

Absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja

Rudi Čop¹

Povzetek

Komponente vektorja zemeljskega magnetnega polja se avtomatsko in zvezno merijo z digitalnimi magnetometri z običajno frekvenco 1 Hz. Vzporedno s temi variometričnimi meritvami se opravljajo absolutne meritve v časovnih razmakih več ur ali celo dni. Tudi te meritve so lahko avtomatizirane, vendar se v večini primerov izvajajo še vedno ročno s pomočjo teodolitskega deklinacijsko-inklinacijskega magnetometra DI. Absolutne meritve geomagnetnega polja se na geomagnetnih observatorijih izvajajo redno. Zato so v članku na kratko predstavljene tudi lastnosti sodobnih geomagnetnih observatorijev. Prav s sistematičnimi meritvami na geomagnetnih observatorijih so bili v sredini devetnajstega stoletja odkriti cikli geomagnetnih neviht. To odkritje je skupaj povežalo sončeve in geomagnetne aktivnosti tako, da pomeni proučevanje ene aktivnosti istočasno tudi proučevanje druge. Spremembe zemeljskega magnetnega polja, v katerem živimo in delamo, so kompleksne narave in je zato njihovo proučevanje zahtevno in širši strokovni javnosti manj poznano.

Ključne besede: geomagnetno polje, absolutne meritve, geomagnetni observatoriji, cikli geomagnetnih neviht.

Key words: geomagnetic field, absolute measurements, geomagnetic observatory, cycles of geomagnetic storms

Odkritje ciklov geomagnetnih neviht

V začetku sedemnajstega stoletja so začeli opazovati sončne pege s pomočjo teleskopa (Galilei & Scheiner, 2010). Eno največjih astronomskih odkritij je naredil Heinrich Schwabe (1789-1875), ki je ugotovil, da se sončne pege pojavljajo ciklično (Arlt et al., 2013). Ti cikli se štejejo od leta 1755, ko so solarni astronomi začeli sistematično zapisovati število opaženih sončnih peg (SILSO, 2015). Za obdobje zadnjih 260 let je bilo ugotovljeno, da trajajo sončni cikli v povprečju 11,4 let (Air Force, 1985).

Da pa je pojav geomagnetnih neviht vezan na sončne cikle je ugotovil Sir Edward Sabine (1788-1883) (Sabine, 1852). Cikel geomagnetnih neviht je v maksimumu zamaknjen za eno do tri leta za ciklom sončnih peg in v minimumu za eno do dve leti (Campbell, 1989). Izbruh v sončni pegi je prvi opazoval Richard Carrington (1826-1875) (Carrington, 1859; Cliver & Dietrich, 2013). Predvidel je tudi vpliv teh izbruhov na Zemljo in na pojav polarnih sijev na njej (Feldstein et al., 2014). Ugotovil je tudi, da se območja na Soncu vrtijo z različno hitrostjo, glede na njihovo solarno širino (ang.: Carrington rotation). V ekvatorialnem delu se zavri v 24 dneh, na področjih okoli njegovih polov pa v 34 dneh.

Da sta si cikla sončnih peg in geomagnetnih neviht v časovnem sozvočju in da bliski v sončnih pegah vplivajo na zemeljsko magnetno polje je bilo potrjeno konec devetnajstega stoletja (Cliver, 1994; Stern, 2002). Šele v 60-tih letih dvajsetega stoletja je bil tudi potrjen obstoj področij M na Soncu, iz katerih izhaja sončni veter večjih gostot in hitrosti (Billings & Roberts, 1964). To so luknje v koroni Sonca, ki so jih zaznali s teleskopi na žarke X nameščenih na umetnih satelitih. S tem odkritjem je bila pojasnjena časovna razlika med ciklom sončnih peg in ciklom geomagnetnih neviht.

¹ Zavod Terra Viva, Sv. Peter 115, 6333 Sečovlje/Sicciole

Danes je vpliv Sonca na Zemljo že sprejeto dejstvo. Meritve s pomočjo vesoljskih sond so potrdile, da sončni veter povezuje magnetne razmere na Soncu s tistimi na Zemlji. Odkritje ionosfere in meritve sevanja ultravijoličnih žarkov in žarkov X iz Sonca pa je omogočilo razumevanje rednih dnevnih variacij zemeljskega magnetnega polja. Intenzivno pa se raziskujejo energijske povezave med vplivom Sonca na magnetno polje Zemlje in njeno atmosfero (Applied, 1997; Hasegawa et al., 2009).

Sodobni geomagnetni observatoriji

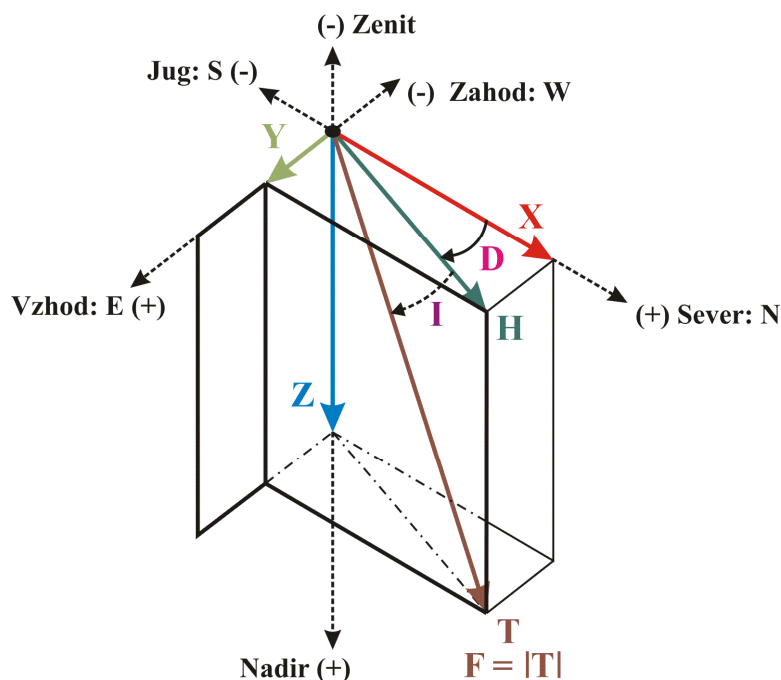
Globalna mreža geomagnetnih observatorijev se je začela postavljati po ustanovitvi Göttingenske geomagnetne zveze leta 1834 (Cliver, 1994; Stern, 2002). Med vidnejše člane te zveze spada tudi Carl Friedrich Gauss (1777-1855), ki je razvil harmonično analizo skalarnih vrednosti zemeljskega magnetnega polja (Glassmeier & Tsurutani, 2014). V prejšnjem stoletju je bilo za širitev mreže geomagnetnih observatorijev pomembno Mednarodno geofizikalno leto IGY (International Geophysical Year, 1957-1958). Nekateri projekti, postavljeni v tem obdobju, se izvajajo še danes.

V preteklosti je bil osnovni razlog za postavitev geomagnetnih observatorijev pridobivanje osnovnih podatkov za varno navigacijo v pomorstvu in nato tudi za letalstvo (Čop, 2001). Z razvojem satelitskih navigacijskih sistemov pa se je pomen geomagnetnih observatorijev navidezno zmanjšal. Magnetni navigacijski sistemi so v večini primerov postali sekundarni, ostajajo pa še vedno primarni za nadzor avtopilotov in radarjev ter pri geoloških vrtnjih. Geomagnetne meritve na satelitih in na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje se ne izključujejo, temveč se dopolnjujejo. Ostajajo pa meritve na geomagnetnih observatorijih na površini Zemlje še vedno osnovni izvor podatkov o spremembah zemeljskega magnetnega polja in posredno tudi o spremembah v ionosferi.

Geomagnetni observatorij je referenčno mesto za geomagnetne meritve na ozemlju, ki ga tak observatorij pokriva. Zato mora biti postavljen na skrbno izbranem mestu, ki ustreza tudi mednarodnim priporočilom (Jankowski & Sucksdorff, 1996). Običajno je izbrano mesto kompromisna rešitev med priporočili in danimi možnostmi. Pri tem se mora poleg mednarodnih priporočil upoštevati tudi njegove geološke, seizmološke in hidrološke posebnosti. V naših razmerah tak observatorij še dodatno ogrožajo vandalizmi, gozdni požari in atmosferske prenapetosti (Čop et al., 2014), kar je tudi treba upoštevati pri izbiri mesta njegove postavitve. Da se lahko geomagnetni observatorij vključi v obstoječo mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET (INTERNational Real-time MAGnetic observatory NETWORK) mora biti tudi opremljen po ustreznih priporočilih (INTERMAGNET, 2012; Kerridge, 2007). Prav ta mednarodna povezava daje geomagnetnemu observatoriju veljavo, saj mu omogoča mednarodno sodelovanje, preverjanje merilnih rezultatov in mu priznava usposobljenost za opravljanje geomagnetnih meritev.

Za digitalni geomagnetni observatorij je zanesljiva in robustna telemetrija potrebna ne le za prenos merilnih podatkov, temveč tudi za daljinski nadzor delovanja merilnih instrumentov in celotnega observatorija. Sodobna telemetrija, ki sloni na prenosu digitalnih signalov, je rezultat razvoja telekomunikacij in računalništva ter merilne tehnike iz področja meritev zemeljskega magnetnega polja. Ne omogoča samo povezave geomagnetnega observatorija v globalno informacijsko mrežo za izmenjavo merilnih podatkov, temveč tudi postavitev merilnih mest na oddaljenih in težko dostopnih krajih na površini Zemlje (Korte et al., 2009) in na morskem dnu (Di Mauro et al., 2006) ter tudi razpršitev merilnih mest po širšem ozemlju s skupnim nadzornim centrom (DMI, 2003). Razvoj telemetrije je povzročil spremembo v organizaciji geomagnetnih observatorijev

(Rasson & Van Loo, 2007). Največji dosežki na področju telemetrije in vesoljske tehnologije pa so vsekakor meritve magnetnega polja v medplanetarnem prostoru s pomočjo vesoljskih sond (Lockwood et al., 2004).



Slika 1 – Vektor zemeljskega magnetnega polja T in njegove komponente.

Tradicionalni načini dela na geomagnetnih observatorijih zagotavljajo točne in stabilne podatke: srednje vrednosti letnih, urnih in minutnih meritev ter različne oblike geomagnetnih indeksov. Obstaja tudi skupina uporabnikov, ki jih bolj kot merilna točnost in stabilnost zanima merilna ločljivost in hitrost vzorčenja. Poleg tradicionalnih podatkov, ki so reducirani na osnovne vrednosti geomagnetnega polja, so za nekatere uporabnike bolj uporabni primarni podatki, ki še niso obdelani. Za geomagnetni observatorij so ti podatki izvor finančnih sredstev, kot tudi različne oblike dodatnih geomagnetnih meritev za posamezne naročnike. Drug pomemben izvor finančnih sredstev je izdelava merilnih instrumentov in njihovo umerjanje. Za nekatere geomagnetne observatorije pa njihova osnovna dejavnost niti ni primarni izvori finančnih sredstev (Newitt, 2007a).

Merilo uspešnosti strokovnega dela na geomagnetnih observatorijih so tudi objave poročil in člankov njihovih raziskovalcev v strokovnih revijah. Te objave zahtevajo predhodno ureditev doseženega, omogočajo njegovo preverjanje s pomočjo širše strokovne javnosti in nakazujejo najbolj zanesljivo pot za njegovo uspešno nadgradnjo. Tako kanadski raziskovalci od sredine prejšnjega stoletja objavljajo v povprečju osem vrhunskih strokovnih člankov na leto. V vsem tem obdobju ostaja število letnih objav nespremenjeno, povečala pa se je v člankih uporabljena količina podatkov iz observatorijev. Iz začetnih 20% se je ta količina dvignila nad 80%, od katerih je polovica izraženih preko geomagnetnih indeksov (Newitt, 2007b). Zaradi izjemne kompleksnosti sprememb geomagnetnega polja pa je potrebno poleg standardnih geomagnetnih indeksov uporabljati tudi take, ki so bolj prilagojeni samemu namenu raziskovanja (Svalgaard & Cliver, 2007). Oblikovanje lastne razvojne poti je tudi ena od oblik zagotavljanja dolgoročnega razvoja geomagnetnega observatorija. Brez tega razvoja je delo na njem omejeno le na monotono zbiranje podatkov.

Absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja

Vektorsko polje zemeljskega magnetizma se spreminja s časom in s krajem. Na zemeljski površini se razdeli na tri osnovne komponente. Če točko meritve prevzamemo kot izhodišče pravokotnega koordinatnega sistema, potem je os X v smeri geografskega meridiana, os Y pravokotna na ravnino geografskega meridiana in os Z navpično navzdol (Lanza & Meloni, 2006). Tem osnovnim komponentam se pridružuje še horizontalna komponenta H, deklinacijski kot D, inklinacijski kot I in absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja F (Slika 1). Vse te komponente se dajo praktično tudi izmeriti. Za popoln opis vektorja zemeljskega magnetnega polja zadostujejo že tri od njih, ki pa morajo biti med seboj neodvisne. Ker ne obstaja neodvisna merilna metoda za merjenje vzhodne komponente Y, je zato potrebno izmeriti deklinacijski kot D. Na geomagnetnem observatoriju se morajo količine zemeljskega magnetnega polja izmeriti z merilnimi instrumenti merilnih pogreškov $\leq 0,5$ nT in ločljivostjo $\leq 0,1$ nT (Korepanov, 2006).

Spremembe komponent zemeljskega magnetnega polja so znotraj ± 3000 nT, le na višjih zemljepisnih širinah presežejo vrednost ± 4000 nT. Glede na način merjenja komponent zemeljskega magnetnega polja se ločita dve skupini meritev: a) variometrične meritve, ki so zvezne meritve in so na geomagnetnih observatorijih stalne (Čop et al., 2015) in b) absolutne meritve, ki se opravljajo v enakomernih časovnih presledkih.

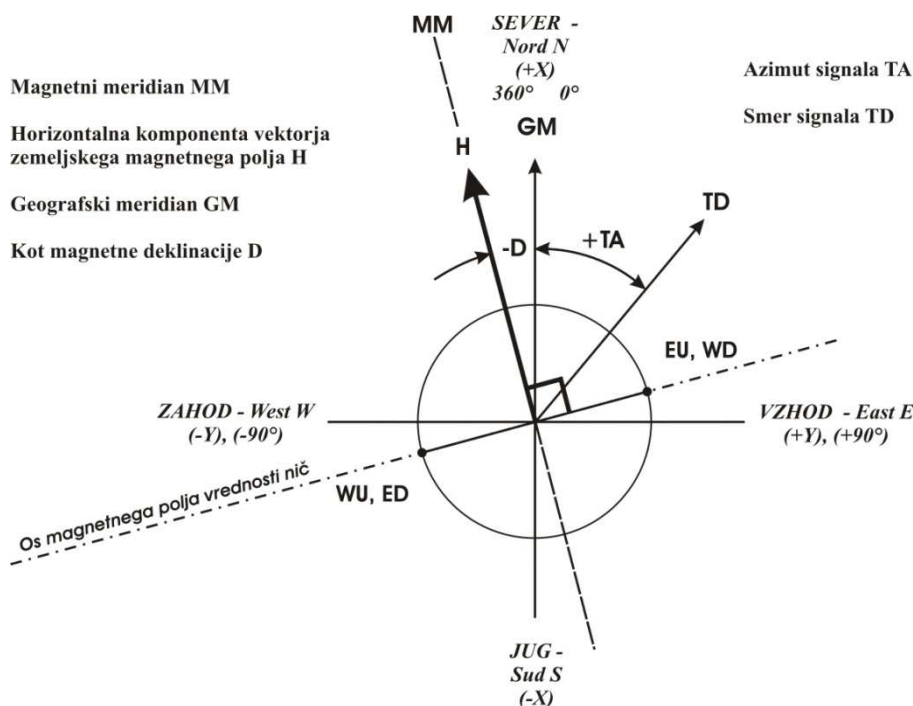


Slika 2 - Teodolitski magnetometer DI zgrajen iz nemagnetnega teodolita Cooke Tavistock (Vickers Instruments Ltd., Anglija) in enoosnega fluxgate magnetometra FLM1/B (RIM-CPG Dourbes, Belgija).

Z absolutnimi meritvami se odmerja velikost zemeljskega magnetnega polja, spremlja se njegove sekularne spremembe in določa kvaliteta varimetričnih meritev. Za to vrsto meritev se uporabljata deklinacijsko – inklinacijski teodolitski magnetometer fluxgate DI

in protonski magnetometer PPM (proton procession magnetometer). Merjene vrednosti so kot deklinacije D , kot inklinacije I in absolutna vrednost vektorja zemeljskega magnetnega polja F . Magnetna deklinacija D je odklon magnetnega meridiana od geografskega meridiana (Slika1). Kot merimo v horizontalni ravnini na vzhod v pozitivni smeri in na zahod v negativni smeri. To predstavlja magnetni azimut. Ta se meri proti geografskemu severu, ki je določena z osjo rotacije Zemlje. Čeprav se orientacija proti geografskemu severu določa posredno, je z uporabo globalnih satelitskih navigacijskih sistemov pridobila na veljavi (Benett & Freislich, 1980; Ghilani, 2004). Magnetna inklinacija I ali magnetni naklon je kot za katerega se vektor zemeljskega magnetnega polja odklanja od horizontalne ravnine. Magnetni naklon je pozitiven, če so silnice magnetnega polja usmerjene k površini Zemlje.

Na geomagnetnem observatoriju se absolutne meritve izvajajo z magnetometer DI na primarnem merilnem stebru, ki je običajno v hiši za absolutne meritve. Izven nje je še dodatni merilni steber na katerem se vsaj enkrat letno opravljajo dodatne absolutne meritve. Vsakoletne absolutne meritve na pomožnem stebru omogočajo poleg samega preverjanja tudi spremljanje sekularnih sprememb zemeljskega magnetnega polja. Te meritve so namreč enake meritvam sekularnih sprememb na ponavljalnih postajah (Newitt et al., 1996).



Slika 3 - Meritev kota deklinacije na horizontalnem krogu nemagnetnega teodolita magnetometra DI po metodi ničanja.

Magnetometer DI sestavljajo nemagnetni teodolit in enosni magnetometer fluxgate (Rasson, 2007). Njegov senzor je nameščen na daljnogledu teodolita tako, da sta si magnetna in optična os vzporedni (Slika 2). Točnost (Urad za standardizacijo, 1999; JCGM, 2008) tega merilnega instrumenta je odvisna od merilne točnosti teodolita in od njegove magnetne čistosti. Merilna točnost magnetometra DI pa ni odvisna le od teodolita temveč tudi od magnetne čistosti merilca in od magnetnega šuma okolice, ki je v času magnetnih neviht zelo povečan.

Na srednjih zemljepisnih širinah se merjenje kotov D in I izvaja po metodi ničanja. Senzor magnetometra DI je usmerjen pravokotno na smer vektorja zemeljskega magnetnega polja. Takrat je merilna občutljivost tega sensorja največja in zazna že najmanjši odklonu iz te smeri. Visoka stabilnost instrumenta skupaj z merilnimi procedurami, ki izenačujejo pogoške elektronike in pogoške teodolita, omogočajo meritev kotov D in I z absolutno merilno točnostjo.

Referenca za azimut pri meritvah deklinacije in inklinacije je določena glede na pozicijo teodolita (TD). Pri vsakem od osmih odčitavanj vrednosti azimutnega kota (TA) na nemagnetnem teodolitu (Slika 3) je potrebno odčitati tudi univerzalni čas UTC (Universal Coordinated Time) (Agilent Technologies, 2000). Poleg srednje vrednosti kota D in kota I je potrebno izračunati tudi srednjo vrednost časa UTC za obdobje vsake skupine štirih meritev.

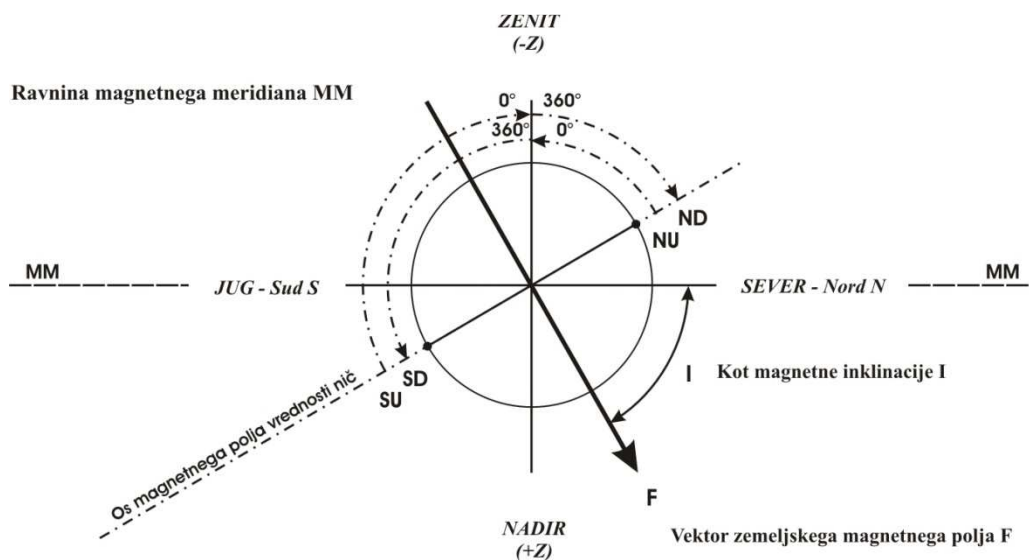
Deklinacijski kot D se izračuna kot srednja vrednost štirih meritev. Deklinacijski koti se odčitavajo na horizontalnem krogu teodolita in sicer:

1. S sensorjem zgoraj in z daljnogledom enkrat usmerjenim proti vzhodu (EU) in drugič proti zahodu (WU). Meritvi sta opravljena v prvi krožni legi.
2. S sensorjem spodaj in z daljnogledom enkrat usmerjenim proti zahodu (WD) in drugič usmerjenim proti vzhodu (ED). Meritvi sta opravljena v drugi krožni legi.

Po opravljenih vseh štirih meritvah deklinacije po metodi ničanja se da izračunati magnetni meridian (MM): $MM = (ED + WD + EU + WU)/4$

Na osnovi dobljenih merilnih rezultatov se izračuna tudi deklinacijski kot D:

$$D = MM + (TA) - TD \pm 90^\circ$$



Slika 4 - Meritev kota inklinacije na vertikalnem merilnem krogu nemagnetnega teodolita magnetometra DI po metodi ničanja v ravnini magnetnega meridiana MM.

Pri merjenju inklinacije mora biti daljnogled magnetometra DI usmerjen točno v smeri predhodno izračunanega magnetnega meridiana MM ali $MM+180^\circ$. Meritev se odčitava na vertikalnem merilnem krogu (Slika 4). Inklinacija je srednja vrednost štirih meritev:

1. Z daljnogledom teodolita usmerjenim v magnetni meridian MM in doseženo ničelno vrednostjo enosnega magnetometra fluxgate v primeru, ko je njegov senzor zgoraj (NU) in ko je senzor spodaj (SD). V obeh primerih je vertikalni merilni krog teodolita usmerjen proti zahodu.

2. Z daljnogledom teodolita usmerjenim v magnetni meridian MM +180° in doseženo ničelno vrednostjo enoosnega magnetometra fluxgate v primeru, ko je njegov senzor zgoraj (SU) in ko je senzor spodaj (ND). V obeh primerih je vertikalni merilni krog teodolita usmerjen proti vzhodu.

Na osnovi izmerjenih vrednosti kota inklinacije I v štirih različnih pozicijah daljnogleda in sensorja je mogoče izračunati njegovo srednjo vrednost:

$$I = [(360^\circ - \text{ND}) + (180^\circ - \text{SU}) + (\text{SD} - 180^\circ) + \text{NU}] / 4$$

V tem poglavju predstavljena metoda meritve absolutnih vrednosti vektorja zemeljskega magnetnega polja je klasična in najbolj pogosto uporabljena metoda na geomagnetnih observatorijih (Jankowski & Sucksdorff, 1996; Rasson, 2005) kot tudi na ponavljalnih postajah (Newitt et al., 1996). Tudi sama metoda meritev absolutnih vrednosti s pomočjo magnetometra DI se še izpopolnjuje (Geese et al., 2011).

Analiza merilnih rezultatov in vpliv šuma na meritve

Na osnovi meritve kota deklinacije in kota inklinacije je mogoče izračunati tudi kot med magnetno osjo sensorja in optično osjo teodolita (ang.: sensor misalignment) ter odstopanje elektronskega dela magnetometra fluxgate (ang.: sensor offset). Iz meritev kota deklinacije D se izračuna kot δ_D , horizontalni kot ali azimutni kot med magnetno osjo sensorja magnetometra fluxgate in optično osjo daljnogleda teodolita, ter kot ε_D , vertikalni kot ali elevacijski kot med tema dvema osema. Odstopanje elektronskega dela magnetometra fluxgate od nične vrednosti zemeljskega magnetnega polja ali magnetizacijski pogrešek sensorja je podana s faktorjem S_{0D} izraženim v nT (Lauridsen, 1985; Bartington Instruments, 1989; Matzka & Hansen, 2007). Pred izračunom faktorjev odstopanj se izmerjene vrednosti normirajo na poljubno izbrano vrednost kota deklinacije. Za spremljanje odstopanj posamezne serije meritev pri posameznem teodolitu pa to normiranje ni nujno potrebno.

Odstopanje optične osi daljnogleda od magnetne osi sensorja v horizontalni ravnini ne vpliva na meritve kota inklinacije I. Zato se iz meritev tega kota lahko izračuna le vrednost ε_I , horizontalni kot med magnetno osjo sensorja magnetometra fluxgate in optično osjo daljnogleda teodolita, in S_{0I} , odstopanje elektronskega dela magnetometra fluxgate od nične vrednosti zemeljskega magnetnega polja. Pri meritvah kota inklinacije se z razliko med rezultati meritev s senzorjem navzgor in s senzorjem navzdol izračuna faktor G_{0I} . Ta faktor podaja oceno o magnetni čistosti tako teodolita magnetometra DI kot uporabljenega nosilca zanj: stativa ali merilnega stebra. Nadzoruje pa se lahko tudi sprememba geomagnetnega gradienta merilnega stebra za absolutne meritve s pomočjo magnetometra DI (Csontos, 2013).

V kolikor obstajajo večje razlike med številskimi vrednostmi odstopanj izračunanih iz meritev kota deklinacije in iz meritev kota inklinacije, potem so absolutne meritve slabo izvedene ali pa obstajajo znatni pogreški v variometričnih meritvah. Če se želi izračunana odstopanja uporabiti tudi za uravnavanje magnetnih osi sensorja magnetometra fluxgate, potem se mora uporabiti tudi pravilno zaporedje meritev kota D in kota I. Le v tem primeru so rezultati izračunov odstopanj po predlaganih formulah za ε_D in ε_I ter za S_{0D} in S_{0I} usklajeni tudi po predznaku.

S_{0D} in S_{0I} je odstopanje meritve elektronskega dela magnetometra od nične vrednosti zemeljskega magnetnega polja za katere se priporoča, da se ju izračuna ob vsaki seriji meritev kota deklinacije D in kota inklinacije I. Je namreč pomemben pokazatelj sprememb med posameznimi serijami meritev in pokazatelj izvora sistematskih pogreškov.

Na absolutne meritve zemeljskega magnetnega polja z magnetometrom DI znatno vpliva tudi magnetni šum okolice (Turbitt et al., 2011; Marsal & Torta, 2007), ki vpliva tudi na točnost določitve osnovnih vrednosti komponent geomagnetnega polja (Changjiang & Zhang, 2011).

Astronomsko določevanje azimuta z opazovanjem Sonca

Astronomski azimut je določen s kotom med ravnino nebesnega poldnevnikar opazovališča in ravnino, ki vsebuje opazovano točko in normalo na opazovališče. Astronomski azimut je kot merjen v horizontalni ravnini v smeri urinega kazalca od smeri proti geografskemu severu (ang.: true north).

V času dnevne svetlobe je za opazovanje s pomočjo teodolita primernih večje število nebesnih teles. Vendar je Sonce tisto, ki je najprimernejše med njimi zaradi njegove svetlosti in takojšnje prepoznavnosti. Gibanju Sonca se sledi z daljnogledom teodolita, ki mora biti obvezno dopolnjen s sončnim filtrom. Ta filter lahko nadomešča Roelofsova prizma, ki omogoča zanesljivejše določevanje središča sončnega diska (Nixon, 2011). V trenutku, ko se z daljnogledom teodolita doseže središče Sonca, se odčita horizontalni kot in registrira čas UTC. Podrobnejši opis tega opazovanja skupaj s prostorsko geometrijo je predstavljena v ustrezni literaturi (Jankowski & Sucksdorff, 1996; Newitt et al., 1996). Z malo izkušenj se lahko pri tej meritvi horizontalnega kota doseže pogrešek le nekaj kotnih sekund.

Priporočljivo je, da se serija opazovanj Sonca opravi v jutranjih in večernih urah simetrično glede na poldne po lokalnem času. To je pa tudi čas, ko se opravljajo tudi geomagnetne meritve. Sonce je takrat nizko nad obzorjem, zaradi česar je manjši vpliv pogreška zaradi slabe postavitve instrumenta v vodoravni ravnini (Rasson, 2005). Ne sme pa biti Sonce preblizu obzorja, ker se takrat pogreški povečajo zaradi večjega vpliva astronomske refrakcije. Ta je največja v smeri horizonta. S simetričnim merjenjem glede na opoldanski čas se odpravlja ali vsaj zmanjšuje sistematični pogrešek pri določevanju časovnega kota. Zaradi različnih pogojev v atmosferi v dopoldanskem in popoldanskem času pa sistematičnega pogreška zaradi refrakcije svetlobe v ozračju ni mogoče prav enostavno odpraviti.

Najbolj priporočljiva metoda za določevanje azimuta z opazovanjem Sonca je metoda časovnega kota. V primeru uporabe te metode mora biti čas določen točno na nekaj desetink sekunde. Najprimernejši kronometer je tisti, ki je sinhroniziran na standardni oddajnik časovnih signalov ali pa satelitski sprejemnik GNSS (Global Navigation Satellite System).

Zaključki

Današnji razvoj magnetometrov DI se odvija v dve smeri: a) dopolnjuje se klasični teodolitski magnetometer DI tako, da se poleg senzorja na njegov daljnogled montira tudi celotna elektronika in pomnilnik za shranjevanje merilnih podatkov; b) robotizira se magnetometer DI (Sapunov et al., 2006; Matzka et al., 2010). Razvoj novega merilnega instrumenta za meritve zemeljskega magnetnega polja na observatoriju pa traja več kot deset let (Hegymegi, 2006), kar se tudi upošteva pri določevanju dobe amortizacije za to opremo. Ob nakupu novega tipa magnetometra DI je poleg cene odločujoče tudi število observatorijev, ki se jih nadzira iz enega centra. V primeru večjega števila dislociranih stalnih merilnih postaj se lahko na teh postajah postavi avtomatizirane magnetometre DI.

Ob takem nakupu se število stalnih sodelavcev geomagnetnega observatorija običajno zmanjša, poveča pa se obremenitev preostalih.

Za meritve azimuta s pomočjo opazovanja Sonca se lahko uporablja teodolit klasičnega magnetometra DI, ki je obvezno dopolnjen s sončnim filtrom. En sam merilni instrument je v tem primeru uporabljen za določitev azimuta kot tudi za meritve magnetne deklinacije in inklinacije. Določevanje azimuta na astronomski način je bolj odvisno od vremenskih razmer in tudi zahteva več časa za doseg končnih rezultatov kot pa s pomočjo satelitskega navigacijskega sistema. Po obeh metodah pridobljeni končni rezultati so med seboj primerljivi. Omogočata določevanje azimuta z merilno točnostjo $\leq 0,25$ kotne minute, kar je boljše kot pa najslabša priporočena merilna točnost (Jankowski & Sucksdorff, 1996; Newitt et al., 1996). Za določevanje azimuta s pomočjo satelitskega navigacijskega sistema pa moramo imeti na razpolago poseben satelitski navigacijski sprejemnik ter potrebno znanje in veščino za njegovo uporabo. Navigacijski sprejemnik omogoča samodejno zapisovanje in obdelavo merilnih podatkov ter zato hitreje ponudi končne rezultate za nadaljnjo uporabo (Gu et al., 2006; Dimal & Balicanta, 2009; Nixon, 2011). Uspešno lahko nadomesti ali vsaj dopolni tradicionalni astronomski način določevanja azimuta.

Že pri izhodiščni avtomatizaciji sodobnega digitalnega geomagnetnega observatorija in njegovi vključitvi v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET se je nadzor nad merilnimi podatki prepustilo sodelavcem posameznega observatorija. Nadaljnja avtomatizacija merilnih instrumentov in ostale opreme ter postopkov obdelave merilnih podatkov ni odvisna samo od razpoložljivih denarnih sredstev temveč tudi od števila sodelavcev tega observatorija. Zmanjševanje njihovega števila zmanjšuje zanesljivost delovanja observatorija, zmanjšuje raziskovalno delo na njem, zmanjšuje število raziskovalnih dosežkov in geomagnetni observatorij lahko prav kmalu preide v sistem za zbiranje in shranjevanje merilnih podatkov.

Literatura

- Agilent Technologies (2000). The Science of Timekeeping. Application Note AN 1289. Santa Clara (CA, US): Agilent Technologies.
- Air Force Geophysics Laboratory (1985). Handbook of Geophysics and the Space Environment. Scientific editor Adolph S. Jursa. ADA 167000. Springfield (VA, US): United States Air Force; Air Force system Command.
- Applied Physics Laboratory (1997). The Sun and Heliosphere in Three Dimensions. Report of the NASA Science Definition Team for STEREO Mission. Laurel (US): Johns Hopkins University.
- Arlt, R., Leussu, R., Giese, N., Mursula, K., Usoskin, I. G. (2013). Sunspot positions and sizes for 1825–1867 from the observations by Samuel Heinrich Schwabe. MNRAS 433, 3165–3172.
- Bartington Instruments (1989). Operation and Maintenance Manual for Mag-01H Fluxgate Declinometer / Inclinator With non-magnetic WILD T1 Theodolite. OM2020 Issue 4. Witney (UK): Bartington Instruments Ltd.
- Benett, G. G., Freislich, J. G. (1980). Field astronomy for surveyors. Kensington (Australia): Now South Wales University, 1980.
- Billings, E. D., Roberts, O. R. (1964). The origin of M-region geomagnetic storms. Astrophysica Norvegica 9 (16), 147-150.
- Campbell, H. W. (1989). The Regular Geomagnetic-Field Variations During Quiet Solar Conditions. Geomagnetism. Volume 3. Edited by J. A. Jacobs. London: Academic Press, 385-460.
- Carrington, C. R. (1859). Description of a Singular Appearance seen in the Sun on September 1, 1859. Monthly Notices of the Royal Astronomical Society – MNRAS 20, 13-15.
- Changjiang, X., Zhang, S. (2011). The analysis of baselines for different fluxgate theodolites of geomagnetic observatories. Proceedings of the XIV IAGA Workshop on Geomagnetic

- Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing, Changchun (China): Changchun Magnetic Observatory, 13 – 23, September, 2010. Editor Pieter B Kotzè. *Data Science Journal* 10, IAGA159-IAGA168.
- Cliver, W. E. (1994). *Solar Activity and Geomagnetic Storms: The First 40 Years*. EOS, Transactions, American Geophysical Union 75 (49), 569, 574-575.
- Cliver, W. E., Dietrich, F. W. (2013). The 1859 space weather event revisited: limits of extreme activity. *Journal of Space Weather and Space Climate* 3, A31 (1-15).
- Csontos, A. (2013). Methods for measuring the gradient of the magnetic field using standard observatory instrumentation. Proceedings of the XVth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing. Extended Abstract Volume. Edited by: Pavel Hejda, Arnaud Chulliat, Manuel Catalán. San Fernando; Cadiz (Spain): Real Instituto y Observatorio de la Armada, June 4th – 14 th, 2012. *Boletín Roa* 03 (13), 38-41.
- Čop, R. (2001). *Radionavigacija in telemetika*. Piran: samozaložba.
- Čop, R., Deželjin, D., De Reggi, R. (2015). Določitev lokalnega geomagnetnega indeksa K. *Geodetski vestnik*, 59 (4), 697-708.
- Čop, R., Milev, G., Deželjin, D., Kosmač, J. (2014). Protection against lightning at a geomagnetic observatory. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst.* 3, 135–141.
- Dimal, L. M. O. R., Balicanta, P. L. (2009). Comparative Analysis of GPS Azimuth and Derived Azimuth for the Establishment of Project Controls. Proceedings. 7th FIG – International Federation of Surveyors, Regional Conference; Spatial Data Serving People: Land Governance and the Environment – Building the Capacity, Hanoi, Vietnam, 19-22 October 2009; TS 6D – Engineering Application of GNSS.
- Di Mauro, D., De Santis, A., Tozzi, R. (2006). The magnetometers and the geomagnetic data from GEOSTAR, a deep seafloor multidisciplinary observatory. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata* 47 (1-2), 105-114.
- DMI (2003). *Magnetic Results 2001: Brorfelde, Qeqertarsuaq, Qaanaaq and Narsarsuaq Observatories*. Technical Report 03-01. Copenhagen (Denmark): Danish Meteorological Institute - DMI; Solar-Terrestrial Physics Division, 2003.
- Feldstein, Y. I., Vorobjev, V. G., Zverev, V., Förster, L. M. (2014). Investigations of the auroral luminosity distribution and the dynamics of discrete auroral forms in a historical retrospective. *History of Geo- and Space Sciences* 5, 81–134.
- Galilei, G., Scheiner, C. (2010). *On Sunspots*. Translated and introduced by Eileen Reeves and Albert Van Helden. Chicago: University of Chicago.
- Geese, A., Auster, U., Korte, M. (2011). DI3 – A new procedure for absolute directional measurements. Proceedings of the XIV IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing, Changchun (China): Changchun Magnetic Observatory, 13 – 23, September, 2010. Editor Pieter B Kotzè. *Data Science Journal* 10, IAGA47-IAGA51.
- Ghilani, D. C. (2004). *Astronomical Observation Handbook*. University Park (PE, US): Pennsylvania State University.
- Glassmeier, K.-H., Tsurutani, B. T. (2014). Carl Friedrich Gauss – General Theory of Terrestrial Magnetism – a revised translation of the German text. *History of Geo- and Space Sciences* 5, 11–62.
- Gu, Z., Zhan, Z., Gao, J., Yao, T., Han, W. (2006). Application of GPS in geomagnetic survey. *Earth Planets Space* 58, 723–729.
- Hasegawa, H., Retino, A., Vaivads, A., Khotyaintsev, Y., Andre, M., Nakamura, T. K. M., Teh, W.-L., Sonnerup, B. U. O., Schwartz, S. J., Seki, Y., Fujimoto, M., Saito, Y., Reme, H., Canu, P. (2009). Kelvin-Helmholtz waves at the Earth's magnetopause: Multiscale development and associated reconnection. *Journal of Geophysical Research* 114, A12207.
- Hegymegi, L. (2006). Problems of supply in DI-flux instrument. *Geomagnetics for Aeronautical Safety; A Case Study in and around the Balkans*. NATO Security through Science Series. Editors: Jean L. Rasson, Todor Delipetrov. Springer, 167-175.
- INTERMAGNET Technical Reference Manual (2012). Version 4.6. Edited by: Benoît St-Louis. Edinburgh (UK): British Geological Survey.

- JCGM 200:2008 (2008). International vocabulary of metrology – Basic and general concepts and associated terms (VIM). Third edition. International Bureau of Weights and Measures (BIPM); Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM).
- Jankowski, J., Sucksdorff, C. (1996). IAGA Guide for Magnetic Measurements and Observatory Practice. Boulder (US): International Association of Geomagnetism and Aeronomy.
- Kerridge, D. (2007). Magnetic Observatories in the 21st Century: an Endangered Species? XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Belsk, 19-24 June 2006. Monographic Volume C-99 (398). Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences C-99 (398).
- Korepanov, V. (2006). Geomagnetic instrumentation for repeat station survey. Geomagnetism for Aeronautical Safety; A Case Study in and around the Balkans. NATO Security through Science Series. Editors: Jean L. Rasson, Todor Delipetrov. Springer, 145-166.
- Korte, M., Manda, M., Linthe, H.-J., Hemshorn, A., Kotzé, P., Ricaldi, E. (2009). New geomagnetic field observations in the South Atlantic Anomaly region. *Annals of Geophysics* 52, 65-81.
- Lanza, R., Meloni, A. (2006). The Earth's Magnetism. An Introduction for Geologists. Berlin; Heidelberg: Springer.
- Lauridsen, E. K. (1985). Experiences with the DI-fluxgate Magnetometer Inclusive Theory of the Instrument and Comparison with Other Methods. Volume 71 of *Geofysiske meddelelser*. Copenhagen; Danish Meteorological Institute.
- Lockwood, M., Forsyth, R. B., Balogh, A., McComas, D. J. (2004). Open solar flux estimates from near-Earth measurements of the interplanetary magnetic field: comparison of the first two perihelion passes of the Ulysses spacecraft. *Annales Geophysicae* 22 (4), 1395-1405.
- Marsal, S., Torta, J. M. (2007). An evaluation of the uncertainty associated with the measurement of the geomagnetic field with a D/I fluxgate theodolite. *Meas. Sci. Technol.* 18, 2143-2156.
- Matzka, J., Hansen, T. L. (2007). On the Various Published Formulas to Determine Sensor Offset and Sensor Misalignment for the DI-flux. XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Belsk, 19-24 June 2006. Monographic Volume C-99 (398). Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences C-99 (398).
- Matzka, J., Chulliat, A., Manda, M., Finlay, C. C., Qamili, E. (2010). Geomagnetic Observations for Main Field Studies: From Ground to Space. *Space Sci. Rev.*
- Newitt, L. (2007a). Survey of Magnetic Observatory Charging Practices. XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Belsk, 19-24 June 2006. Monographic Volume C-99 (398). Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences C-99 (398).
- Newitt, L. (2007b). A Search for Users of Magnetic Observatory Data. XII IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition and Processing. Belsk, 19-24 June 2006. Monographic Volume C-99 (398). Publications of the Institute of Geophysics, Polish Academy of Sciences C-99 (398).
- Newitt, L.R., Barton, C.E., Bitterly, L. (1996). IAGA Guide for Magnetic Repeat Station Surveys. Boulder (CO, US): NOAA Space Environment Center; International Association of Geomagnetism and Aeronomy; Working Group V-8: Analysis of the Global and Regional Geomagnetic Field and its Secular Variation.
- Nixon, R. P. (2011). Using sun observations to set an azimuth combining and comparing Automatic Target Recognition in a Total Station with GPS observed time and position. Project Dissertation. Course ENG4111/2 – Research Project. Toowoomba (Australia): University of Southern Queensland; Faculty of Engineering and Surveying.
- Rasson, L. Jean. (2005). About Absolute Geomagnetic Measurements in the Observatory and in the Field. Bruxelles: L'Institut Royal Meteorologique de Belgique.
- Rasson, L. J. (2007). Manual for Tavistock DIFLUX Absolute Measurements of Geomagnetic Declination and Inclination. Karachi Magnetic Observatory. Training course at SUPARCO (Space and Upper Atmosphere Research Commission) headquarters, Karachi, Pakistan, November 6 – 14, 2007. Dourbes (Belgium): Institut Royal Météorologique de Belgique.

- Rasson, L. J., Van Loo, S. (2007). New Concepts in Geomagnetic Observatories Operation. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc.*, **C-99** (398).
- Sabine, E. (1852). On Periodical Laws Discoverable in the Mean Effects of the Larger Magnetic Disturbances. No. II. *Phil. Trans. R. Soc. Lond.* 142, 103- 124.
- Sapunov, V., Rasson, J., Denisov, A., Saveliev, D., Kiselev, S., Denisova, O., Podmogov, Y., Khomutov, S. (2006). Theodolite-borne vector Overhauser magnetometer: DIMOVER. *Earth Planets Space* 58, 711–716.
- SILSO (2015). Sunspot number series: latest update [online]. World Data Center for the production, preservation and dissemination of the international sunspot number. Brussels (Belgium): Royal Observatory of Belgium; SILSO - Sunspot Index and Long-term Solar Observations. <http://www.sidc.be/silso/home> (30. 09. 2015).
- Stern, P. D. (2002). A Millennium of Geomagnetism. *Reviews of Geophysics* 40 (3), B1-B30.
- Svalgaard, L., Cliver, E. W. (2007). Long-term geomagnetic indices and their use in inferring solar wind parameters in the past, *Adv. Space Res.* 40, 1112-1120.
- Turbitt, C., Baillie, O., Kerridge, D., Clarke, E. (2011). An investigation into techniques for isolating noise in observatory data. *Proceedings of the XIV IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing, Changchun (China): Changchun Magnetic Observatory, 13 – 23, September, 2010.* Editor Pieter B Kotzè. *Data Science Journal*, 10, IAGA174-IAGA182.
- Urad za standardizacijo in meroslovje (1999). *Mednarodni slovar osnovnih in splošnih izrazov s področja meroslovja.* Ljubljana: Urad RS za standardizacijo in meroslovje.