

# DOLOČITEV LOKALNEGA GEOMAGNETNEGA INDEKSA K

# DETERMINATION OF LOCAL GEOMAGNETIC K-INDEX

Rudi Čop, Damir Deželjin, Robert De Reggi

UDK: 550.38  
Klasifikacija prispevka po COBISS.SI: 1.01  
Prispelo: 5. 5. 2015  
Sprejeto: 9. 10. 2015

DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.697-708  
SCIENTIFIC ARTICLE  
Received: 5. 5. 2015  
Accepted: 9. 10. 2015

## IZVLEČEK

V članku opisujemo izhodišča za oblikovanje geomagnetnega indeksa **K**, ki ga mednarodna organizacija IAGA (International Association for Geomagnetism and Aeronomy) priporoča za vsakodnevno opisovanje aktivnosti zemeljskega magnetnega polja. Indeks določamo na podlagi zveznih meritev na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje. Meritve smo začeli izvajati v slovenskem delu Istre, kar nam omogoča tudi izračunavanje lokalnega geomagnetnega indeksa **K** za Slovenijo. V Razpravi in zaključkih predstavljamo slabosti indeksa in svoje videnje nadaljnega dela na tem področju.

## ABSTRACT

In this article, we present the origin of geomagnetic **K**-index. The International Association for Geomagnetism and Aeronomy (IAGA) recommends it for daily descriptions of geomagnetic field activity. The index is based on continuous measurements in a geomagnetic observatory on the Earth's surface. We carried out measurements in Slovene Istria, which enabled us to calculate the local geomagnetic index for Slovenia. In Discussion and Conclusions, we also present some drawbacks of the index and plans for our future activities in this field.

## KLJUČNE BESEDE

geomagnetni indeks **K**, geomagnetno miren dan, geomagnetna nevihta

## KEY WORDS

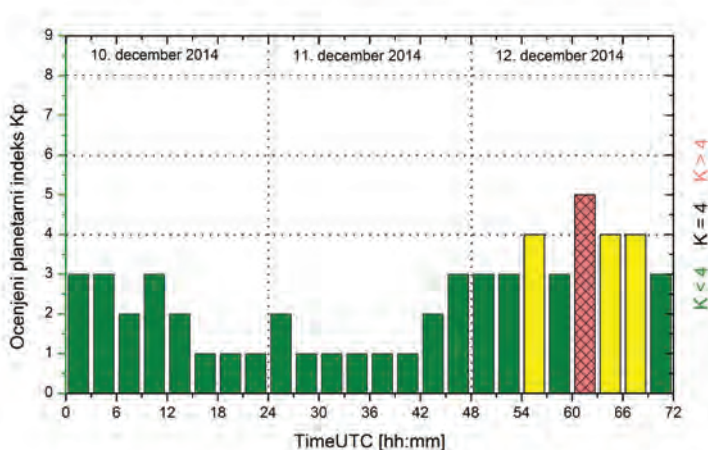
geomagnetic **K**-index, solar quiet day, geomagnetic storm

## 1 GEOMAGNETNI INDEKSI

V geomagnetizmu, delu geofizike, se različni geomagnetni indeksi uporabljajo rutinsko. Z njimi spremljamo razmere v zgornjih plasteh atmosfere in medplanetarnem prostoru v bližini Zemlje, ugotavljamo indukcijo v zemeljski skorji in plašču ter proučujemo razmere v tekoči sredici Zemlje in njenem trdem jedru (Love in Remick, 2007; Chapman in Price, 2007). V zadnjih desetih letih je med temi raziskavami dobila svoje mesto tudi klimatologija (Greiner-Mai in Jochmann, 1995; Marsh in Svensmark, 2000; Christiansen, Haigh in Lundstedt, 2007). Mnogo sodobnih tehnologij je namreč odvisnih od stanja v magnetosferi, ionosferi in zemeljski skorji. Pri tem so povezave med magnetosfero, ionosfero in zemeljsko skorjo nelinearne in še ne dovolj raziskane tudi zaradi časovno prekratkih meritev glede na dolžino sončnih ciklov (Rangarajan in Barreto, 2000; Saiz et al, 2013).

Od leta 1868 se neprekinjeno izračunava geomagnetni indeks **aa**. Ta spada med tiste nabore podatkov v geofiziki, ki segajo najdlje v preteklost. Izračunava se na podlagi meritev dveh antipodnih geomagnetnih observatorijev, enega v Angliji in drugega v Avstraliji, ter je podoben planetarnemu geomagnetnemu indeksu **Kp**. Indeks **Kp** je srednja vrednost lokalnih geomagnetnih indeksov **K**, določenih na podlagi meritev na trinajstih referenčnih geomagnetnih observatorijih srednjih geografskih širin na severni in južni polobli.

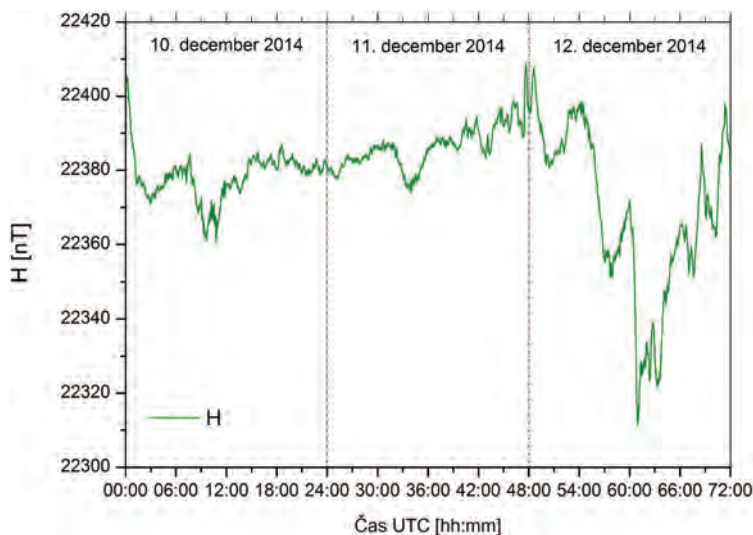
Planetarni geomagnetni indeks **Kp** je danes izhodiščni indeks v geomagnetizmu in aeronomiji, znanosti o zgornjih plasteh atmosfere (slika 1). Njegova vrednost se ocenjuje in nato tudi postprocesira na podlagi meritev na izbranih referenčnih geomagnetnih observatorijih. Poleg stanja celotnega zemeljskega magnetnega polja za širše območje dobro predstavlja tudi razmere v ionosferi.



Slika 1: Ocena planetarnega geomagnetnega indeksa **Kp**. Dvema mirna dnevoma s **Kp**  $\leq 3$  sledi tretji z geomagnetno nevihto najnižje stopnje **Kp** = 5 (G1, Minor) (NOAA/SWPC, 2014).

Ionosfera ni posebna plast zemeljske atmosfere, temveč so to plasti v njej, od katerih se odbijajo radijski valovi in ki spreminjajo lastnosti v posameznem dnevu in letnih časih (AFGL, 1985; Anderson in Fuller-Rowell, 1999). Zaradi ionizirajočega sevanja Sonca, ki razstavlja molekule zraka pri ustrezno nizkem zračnem tlaku, ionosfero sestavlja hladna plazma. Njena količina se poveča ob izbruhu na Soncu, ko se

poveča sevanje ultravijoličnih žarkov, žarkov X in kozmičnih žarkov. Nastane nevihta v ionosferi (angl.: ionospheric storm), zaradi katere se spremeni lomni količnik mikrovalov in poveča odboj radijskih valov. Zaradi naelektrenih delcev v ionosferi nastajajo v zgornjih plasteh atmosfere električni tokovi, ki vplivajo tudi na magnetno polje Zemlje. Za opis razmer v ionosferi na ožjem območju je bolj kot planetarni geomagnetni indeks **K<sub>p</sub>** primeren lokalni indeks **K** z najbližjega geomagnetnega observatorija.



Slika 2: Horizontalna komponenta zemeljskega magnetnega polja H [nT], izmerjena na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran) v treh zaporednih dnevih.

Geomagnetni indeks **K** (karakter; nem.: Kennziffer) je v začetku tridesetih let prejšnjega stoletja razvil Julius Bartels (Rangarajan, 1989; Bartels, Heck in Johnston, 1940) z namenom, da bi dobil objektivnejši način vrednotenja necikličnih sprememb zemeljskega magnetnega polja. Svoje pionirsko delo je Bartels opravil v geomagnetnem observatoriju Niemegek (NGK) v Nemčiji, ki je danes eden od referenčnih geomagnetnih observatorijev. Indeks **K** je bil predlagan za splošno uporabo leta 1939 na konferenci predhodnice današnje mednarodne organizacije IAGA v Washingtonu (ZDA). Danes se indeks vsak dan izračunava v sodobnih geomagnetnih observatorijih. Je eden od osnovnih produktov posameznega geomagnetnega observatorija, ki zamenjuje obsežne tabele in grafe meritev ter poenostavlja sicer zahtevne primerjave meritev med observatoriji.

## 2 SPREMEMBE ZEMELJSKEGA MAGNETNEGA POLJA V GEOMAGNETNO MIRNIH DNEH

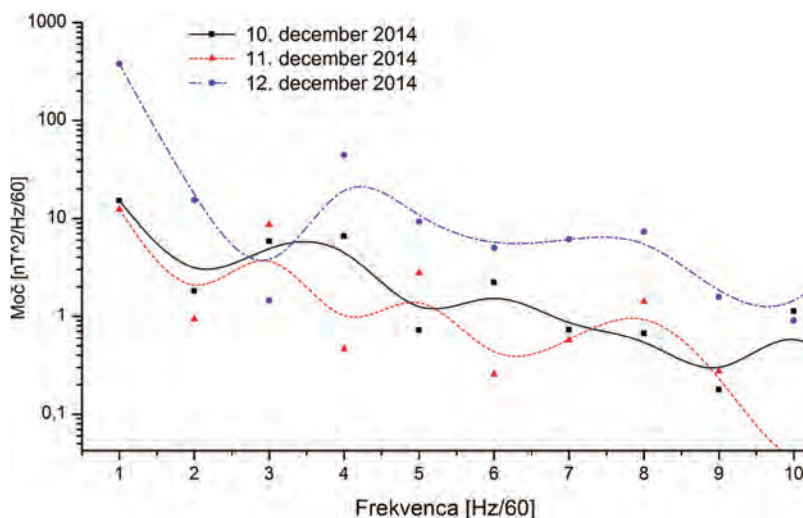
Za vse magnetograme magnetno mirnih dni, izmerjenih na istem mestu, je značilno, da so si med seboj podobni (slika 2). V posameznem letnem času se spreminjajo le po amplitudi (Campbell, 1989). Na geomagnetno polje v geomagnetno mirnih dneh vplivajo:

- električni in zračni tokovi v ionosferi;
- sončni mrki in izbruhi na Soncu;
- lunine mene;
- prevodnost zemeljske skorje.

Primerjave med magnetogrami geomagnetno mirnih dni in dni z geomagnetno nevihto pri slednjih kažejo na večjo prisotnost visokofrekvenčnih sprememb (slika 3).

Geomagnetno miren dan Sq (angl.: solar quiet) je določen s spremembo zemeljskega magnetnega polja, merjenega z magnetometri v dneh brez izrednih sončnih motenj, od katere je odštet vpliv Lune. Najpogosteje se obravnava pet ali osem najbolj mirnih dni v mesecu, v katerih je bil planetarni geomagnetni indeks **Kp** pod izbrano nizko vrednostjo.

Največji vpliv na zemeljsko magnetno polje v geomagnetno mirnih dneh imajo električni tokovi v ionosferi. Ionizirani delci v zgornjih plasteh atmosfere nastajajo zaradi ionizirajočega sevanja Sonca in kozmičnih žarkov. Horizontalni vetrovi v ionosferi jih raznašajo vzdolž silnic zemeljskega magnetnega polja. Delovanje tega električnega dinamika v ionosferi je vse leto predvsem pod vplivom spremembe sončnega sevanja v posameznem dnevu. Stopnjo ionizacije v ionosferi za krajši čas in manj spremenijo sončni mrki in kratkotrajni bliski v sončnih pegah. Na razmere v ionosferi pa vplivajo tudi lunine mene (Lindzen in Chapman, 1969). Njihov vpliv je relativno majhen in se obravnava v daljšem časovnem obdobju na podlagi harmonske analize. Enako lahko iz meritev spremembe geomagnetnega polja izločimo vplive prehodov vremenskih front (Čop, 2015).



Slika 3: Frekvenčna analiza spremembe zemeljskega magnetnega polja, izmerjene na geomagnetnem observatoriju PIA (Piran) v treh zaporednih dnevih.

Na podlagi sferne harmonične analize zemeljskega magnetnega polja v geomagnetno mirnih dnevih na celotni zemeljski obli je bilo ugotovljeno, da se Zemlja ne vede kot enovit električni prevodnik. Notranje zemeljske plasti prevajajo bolje kot pa zunanja skorja (Dobrica et al., 2012; Čop et al., 2008). Na magnetogram geomagnetno mirnega dne torej vplivajo tudi geološke lastnosti območja, na katerem je bil magnetogram izmerjen.

Število geomagnetno mirnih dni (Sq) upada s številom sončnih peg v letu. Leto največje geomagnetne aktivnosti običajno zaostaja za dve ali tri leta za letom z največjo Sončevo aktivnostjo, najbolj geomagnetno mirna leta pa zaostajajo leto ali dve za minimumom v ciklu sončnih peg. V obdobju od 1932 do 1984.

je bilo v geomagnetno mirnih letih od 71 % do 86 % dni v letu s planetarnim geomagnetnim indeksom  $K_p \leq 3$ , v geomagnetno aktivnih letih pa od 47 % do 57 % (Campbell, 1989).

V geomagnetno mirnih dneh ( $S_q$ ) se zaradi zelo majhne aktivnosti Sonca poveča vpliv sevanja kozmičnih žarkov iz celotnega vesolja na Zemljo (angl.: Forbush decrease). Učinki kozmičnih žarkov na ionosfero so lahko tudi manjših razsežnosti, obsegajo le nekaj kilometrov in trajajo manj kot eno uro (Parnahaj, Kudela in Kancirova, 2008).

### 3 VPLIV AKTIVNOSTI SONCA NA ZEMELJSKO MAGNETNO POLJE

Na geomagnetno polje in s tem tudi na plasti zraka na Zemlji vpliva sončni veter, ki izhaja iz zunanjih plasti Sonca. Njegova najbolj pogosta hitrost je med 300 in 800 km/s. To je tok naelektrenih elementarnih delcev, ki v obliki električno nevtralne plazme iz Sončevih zunanjih plasti potuje po celotnem osončju. Pri tem zadene tudi Zemljo. Sestavljajo ga: a) stalni tok spremenljive hitrosti, ki izhaja iz tokovnic kromosfere; b) povečan tok, ki izhaja iz lukenj v koroni Sonca, in c) impulzi ob izbruhih CME (angl.: coronal mass ejection). Slednji izvirajo v globljih plasteh Sonca in jih lahko spremljajo tudi bliski v sončnih pegah (Lockwood, 2013). Izbruhi v koroni Sonca CME so najpogostejši vzrok za nastanek geomagnetnih neviht in tudi izvor sevanja elementarnih delcev velikih energij SEP (angl.: solar energetic particles).

V 60. letih prejšnjega stoletja je bil potrjen obstoj območij M na Soncu, iz katerih izhaja sončni veter večjih gostot in hitrosti (Billings in Roberts, 1964; Svalgaard, 1977). To so luknje v koroni Sonca, ki so jih zaznali s teleskopi na žarke X, nameščenimi na umetnih satelitih. S tem odkritjem je bila pojasnjena časovna razlika med ciklom sončnih peg in ciklom geomagnetnih neviht.

Razmere v osončju (angl.: space weather) najbolj določa Sonce s svojo dejavnostjo. Izbruhi na vidni strani sončnega diska vplivajo na Zemljo, na njeno magnetosfero, atmosfero in biosfero, v treh časovnih zaporedjih (APL, 1997; Langhoff in Straume, 2012):

1. Radiacija elektromagnetnih valov, ki Zemljo doseže v osmih minutah po izbruhu na Soncu in se po osončju širi s svetlobno hitrostjo. Na ionosfero vpliva predvsem povečano sevanje ionizirajočih žarkov X, ki spremeni refrakcijo mikrovalov v njej in s tem vpliva na satelitske navigacijske sisteme. Poveča se absorpcija radijskih valov visokih frekvenc, zaradi česar se prekinjajo brezžične komunikacijske povezave.
2. Povečani emisiji elektromagnetnih valov s Sonca sledijo naelektreni elementarni delci SEP z energijami nad 1 MeV. Zemljo dosežejo v 10 do 30 minutah in najbolj vplivajo na delovanje sodobnih elektronskih naprav ter na biosfero.
3. Če je izbruh na Soncu v bližini osrednjega solarnege meridiana glede na Zemljo, doseže naš planet v 18 do 96 urah tudi sončni veter zelo povečane hitrosti in gostote. Začenja se geomagnetna nevihta ter spremembe v celotni atmosferi in zemeljski skorji. Opaženi so vplivi na delovanje umetnih satelitov, elektroenergetskih sistemov, globokomorskih komunikacijskih kablov, naftovodov in plinovodov.

Veliko meritev, opravljenih z umetnimi sateliti, potrjuje, da geomagnetne nevihte povzročajo izbruhi v koroni Sonca CME pri usmeritvi komponente medplanetarnega magnetnega polja Bz proti jugu (Nikolaeva, Yermolaev in Lodkina, 2011). Takrat se silnice medplanetarnega in zemeljskega magnetnega

polja tako prepletejo, da se geomagnetno polje delno odpre in skozi to razpoko vdre sončni veter, ki razburka magnetosfero.

#### 4 GEOMAGNETNI INDEKS $K$

Meritve sprememb zemeljskega magnetnega polja na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje so meritve aktivnosti električnih tokov v ionosferi in magnetosferi ter motenj, ki jih ti tokovi povzročajo (Jankowski in Sucksdorff, 1996; Love, 2008). Iz teh meritev izhaja indeks geomagnetne aktivnosti  $K$ , ki sloni na skalarni matriki, s katero se popisuje velikost odstopanja od srednjega geomagnetno mirnega dne (Mayaud, 1980).

Za izračunavanje geomagnetnega indeksa  $K$  je Julius Bartels izbral triurni interval v času UTC (Coordinated Universal Time; Rangarajan, 1989). Tak interval se je izkazal za primernegega, ker so v njem zajete geomagnetne motnje, ki trajajo od ene do dveh ur, in je dovolj kratek, da se z njim dobro ločita dva zaporedna dogodka, nastala v dnevu (slika 1). Po klasičnem postopku so se iz dnevnega diagrama najprej izločile vse variacije, ki ne prispevajo k indeksu  $K$ . Dnevna variacija geomagnetno mirnega dne, vpliv lune in efekt umirjanja po izteku geomagnetnih neviht so se izločevali v časovnem prostoru. Tako pripravljenemu triurnemu delu magnetograma se je odmerila vertikalna razdalja med dvema gladkima krivuljama. Na obravnavani del magnetograma sta bili prislonjeni s spodnje in zgornje strani. Največja vertikalna razdalja med tema gladkima krivuljama je pomenila vrednost geomagnetnega indeksa  $K$  za obravnavano triurno obdobje. Prislonjeni krivulji sta bili prilagojeni vsakokratni obliki triurnega dela magnetograma in torej nista bili monotono določeni za vse primere.

Pri nekaterih sodobnih računalniških metodah določevanja geomagnetnega indeksa  $K$  se izločajo variacije, ki ne prispevajo k indeksu  $K$ , v frekvenčnem prostoru. Ker je postopek za določanje tega indeksa zahteven, je bilo predlaganih kar nekaj poenostavitev, a če bi jih upoštevali, to ne bi bil več geomagnetni indeks  $K$ , ki se uporablja že od začetka štiridesetih let prejšnjega stoletja.

Geomagnetni indeks  $K$  se je najprej določal iz vseh treh komponent zemeljskega magnetnega polja. Od začetka šestdesetih let prejšnjega stoletja pa se določa tudi samo iz obeh horizontalnih komponent. Komponenta  $Z$  je namreč najbolj pod vplivom nenaravnih motenj zemeljskega magnetnega polja.

Za posamezen observatorij mora biti skala geomagnetnega indeksa  $K$  standardizirana za vedno. Primerljiva mora biti s skalo indeksa  $K$  referenčnega geomagnetnega observatorija Niemegek (NGK). V dovolj dolgem časovnem obdobju mora biti na obeh observatorijih doseženo približno enako število indeksov  $K$  z enako vrednostjo. Stopnje v logaritmični skali geomagnetnega indeksa  $K$  odražajo velikost motenj. Te motnje se od najnižje stopnje  $K = 0$  do najvišje stopnje  $K = 9$  po magnitudi med seboj razlikujejo za velikostni razred sto.

Natančno izločanje cikličnih vplivov na spremembo geomagnetnega polja vpliva na točnost določitve indeksa  $K$ . Vsakodnevne spremembe geomagnetno mirnih dni ( $S_q$ ) je težko določiti vnaprej. Z izkušnjami in poznavanjem magnetogramov geomagnetno mirnih dni v različnih letnih časih pa se da indeks  $K$  določiti precej objektivno. Razlika v odmeri indeksa  $K$  dveh dobro izurjenih merilcev na istem analognem magnetogramu ne presega 20 % in tako rekoč nikoli ne prekorači ene stopnje na skali tega indeksa. Prav za toliko se ti indeksi med seboj razlikujejo, če so določeni na podlagi digitalnih meritev in z ustreznimi namenskimi programskimi orodji.

## 5 GEOMAGNETNE MERITVE NA OZEMLJU SLOVENIJE

Geomagnetni observatorij je referenčno mesto za geomagnetne meritve na ozemlju, ki ga tak observatorij pokriva. Zato mora biti postavljen na skrbno izbranem kraju, ki ustreza tudi mednarodnim priporočilom (Jankowski in Sucksdorff, 1996). Običajno je izbrani kraj kompromisna rešitev med priporočili in danimi možnostmi. Za vključitev v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET (INTERnational Real-time MAGnetic observatory NETwork) mora biti observatorij tudi opremljen po ustreznih priporočilih. Ravno mednarodna povezava mu daje veljavo, saj omogoča mednarodno sodelovanje, preverjanje merilnih rezultatov in pomeni tudi priznanje, da je primeren za opravljanje geomagnetnih meritev.

Osnovni merilni instrument na geomagnetnem observatoriju, katerega meritve se uporabljajo za izračunavanje geomagnetnega indeksa  $\mathbf{K}$ , je triosni magnetometer. Z njim je mogoče meriti spremembo vrednosti komponent zemeljskega magnetnega polja v smeri X (geografski sever), Y (vzhod) in Z (nadir) ali spremembo kotov D (magnetna deklinacija) in I (magnetna inklinacija) ter obenem spremembo absolutne vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja  $\mathbf{F}$  ali vsaj eno od njegovih komponent. Tak magnetometer je po konstrukciji lahko triosni magnetometer fluksgate (angl.: fluxgate magnetometer) ali pa protonski vektorski magnetometer (angl.: proton vector magnetometer), ki je novejšega nastanka (Marsal et al., 2013). Instrument mora zadoščati najmanj mednarodnim priporočilom za instrumente, ki se uporabljajo na geomagnetnih observatorijih: merilno območje  $\pm 60000$  nT, ločljivost 0,1 nT, linearnost  $\leq 0,1\%$ , časovno lezenje  $\pm 2$  nT/dan in temperaturno lezenje  $\leq 0,2$  nT/°C (Korepanov, 2006).

Sistematično iskanje primerne kraja za izhodiščne meritve zemeljskega magnetnega polja na ozemlju Slovenije smo začeli v letu 2007 (Paliska, Čop in Fabjan, 2010; Čop, 2011). Poleg mednarodnih priporočil smo upoštevali geološke, seizmološke in hidrološke posebnosti našega ozemlja. V naših razmerah tak observatorij še dodatno ogrožajo vandalizem, gozdni požari in atmosferske prenapetosti (Čop et al., 2014). V februarju 2014 smo pri vasi Sv. Peter nad Sečovljami začeli priprave za postavitve observatorija Sikuri. V vozlišče INTERMAGNET v Edinburgu je bil vključen v prvi polovici decembra 2014 kot testni observatorij (TEST Observatory) s kodo IAGA: PIA (Piran, Slovenia). V testnem obdobju morajo osebje observatorija ter njegova merilna in komunikacijska oprema dokazati, da ustrezajo vsem mednarodnim priporočilom.

## 6 DOLOČITEV SKALE LOKALNEGA GEOMAGNETNEGA INDEKSA $\mathbf{K}$

Skala geomagnetnega indeksa  $\mathbf{K}$  je določena na podlagi meritev komponent zemeljskega magnetnega polja v triurnih časovnih intervalih (Rangarajan, 1989). Indeks  $\mathbf{K}$  je neimenovano število: od 0 za najbolj miren dan do 5, ko nastopa najmilejša oblika geomagnetne nevihte, pa vse do 9 za opis razmer, ko je zemeljsko magnetno polje najbolj razburkano. Jakost geomagnetnih neviht narašča od geomagnetnega ekvatorja proti območjema polarnih sivev. Zato ima vsak observatorij svojo skalo indeksa  $\mathbf{K}$ .

Skala indeksa  $\mathbf{K}$  je logaritmične oblike, zato zadostuje, da se za nov observatorij najprej določi najmanjša vrednost geomagnetne motnje pri največjem indeksu  $\mathbf{K} = 9$  (Love, 2011). Vse ostale največje vrednosti za nižje stopnje indeksa  $\mathbf{K}$  se nato določijo iz razmerja, podanega v enačbi (1). V enačbi so indeksi  $\mathbf{K}_i^{\text{NGK}}$  geomagnetni indeksi posamezne stopnje  $i$  na skali referenčnega observatorija NGK, indeksi  $\mathbf{K}_i^{\text{PIA}}$  pa indeksi skale našega geomagnetnega observatorija PIA.

$$K_{\max,i}^{PIA} = K_{\max,i}^{NGK} (K_9^{PIA} / K_9^{NGK}) \quad i = 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8. \quad (1)$$

Končna oblika skale indeksa **K** novega geomagnetnega observatorija se določi na podlagi večletnih meritev in glede na skalo referenčnega observatorija NGK. Praktično pa se poleg magnetne širine tega observatorija upoštevajo še pričakovane največje geomagnetne motnje. Te so določene na podlagi statistične analize do sedaj registriranih dogodkov z ekstremnimi vrednostmi (Thomson, Dawson in Reay, 2011). Pomembno izhodišče pri določevanju najmanjše vrednosti amplitude pri največjem indeksu **K** = 9 so tudi že postavljene lestvice indeksa **K** na okoliških geomagnetnih observatorijih (Stankov, Stegen in Warnant, 2010; Mihajlović, 2010).

Vrednosti indeksov geomagnetne aktivnosti **K** so v dobi analognih instrumentov odmerjali ročno (Mayaud, 1980), danes pa se računajo s posebnimi računalniškimi programi (Bernard, Menvielle in Chambodut, 2011). Ti so lahko razširjeni tudi na nadzor vhodnih podatkov in ovrednotenje končnih rezultatov (Stankov, Stegen in Warnant, 2010). Za določanje indeksa **K** z računalnikom so razvili več algoritmov, ki se delijo v štiri skupine: 1) regresija nad pomičnimi časovnimi okni; 2) regresija z dodatnimi obtežitvami; 3) frekvenčno filtriranje magnetogramov in 4) dekompozicija na podlagi ortogonalnih vektorjev. Med vsemi metodami sta se na podlagi testiranja na ISGI (angl. International Service of Geomagnetic Indices) izkazali dve: metoda FMI (Finnish Meteorological Institute) (Bitterly et al., 1997) in metoda ASm (Adaptive Smoothing method) (Nowozynski, Ernst in Jankowski, 1991). Med seboj se razlikujeta po načinu določanja krivulje Sq za obravnavani dan. Metoda FMI spada v prvo skupino računalniških algoritmov, metoda ASm pa v drugo. Obe sta simulaciji ročnega odmerjanja vrednosti geomagnetnega indeksa **K** in sta uporabni na vseh geomagnetnih observatorijih. Njuni rezultati računanja indeksa **K** so v povprečju enaki referenčnim rezultatom, doseženim z odmerjanjem po tradicionalni metodi ročnega določanja indeksa **K** v 75 % do 84 % primerov. Možnost, da bo razlika več kot eno stopnjo v lestvici indeksa **K**, je manj kot 1 % (Menvielle et al., 1995).

## 7 IZRAČUN LOKALNEGA GEOMAGNETNEGA INDEKSA K PO METODI ASM

Po metodi ASm je krivulja Sq izločena na podlagi najmanjših kvadratov iz enominutnih podatkov. Za vsako uro je izračunana razlika med najmanjšo in največjo vrednostjo, te vrednosti se nato izločijo. Z omejitvami drugega odvoda in dodatnimi obtežitvami se poudari vpliv mirnih obdobij in zadušni vpliv motenj. Krivulja Sq je določena z minimizacijo izraza (2). Vhodni podatki so enominutne vrednosti  $x = (x_1, \dots, x_n)$ , izhodni pa  $y = (y_1, \dots, y_n)$ , ki predstavljajo vrednosti krivulje Sq.

$$\min_{y_1, \dots, y_n} \left[ \sum_{i=1}^n \lambda_i^2 (y_i - x_i)^2 + \sum_{i=2}^{n-1} \delta^2 \left( \frac{y_{i+1} - 2y_i + y_{i-1}}{h} \right)^2 \right] \quad (2)$$

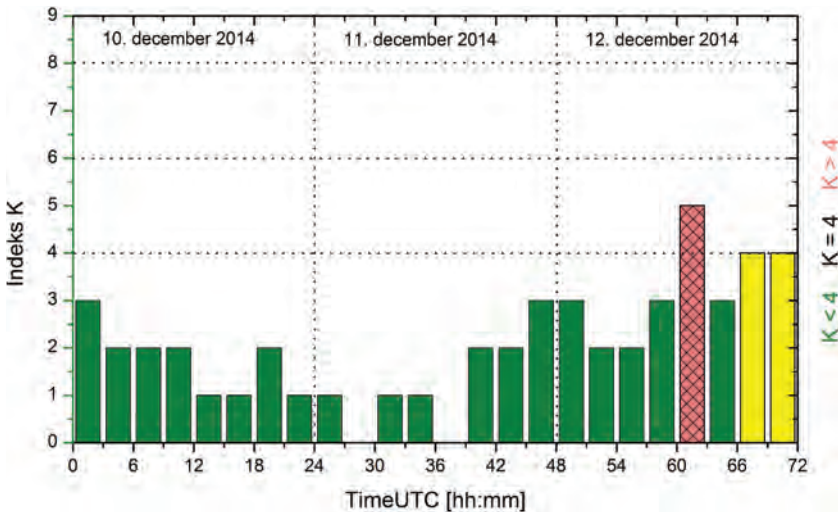
V izrazu, iz katerega se izračunajo z minimizacijo vrednosti krivulje Sq, je  $\delta$  faktor ukrivljenosti zglajene krivulje,  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_n)$  so koeficienti obtežitve. S koeficientom  $h$  je opisana lastnost posameznega observatorija, ki se neposredno vključi v faktor  $\delta$ . V drugem koraku je ponovljen postopek predhodnega koraka s faktorjem ukrivljenosti  $\delta_j$  in na novo določenimi utežmi  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{2d})$ . Tako  $\delta_j$  kot  $\lambda = (\lambda_1, \dots, \lambda_{2d})$  za drugi korak so parametri, ki se določajo za vsak observatorij posebej.

Za popoln opis stanja geomagnetnega polja v enem dnevu je treba določiti osem geomagnetnih indeksov **K**. Za tri zaporedne dneve smo po metodi ASm izračunali vrednosti lokalnih geomagnetnih indeksov **K** za Slovenijo (slika 4). Osnova za ta izračun so bile enominutne srednje vrednosti spremembe zemeljske-



ga magnetnega polja, izmerjene na observatoriju PIA za vsak tekoči, vsak predhodni in vsak naslednji dan. Uporabili smo tudi že predhodno določeno lestvico indeksa **K** za ta observatorij. Primerjava med vrednostmi indeksov **K** za tri zaporedne dneve za Slovenijo (slika 4) z vrednostmi planetarnih geomagnetnih indeksov **K<sub>p</sub>** za isto obdobje (slika 1) kaže razliko med učinkom sončnega vetra na območje, ki ga pokriva observatorij PIA, in na celoten planet Zemlja.

Izhodiščno vrednost **K<sub>0</sub>** za geomagnetni observatorij PIA smo najprej določili s sferno trigonometrijo iz izhodiščne vrednosti geomagnetnega observatorija NGK. Na območju s polmerom 580 kilometrov od observatorija PIA smo našli devet geomagnetnih observatorijev, ki opravljajo ustrezne meritve za izračun geomagnetnega indeksa **K**. Izhodiščne vrednosti **K<sub>0</sub>** šestih od njih smo uporabili kot drugi približek te vrednosti za geomagnetni observatorij PIA. Pričakujemo, da bo tako določena vrednost obveljala tudi po končanem testnem obdobju tega observatorija.



Slika 4: Vrednosti geomagnetnega indeksa **K** za Slovenijo za tri zaporedne dneve, izračunane na podlagi meritev spremembe zemeljskega magnetnega polja na geomagnetnem observatoriju PIA.

## 8 RAZPRAVA IN ZAKLJUČKI

Osnovna slabost indeksa **K** je določanje geomagnetno mirnega dne (**S<sub>q</sub>**), ki ni monotono. Magnetogrami geomagnetno mirnih dni so si sicer med seboj podobni, ne pa tudi enaki. Razlika je lahko tolikšna, da povzroči preskok indeksa **K** za eno stopnjo, kar pa je zelo redko. Pri klasičnem določanju tega indeksa se z večjo izurjenostjo operaterjev v geomagnetnem observatoriju ta pogrešek zelo zmanjša, enako velja za večanje jakosti geomagnetnih neviht. Naslednja slabost indeksa je, da lahko en sam impulz v magnetogramu sicer geomagnetno mirnega dne povzroči nesorazmerno visoko stopnjo geomagnetnega indeksa **K**. V praksi pa je pojav enega samega impulza brez dodatnih motenj zelo redek, zato taki pojavi ne zmanjšujejo uporabnosti geomagnetnega indeksa **K**.

Indeks **K** vključuje vse motnje zemeljskega magnetnega polja, ki niso periodičnega značaja. Mednje spadajo tudi motnje, nastale zaradi ionizirajočega sevanja Sonca ob izbruhih na njem. Iz geomagnetnega

indeksa **K** se lahko določi hitrost sončnega vetra (Achem, Rabiou in Onimisi, 2013; Wing et al., 2005), še natančneje pa je to mogoče storiti z dodatnim merjenjem impulzov geomagnetnega polja s periodami med 0,2 sekunde in 600 sekundami (Russell, 1991; Xu, Gannon in Rigler, 2013). Poznavanje teh impulzov v magnetosferi bi nam omogočilo boljše poznavanje razmer tako v magnetosferi kot tudi v ionosferi.

Na podlagi znanega sedanjega lokalnega geomagnetnega indeksa **K** je mogoče napovedati tudi njegove prihodnje vrednosti. Dolgoročne napovedi slonijo na 27-dnevni periodični rotaciji Sonca. Točnejše so kratkoročne napovedi, ki so lahko 72-odstotno zanesljive pri odstopanju napovedanega indeksa za eno stopnjo od dejanskega (Viljanen, Pulkkinen in Pirjola, 2008). Iz merilnih podatkov observatorija na površini Zemlje je namreč zelo težko napovedati pojav zelo velikih geomagnetnih neviht, zaradi česar se zmanjšuje zanesljivost napovedi. Ker so uporabljene statistične napovedi, je pri tem pomembna tudi tradicija geomagnetnega observatorija. Ta zagotavlja zanesljivejšje napovedi za uporabnike satelitskih navigacijskih in komunikacijskih sistemov, uporabnike brezžičnih komunikacij in upravljavcev elektroenergetskih sistemov na zemeljski površini ter upravljavcev satelitov v vesolju.

Redno izračunavanje lokalnega geomagnetnega indeksa **K** na geomagnetnem observatoriju PIA nam omogoča primerjavo merilnih rezultatov z rezultati geomagnetnih observatorijev v naši sosesčini in na celotnem planetu Zemlja. To primerjavo potrebujemo zaradi verifikacije merilne opreme in merilnih postopkov na našem observatoriju. Poznavanje lokalnega geomagnetnega indeksa **K** nam omogoča nadaljnje raziskovalno delo na višji ravni, kot če poznamo same merilne podatke. Lažje zaznavamo in nato odkrivamo vplive na lokalno zemeljsko magnetno polje naravnega izvora in tudi motnje, ki jih povzročamo ljudje s svojo dejavnostjo. Za območje celotne Slovenije, ki ga z geomagnetnimi meritvami pokriva geomagnetni observatorij PIA, je pomembno poznavanje lokalnega geomagnetnega indeksa **K** zaradi ocenjevanja vpliva sprememb zemeljskega magnetnega polja na ljudi in ostalo biosfero ter na sodobno tehnologijo.

Potem ko smo vzpostavili vse ustrezne merilne postopke na observatoriju PIA in pričeli redno računati lokalni geomagnetni indeks **K** za območje Slovenije, bomo morali še naprej skrbeti za zanesljivost geofizikalnih meritev in redno vzdrževanje observatorija. Sodelovati pa bomo morali tudi pri uvajanju uporabe geomagnetnega indeksa **K** za Slovenijo, predvsem na področjih, ki so pomembna za naše vsakdanje življenje.

## Zahvala

Avtorji se zahvaljujejo kolegu Petru Reismanu za pregled besedila in predloge, kako izboljšati vsebino članka. Enaka zahvala velja obema anonimnima recenzentoma ter uredništvu revije Geodetski vestnik.

## Literatura in viri:

- Achem, U. C., Rabiou, A. B., Onimisi, M. Y. (2013). Using Locally Generated Magnetic Indices to Characterize the Ionosphere From Magnetic Data Acquisition System (Magdas) Ground Based Observatories in Nigeria. *European Journal of Sustainable Development*, 2(4), 177–190. DOI: <http://dx.doi.org/10.14207/ejsd.2013.v2n2p177>
- AFGL (1985). *Handbook of Geophysics and the Space Environment*. Scientific editor Adolph S. Jursa. Springfield (US): United States Air Force; Air Force Systems Command; Air Force Geophysics Laboratory.
- Anderson, D., Fuller-Rowell, T., (1999). *The Ionosphere*. SE-14. Boulder (US): Space Environmental Center.
- APL (1997). *The Sun and Heliosphere in Three Dimensions*. Report of the NASA Science Definition Team for STEREO Mission. Laurel (US): Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory.
- Bartels, J., Heck, N. H., Johnston, H. F. (1940). Geomagnetic three hour-range indices

- for the years 1938 and 1939. *Journal of Geophysical Research*, 45(3), 309–337. DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/te045i003p00309>
- Bernard, A., Menvielle, M., Chambodut, A. (2011). On the influence of the data sampling interval on computer-derived K-indices. *Data Science Journal*, 10(30), 41–46. DOI: <http://dx.doi.org/10.2481/dsj.iaga-07>
- Billings, D. E., Roberts, W. O. (1964). The origin of M-region geomagnetic storms. *Astrophisica Norvegica*, 9(16), 147–150.
- Bitterly, M., Menvielle, M., Bitterly, J., Berthelier, A. A. (1997). Comparison between Computer Derived (FMI Method) and Hand Scaled K Indices at Port Aux Francais and Port Alfred French Observatories. Proceedings of the VIth International workshop on geomagnetic instruments, data acquisition and processing. Editor Jean Rasson. Bruxelles: Académie Royale de Belgique, 136–143.
- Campbell, H. W. (1989). The Regular Geomagnetic-Field Variations During Quiet Solar Conditions. *Geomagnetism*, 3, 385–460.
- Chapman, S., Price, A. T. (2007). The Electric and Magnetic State of the Interior of the Earth, as Inferred from Terrestrial Magnetic Variations. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Series A, X*, 229, 427–460.
- Christiansen, F., Haigh, D. J., Lundstedt, H. (2007). Influence of Solar Activity Cycles on Earth's Climate. ISAC Final Report; Scientific Report 2/2007. Copenhagen (DK): Danish National Space Center.
- Čop, R. (2011). Gradnja geomagnetnega observatorija pod Sinjim vrhom nad Ajdovščino. V: M. Kuhar (ur.), *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2010*. Zbornik predavanj. Ljubljana: Univerza v Ljubljani, Fakulteta za gradbeništvo in geodezijo, 59–64.
- Čop, R., Bilc, A., Beguš, S., Fefer, D., Radovan, D. (2008). Magnetne nevihte in njihov vpliv na navigacijo. V: M. Kuhar (ur.), *Raziskave s področja geodezije in geofizike 2007*. Zbornik predavanj. Ljubljana: Slovensko združenje za geodezijo in geofiziko, 71–80.
- Čop, R. (2015). Snowstorm at the geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, 4(2), 155–159. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/gi-4-155-2015>
- Čop, R., Milev, G., Deželjin, D., Kosmač, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems Discussions*, 3(2), 135–141. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/gi-3-135-2014>
- Dobrica, V., Demetrescu, C., Greculeasa, R., Isac, A. (2012). On the crustal bias of repeat stations in Romania. *Annals of Geophysics*, 55(6).
- Greiner-Mai, H., Jochmann, H. (1995). Correlation between the Geomagnetic Field Variations, the Fluctuations of the Earth's Rotation and Climate Change. Scientific Technical Report STR95/08. Potsdam (D): Geoforschungszentrum Potsdam.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual (2012). Version 4.6. Edited by: Benoît St-Louis. Edinburgh (UK): British Geological Survey.
- Jankowski, J., Sucksdorff, C. (1996). Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. Boulder (US): International Association of Geomagnetism and Aeronomy IAGA.
- Korepanov, V. (2006). Geomagnetic instrumentation for repeat station survey. V: J. L. Rasson, T. Delipetrov (ur.), *Geomagnetics for Aeronautical Safety: A Case Study in and around the Balkans*. Dordrecht: Springer, 145–166. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5025-1\\_11](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-5025-1_11)
- Langhoff, S., Straume, T. (2012). Workshop Report on Space Weather Risks and Society. NASA/CP–2012–216003. Report of a workshop sponsored by and held at NASA Ames Research Center Moffett Field, California on October 15–16, 2011. Moffett Field (CA, US): National Aeronautics and Space Administration; Ames Research Center.
- Lindzen, S. R., Chapman, S. (1969). Atmospheric Tides. *Space Science Reviews*, 10, 3–188. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/bf00171584>
- Lockwood, M. (2013). Reconstruction and Prediction of Variations in the Open Solar Magnetic Flux and Interplanetary Conditions. *Living Reviews in Solar Physics*, 10(4). DOI: <http://dx.doi.org/10.12942/lrsp-2013-4>
- Love, J. J. (2008). Magnetic monitoring of Earth and space. *Physics Today*, 61(2), 31–37. DOI: <http://dx.doi.org/10.1063/1.2883907>
- Love, J. J. (2011). Secular trends in storm-level geomagnetic activity. *Annales Geophysicae*, 29(2), 251–262. DOI: <http://dx.doi.org/10.5194/angeo-29-251-2011>
- Love, J. J., Remick, K. J. (2007). Magnetic Indices. V: *Encyclopedia of Geomagnetism and Paleomagnetism*. Dordrecht (Netherlands): Springer, 509–512. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6\\_178](http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4020-4423-6_178)
- Marsal, S., Torta, J. M., Curto, J. J. (2013). Temperature sensitivity of variometers: Lessons learnt from Livingston Island geomagnetic observatory. V: P. Hejda, A. Chulliat, M. Catalan (ur.), *Proceeding of the XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing*. Extended Abstract Volume. San Fernadno; Cadiz (Spain): Real Instituto y Observatorio de la Armada, June 4–14, 2012. *Boletim Roa*, 3 (13), 24–28.
- Marsh, N., Svensmark, H. (2000). Cosmic rays, clouds, and climate. *Space Science Series*, 215–230. DOI: [http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-0888-4\\_21](http://dx.doi.org/10.1007/978-94-010-0888-4_21)
- Mayaud, P. N. (1980). Derivation, Meaning, and Use of Geomagnetic Indices. *Gophysical monograph 22*. Washington (DC, US): American Geophysical Union.
- Menvielle, M., Papitashvili, N., Hakkinen, L., Sucksdorff, C. (1995). Computer production of K indices: review and comparison of methods. *Geophysical Journal International*, 123(3), 866–886. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246x.1995.tb06895.x>
- Mihajlović, S. (2010). Model izrade geomagnetskog godišnjaka na osnovi baza digitalnih podataka. Beograd: Geodetski zavod; Akademski misao.
- Nikolaeva, N. S., Yermolaeva, Y. I., Lodkina, I. G. (2011). Dependence of Geomagnetic Activity during Magnetic Storms on the Solar Wind Parameters for Different Types of Streams. *Geomagnetism and Aeronomy*, 51(1), 49–65. DOI: <http://dx.doi.org/10.1134/s0016793211010099>
- NOAA/SWPC (2014). Estimated Planetary K index (3 hour data); Begin: 2014 Dec 10 0000 UTC (13. 12. 2014). Boulder (CO, US): NOAA; Space Weather Prediction Center. [ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/plots/kp/20141210\\_kp.gif](ftp://ftp.swpc.noaa.gov/pub/plots/kp/20141210_kp.gif), pridobljeno 13. 12. 2014.
- Nowozynski, K., Ernst, T., Jankowski, J. (1991). Adaptive smoothing method for computer derivation of K-indices. *Geophysical Journal International*, 104(1), 85–93. DOI: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-246x.1991.tb02495.x>
- Paliska, D., Čop, R., Fabjan, D. (2010). The Use of GIS-based Spatial Multi-criteria Evaluation in the Selection Process for the New Slovenian Geomagnetic Observatory Site. *Annales Ser. hist. nat.* 20(1), 1–8.

- Parnahaj, I., Kudela, K., Kancirova, M. (2008). On Cosmic Ray Decreases, Geomagnetic Storms and CMEs. 22<sup>nd</sup> Annual Student Conference; Week of Doctoral Students 2013; Prague (CZ): Charles University in Prague; Faculty of Mathematics and Physics, June 3–5, 2014. WDS'13 Proceedings of Contributed Papers, Part II, X, 13–19.
- Rangarajan, G. K. (1989). Indices of Geomagnetic Activity. *Geomagnetism*, 3, 323–384.
- Rangarajan, G. K., Barreto, L. M. (2000). Long term variability in solar wind velocity and IMF intensity and the relationship between solar wind parameters & geomagnetic activity. *Earth Planets Space*, 52(2), 121–132. DOI: <http://dx.doi.org/10.1186/bf03351620>
- Russell, T. C. (1991). The Solar Wind Interaction with the Earth's Magnetosphere: A Tutorial. Department of Earth and Space Sciences and Institute of Geophysics and Space Physics University of California Los Angeles.
- Saiz, E., Cerrato, Y., Cid, C., Dobrica, V., Hejda, P., Nenovski, P., Stauning, P., Bochnicek, J., Danov, D., Demetrescu, C., Gonzalez, D. W., Maris, G., Teodosiev, D., Valach, F. (2013). Geomagnetic response to solar and interplanetary disturbances. *Journal of Space Weather and Space Climate*, 3(A26), 1–20. DOI: <http://dx.doi.org/10.1051/swsc/2013048>
- Stankov, S., Stegen, K., Warnat, R. (2010). Local Operational Geomagnetic Index K Calculation (K-LOGIC) from digital ground-based magnetic measurements. TN-RMI-2010-01. Dourbes (B): Royal Meteorological Institute (RMI).
- Svalgaard, L. (1977). Geomagnetic Activity: Dependence on Solar Wind Parameters. SUIPR Report No. 699. Stanford (US): Stanford University; Institute of Plasma research.
- Thomson, W. A., Dawson, B. E., Reay, J. S. (2011). Quantifying extreme behavior in geomagnetic activity. *Space Weather*, 9(10). DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2011sw000696>
- Viljanen, A., Pulkkinen, A., Pirjola, R. (2008). Prediction of the Geomagnetic K Index Based on its Previous Value. *Geophysica*, 44(1–2).
- Wing, S., Johnson, J. R., Jen, J., Meng, C.–I., Sibeck, D. G., Bechtold, K., Freeman, J., Costello, K., Balikhin, M., Takahashi, K. (2005). Kp forecast models. *Journal of Geophysical Research*, 110(A04). DOI: <http://dx.doi.org/10.1029/2004ja010500>
- Xu, Z., Gannon, J. L., Rigler, E. J. (2013). Report of Geomagnetic Pulsation Indices for Space Weather Applications. Open-File Report 2013–1166. Reston (US): U.S. Department of the Interior; U.S. Geological Survey.

Čop R., Deželjin D., De Reggi R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. *Geodetski vestnik*, 59 (4): 697–708.  
DOI: 10.15292/geodetski-vestnik.2015.04.697-708

**doc. dr. Rudi Čop, univ. dipl. inž. elek.**  
Zavod Terra Nova, Sv. Peter 115  
SI-6333 Sečovelje/Sicciole  
e-naslov: rudi@artal.si

**Robert De Reggi, univ. dipl. inž. elek.**  
Zavod Terra Nova, Sv. Peter 115  
SI-6333 Sečovelje/Sicciole  
e-naslov: robert.dereggi@siol.net

**Damir Deželjin, dipl. inž. pom.**  
Zavod Terra Nova, Sv. Peter 115  
SI-6333 Sečovelje/Sicciole  
e-naslov: damir.dezeljin@dezo.org