kada su brzine Sunčevog vjetra maksimalne (Tsurutani et al., 1994), Ap indeks pokazuje bolju korelaciju s V u 2005. godini. Korelacije parametra B s geomagnetskim indeksima u 2005. godini su znatno manje nego u 2006. godini i uzrok su lošijih korelacija ostalih, kombiniranih parametara s geomagnetskim indeksima, pogotovo parametra B^2V . No, bez obzira na korelacije parametara B i V s geomagnetskim indeksima, kombinacije BV^2 i BV pokazuju dobre korelacije i u 2005. i u 2006. godini te su dobar pokazatelj geoeftektivnosti brzih tokova Sunčevog vjetra. Korelacije CH s geomagnetskim indeksima bolje su u 2005. godini, budući da su brzi tokovi Sunčevog vjetra većih brzina geoeftektivniji, pa su njihova izvorišta (CH) bolje korelirana s geomagnetskom aktivnošću. Veća geoeftektivnost brzih tokova uzrok je i boljih korelacija između geomagnetskih indeksa u 2005. godini. Koeficijenti pravca regresije za 2005. godinu i 2006. godinu istog su reda veličine te za određenu vrijednost parametra Sunčevog vjetra daju slične najvjerojatnije vrijednosti geomagnetskih indeksa (primjer na slici 23).



Slika 23. Graf rasapa V - A_p za vremenski pomaknute nizove V i A_p 2005. godine (zeleni kružić) i 2006. godine (crveni kružić) s naznačenim pravicima regresije.

3.4. Zaključak

Cilj ovog rada bio je utvrditi geoeftektivnost brzih tokova Sunčevog vjetra, tj. naći empirijsku vezu između Sunčevog vjetra i geomagnetske aktivnosti za vrijeme minimuma Sunčeve aktivnosti kada Sunčevim vjetrom dominiraju brzi tokovi. Traženi su parametri Sunčeva vjetra i geomagnetski indeksi koji najbolje opisuju geomagnetsku aktivnost uzrokovanu brzim tokovima i pomoću kojih bi se mogla prognozirati buduća geomagnetska aktivnost. Brzi tokovi izviru iz stabilnih, dugoživećih ekvatorijalnih produžetaka koroninih šupljina koje se mogu zamijetiti tijekom nekoliko Sunčevih rotacija, zbog čega uzrokuju periodičku geomagnetsku aktivnost (svakih 27 dana). Geomagnetska aktivnost je u promatranom periodu bila slabog do umjerenog intenziteta, budući da je jakost polja IMP-a unutar KPI $B < 20$ nT, KPI ne posjeduju udarne valove na 1 AJ, a varijacija brzine tokova brzog vjetra u usporedbi sa sporim vjetrom veća tek za faktor 2 (Bothmer & Daglis, 2007). Fluktuacije magnetskog polja povezane s

Alfvénovim valovima produžuju geomagnetsku aktivnost uzrokovanu brzim tokovima unoseći u magnetosferu dodatnu energiju zbog čega podolujna i olujna aktivnost traju i po nekoliko dana. Iako su oluje uzrokovane brzim tokovima Sunčevog vjetra uglavnom slabog i umjerenog intenziteta, ukupan doprinos geomagnetskoj aktivnosti jednako je važan kao i doprinos KIM jer zbog dužeg trajanja unose usporedivu količinu energije u magnetosferu kao i KIM (Vršnak et al., 2007).

Budući da se u ovom radu tražila veza površina koroninih šupljina (CH) i parametara Sunčevog vjetra s geomagnetskim indeksima pomoću koje bi se moglo predvidjeti nastup i intenzitet geomagnetskih poremećaja, u analizi su korišteni 6-satni srednjaci vrijednosti CH, parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa. Takva rezolucija podataka spada u tzv. olujnu skalu intervala usrednjavanja pomoću koje se filtrira šum iz podataka (promjene vezane uz skalu $< 6h$ kao što su ubrzavanje čestica u Sunčevom vjetru i razvoj podolujnih procesa, te ubrzavanje plazme u magnetosferi). Usrednjavanje na olujnoj vremenskoj skali daje uvid u općenitu zavisnost brzih tokova Sunčeva vjetra i njihovih izvorišta (CH) s geomagnetskom aktivnošću. Iz vrijednosti dijelova površina koroninih šupljina (CH) mjerenih na isječku oko središnjeg meridijana nije vidljiva ukupna površina koroninih šupljina niti njihov broj, no iz podataka brzine Sunčevog vjetra, koji pokazuju tri brza toka po rotaciji može se zaključiti postojanje triju ekvatorijalnih koroninih šupljina koje su prošle kroz središnji meridijan 21 puta i rezultirale u 21 brzi tok Sunčevog vjetra. Dinamika podolujna i oluja opisana je AE i Dst indeksima čija se točnost smanjuje tijekom intenzivnijih geomagnetskih poremećaja. Ograničena mreža mjernih postaja AE indeksa ne mjeri dobro intenzivniju podolujnu aktivnost koja se jačanjem electrojet struja spušta na niže širine u područje mjernih postaja Ap indeksa. Dst indeks je mjera intenziteta simetrične prstenaste struje zbog čega ne prikazuje dobro intenzitet oluja tijekom faze razvoja kada je struja izrazito asimetrična. No usprkos ograničenjima Dst i AE indeksi daju primjeren uvid u geomagnetsku aktivnost slabog do umjerenog intenziteta na nižim i višim širinama kada intenziteti struja nisu toliko izraženi. Ap indeks koji je mjera geomagnetske aktivnosti na umjerenim širinama uzima u obzir utjecaj electrojet i prstenaste struje te ovisno o njihovom intenzitetu jače reagira na podolujnu ili olujnu aktivnost. Zbog toga se iz samog Ap indeksa ne vidi informacija o pojedinačnom doprinosu podolujne i olujne aktivnosti, no iz korelacija AE-Ap i Ap-Dst

vidljiv je veći doprinos podolujne aktivnosti na geomagnetsku aktivnost umjerenih širina tijekom 2006. godine. U promatranom razdoblju javilo se četiri sporih KIM brzina sličnih brzinama ambijentalnog Sunčevog vjetra. Geomagnetska aktivnost bila je slabog do umjerenog intenziteta s osam geomagnetski aktivnih dana ($A_p > 40$). U tom razdoblju javile su se četiri oluje umjerenog intenziteta od kojih su tri bile uzrokovane brzim tokovima, a jedna (232. dana) uzrokovana nailaskom KIM. Od devet oluja slabog intenziteta dvije oluje (124. i 244. dana) uzrokovane su nailaskom KIM.

Za utvrđivanje veze CH i parametara Sunčevog vjetra s geomagnetskim indeksima odabrana je linearna korelacijska analiza koja omogućuje kvalitativnu usporedbu podataka te utvrđuje jakost linearne veze između koreliranih podataka. Podaci su korelirani u vremenu s vremenskim korakom 0.25 dana (6h). Dobiveni su koeficijenti korelacije u ovisnosti o vremenskom posmaku, tj. funkcija korelacije iz koje se očitava vremenski posmak Δt pri kojem postoji najbolja korelacija. Vremenski posmak predstavlja vremenski odgovor magnetosfere na utjecaj Sunčevog vjetra. Analizom je utvrđena vrlo dobra korelacija između parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa, dok su korelacije CH nešto slabije. Praćenjem varijacija geomagnetskih indeksa te vremena odaziva (vremenski posmak) pojedinih indeksa na utjecaj Sunčeva vjetra dobivena je slika razvoja geomagnetske aktivnosti na svim širinama. Brzi tokovi uzrokuju značajnu podolujnu aktivnost (AE) koja se javlja s vremenskim posmakom 0.25 dana, A_p aktivnost javlja se s vremenskim posmakom 0-0.25 dana, dok se olujna aktivnost slabog do umjerenog intenziteta (Dst) javlja u s vremenskim posmakom 0.50 dana. Taj vremenski period odgovara vremenu koje je potrebno da plazma Sunčeva vjetra dođe s dnevne strane preko magnetskog repa do unutrašnje magnetosfere gdje utječe na intenzifikaciju prstenaste struje. Na osnovu rezultata za 2005. i 2006. godinu može se zaključiti da geomagnetski indeks A_p najbolje reagira na brze tokove Sunčevog vjetra, dok su najbolje procjene prijenosa energije Sunčevog vjetra u magnetosferu dane u obliku BV^2 i BV parametara. Električno polje Sunčeva vjetra (BV) ulazi u magnetosferu na dnevnoj strani i pokreće magnetosfersku konvekciju koja je važna za razvoj magnetskih oluja i podoluja, no parametar BV^2 još nije fizikalno objašnjen. Pri opisu veze CH i parametara Sunčevog vjetra s geomagnetskim indeksima izračunati su pravci linearne regresije iz kojih se mogu predvidjeti najvjerojatnije vrijednosti geomagnetskih

indeksa pomoću vrijednosti parametara Sunčevog vjetra. U ovom stupnju razmatranja veza parametara i indeksa nije računata nelinearna veza, iako su između određenih parametara i geomagnetskih indeksa zamijećene nelinearne veze. Pravci linearne regresije dobiveni analizom podataka 2005. i 2006. godine ne pokazuju značajna odstupanja u predviđenim vrijednostima geomagnetskih indeksa te su dobar pokazatelj opće veze parametara i indeksa u padajućoj fazi Sunčeve aktivnosti.

Razumijevanje veze između Sunčevog vjetra i geomagnetske aktivnosti važno je za točno predviđanje geomagnetskih poremećaja koji mogu nanijeti štetu tehnologiji u Zemljinoj orbiti i na površini. Snažne oluje uzrokovane KIM tijekom aktivne faze Sunčevog ciklusa opasnije su za sustave na površini Zemlje (električne mreže, naftovodi), dok brzi tokovi Sunčevog vjetra koji se javljaju tijekom padajuće faze Sunčevog ciklusa uzrokuju tokove energetskih e^- u unutrašnju magnetosferu i oštećuju satelite u geostacionarnoj orbiti (Borovsky & Denton, 2006). Dugovječnost koroninih šupljina i vremenski posmaci najbolje korelacije omogućuju prognozu parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa na udaljenosti 1 AJ 2-3 dana unaprijed.

Prilog

Popis podataka i MATLAB skripti korištenih u analizi podataka. Skripte zajedno s podacima nalaze se na DVD-u.

1. Podaci_2006.list

-podaci 6-satnih vrijednosti površina koroninih šupljina (CH), parametara Sunčevog vjetra (n , V , B) i geomagnetskih indeksa (Dst, AE, Ap) za 2006. godinu.

2. Korelacija.m

-MATLAB skripta koja računa korelacije i vremenski posmak za najbolju korelaciju između geomagnetskih indeksa, CH i geomagnetskih indeksa te parametara Sunčevog vjetra i geomagnetskih indeksa.

3. Regresija.m

- MATLAB skripta koja računa koeficijente i nepouzdanost koeficijenata pravca regresije između vremenski pomaknutih podataka za 2005. i 2006. godinu.

Literatura

Borovsky, J. E., Denton, M. H., (2006), Differences between CME-driven storms and CIR-driven storms, *J. Geophys. Res.*, 111 A07908, doi:10.1029/2005JA011447

Bothmer, V., Daglis, A.D., (2007), *Space Weather: Physics and Effects*. Njemačka: Springer, Praxis Publishing Ltd.

Fares Saba, M. M., Gonzales, W. D., Gonzales, A.L.C., (1997), Relationships between the AE, ap and Dst indices near solar minimum (1974) and at solar maximum (1979), *Ann. Geophys.*, 15, 1265-1270

Finch, I., Lockwood, M., (2007), Solar wind-magnetosphere coupling functions on time-scales of 1 day to 1 year, *Ann. Geophys.* 25, 495-506, [Internet], <raspoloživo na http://www.ann_geophys.net/25/495/2007/>

Gonzales, W. D., Tsurutani B. T., Tang, F., (1996), The Solar and Interplanetary causes of Geomagnetic Activity and Quiet, In: Balasubramaniam, K. S., et al, eds. *Solar drivers of Interplanetary and Terrestrial Disturbances*, ASP Conferences, Series 95

Gopalswamy, N., (2008), Solar connections of geoeffective magnetic structures, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, doi:10.1016/j.jastp.2008.06.010

Kamide, Y., et al., (1997), Current understanding of magnetic storms: Storm/Substorm relationship, *J. Geophys. Res.*, [Internet], <raspoloživo na <http://citeseerx.ist.psu.edu/>>

Lang, K. R., (2009), *The Sun from space*. 2. izdanje, Berlin:Springer

Marsch, E., (2006), Kinetic Physics of the Solar Wind Corona and Solar Wind, *Living Rev.SolarPhys.*, 3, [Internet], <raspoloživo na <http://www.livingreviews.org/lrsp-2006-1>>

McPheron, R. L. (2010), Geomagnetic field. In: Enciclopaedia Britannica, [Internet], <raspoloživo na <http://www.britanica.com/EBchecked/topic/229754/geomagneticfield>>

Nandy, D., (2009), Outstanding Issues in Solar Dynamo Theory, In: Hasan, S. S., Rutten, R. J, eds. *Magnetic coupling between the Interior and Atmosphere of the Sun*, Astrophysics and Space Science Proceedings, Springer-Verlag, Heidelberg, Berlin

Pulkkinen, T., (2007), Space Weather: The Terrestrial Perspective, *Living Rev. Solar Phys.*, 4, [Internet], <raspoloživo na <http://www.livingreviews.org/lrsp-2007-1>>

Rasihkangas, R., (1998), *Oulu Space Physics textbook*, [Internet], <raspoloživo na <http://magbase.rssi.ru/REFMAN/SPPHTEXT.html>>

Schwenn, R., (2006), Space Weather: The Solar Perspective, *Living Rev. Solar Phys.*, 2, [Internet], <raspoloživo na <http://www.livingreviews.org/lrsp-2006-2>>

Stern, D.P., (2008), *Exploration of the Earth's magnetosphere*, [Internet], <raspoloživo na <http://www.phy6.org/Education>>

Tsurutani, B. T., et al., (1994), Do Coronal Holes Cause 27 Day Recurring Geomagnetic Storms?, [Internet], <raspoloživo na <http://hdl.handle.net/2014/32650>>

Tsurutani, B. T., et al., (1995), Interplanetary origin of geomagnetic activity in the declining phase of Solar cycle, [Internet], <raspoloživo na <http://hdl.handle.net/2014/32202>>

Verbanac, G., Vršnak, B., Veronig, A., Temmer, M., (2010), Equatorial coronal holes, Solar wind high-speed streams and their geoeffectiveness, *Astronomy and Astrophysics*, u postopku objave

Vršnak, B., Temmer, M., Veronig, A. M., (2007), Coronal Holes and Solar Wind High-Speed streams: I Forecasting the Solar Wind Parameters, *Sol. Phys.*, 240: 315-330 doi: 10.1007/s110207-007-0285-8

Vršnak, B., Temmer, M., Veronig, A. M., (2007), Coronal Holes and Solar Wind High-Speed streams: II Forecasting the Geomagnetic Effects, *Sol. Phys.*, 240: 331-346, doi:10.1007/s110207-007-0311-x

Vujnović, V., (1994), *Astronomija 2.*, 2. izdanje, Zagreb: Školska Knjiga

Watari, S., (1997), The effect of the high-speed stream following the corotating interaction region on geomagnetic activities, *Ann. Geophys.*, 15, 662-670

National Aeronautics and Space Administration, <<http://solarscience.msfc.nasa.gov>>

Wikipedia, <<http://www.wikipedia.org/wiki/Sun>>

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto,
<<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/dst/dir/onDst/index.html>>

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto,
<<http://wdc.kugi.kyoto-u.ac.jp/aedir/onAE/index.html>>

World Data Center for Geomagnetism, Kyoto,
<http://www-app-3.gfz-postdam.de/kp_index/description.html>

