

USPOREDBA MJERENJA DNEVNE PROMJENE S DVA JEDNAKA MODELA MAGNETOMETARA

Tihomir GREGL¹ i Gordan BRZICA²

¹Rudarsko-geološko naftni fakultet Sveučilišta u Zagrebu, Pierottijeva 6, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

²INA-Naftaplin, Šubićeva 29, HR-10000 Zagreb, Hrvatska

Ključne riječi: Geomagnetika, Protonski magnetometar, Kvaliteta mjerenja, Korekcija instrumenta

Uvodeći nove protonske magnetometre bilo je potrebno upoznati i njihovu kvalitetu i odrediti korekciju instrumenta. Zbog toga se s oba magnetometra mjerila dnevna promjena tijekom osam sati. Rezultati mjerenja su komparirani i dobivene su razlike dale krivulju normalne distribucije.

Key-words: Geomagnetic, Proton magnetometers, Measurement quality, Instrument calibration

Introducing late proton magnetometers, it was necessary to determine their quality and instrument calibration. Therefore, both magnetometers were measuring daily variation during the eight hours. Obtained results were compared and differences follow normal distribution curve.

Uvod

Posljednjih godina širom se svijeta bilježi sve veći i brži napredak mjerne tehnike a posebno elektronike. Razvojem elektronike došlo je do primjene tranzistora i integriranih krugova u konstrukciji električnih mjernih instrumenata. Ovi proizvodi suvremene elektronske tehnologije ulaze sve brže u sva područja ljudske djelatnosti, pa tako i u geofizičke metode istraživanja. Time je omogućena njihova primjena za mjerenja na terenu. Digitalne mjerne aparature i automatska obrada podataka mjerenja koriste se danas kod rada s gotovo svim geofizičkim metodama. Ovaj napredak omogućuje pristup rješavanju sve složenijih problema koji su se »do jučer« smatrali nerješivim (Kruc, 1970; Kruc & Gregor, 1973). Danas se u primijenjenoj geomagnetici najčešće rabe protonski magnetometri. Razvojem konstrukcije instrumenata za mjerenje jakosti magnetskog polja Zemlje povećala se njihova osjetljivost.

Instrumenti

Ova su mjerenja izvedena s dva protonska magnetometra firme Gem Systems Inc. Canada model GSM-18. Ovaj model ima ugrađen mikroprocesor i memoriju. To ovim instrumentima omogućuje da mjerenja izvrše sporadično prema naredbi ili automatski i kontinuirano u programiranom vremenu. Mjerenje u programiranom vrijeme omogućuje im sinkrono mjerenje dnevne promjene magnetskog polja Zemlje (dnevna promjena) na bazi, s mjerenjem na terenu. Izmjerene podatke pohranjuju u memoriju. Po završetku mjerenja izvrše korekciju mjerenja na terenu s dnevnom promjenom izmjerenom na bazi. Te sve podatke može se reproducirati na pokazivač, pisač ili disketu. (Hrvoić, 1987). Instrumenti imaju osnovnu rezoluciju od 0.1 nT, a omogućuju brza mjerenja. Najmanji period je 3 sekunde između pojedinih mjerenja, jer neophodno minimalno vrijeme za polarizaciju iona u tekućini senzora je oko 2 s, a vrijeme za mjerenje magnetskog polja se kreće od 0.1 do 1 s (Brođovoj et al., 1980). Senzor nije potrebno horizontalirati ni orijentirati (Hrvoić, 1972).

Pogreške mjerenja

Opažanja na kojima se zasnivaju odgovarajući zaključci nisu potpuno točna, pa prema tome neće biti potpuno točni ni rezultati i zaključci. Dobivanje jednoznačnih rezultata za tražene veličine glavni je zadatak i svrha računa izjednačenja (Čubranić, 1958). Važan je zadatak dati i ocjenu točnosti mjerenja i rezultata. Zbog

toга treba upoznati instrumente (kvalitetu i broj), metodu mjerenja i teoriju računa izjednačenja, kako bi se iz relativno pogrešnih mjerenja dobio što točniji rezultat. Za točnija će mjerenja biti potrebno i više vremena za opažanje. Danas se mjerenja gotovo isključivo izjednačuju metodom najmanjih kvadrata.

»Vjerojatno prvi, koji se bavio problemom izjednačenja, bio je Ruder Bošković. Za princip izjednačenja postavio je zahtjev, da suma apsolutnih vrijednosti pogrešaka bude minimum, tj. da $\sum |w| = \text{minimum}$ (1755)« (Čubranić, 1958). Zbog raznih okolnosti javnosti to nije dovoljno poznato, već se kao autori metode najmanjih kvadrata citiraju A. M. Legendre (1806) i C. F. Gauss (1809) koji je najviše pridonio rješenju ovog problema.

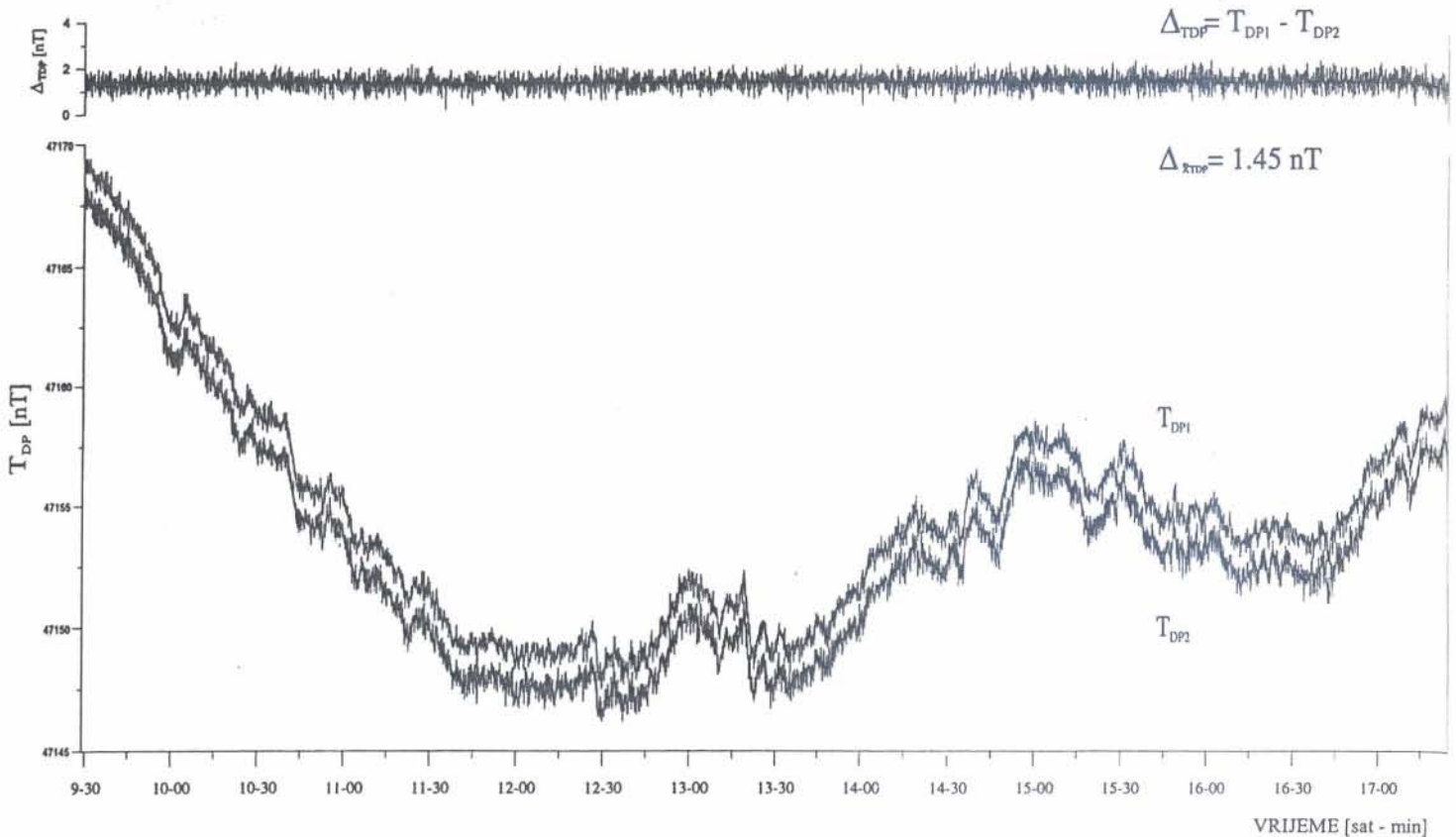
Ponavljajući mjerenja dobivat ćemo rezultate koji će se više ili manje razlikovati tj. dolazimo do saznanja da su naša mjerenja više ili manje pogrešna. Same pogreške po svom karakteru dijele se na grube, sistematske i slučajne (Čubranić, 1958):

- uzroci grubih pogrešaka su nepažnja i nemarnost opažачa, loša pomagala, greške u radu instrumenata i nedovoljno stručno znanje. Grube pogreške uklanjaju se ponavljanjem mjerenja. Gruba pogrešna mjerenja nastoje se izbaciti kako ne bi utjecala na rezultat. Međutim, prije izbacivanja takvo mjerenje treba proučiti, ispitati i naći razlog zašto je došlo do te grube pogreške;

- najčešći uzroci sistematskih pogrešaka su netočnost mjera i instrumenata kojima obavljamo mjerenja. Uzroke takvih pogrešaka nastojim već prije mjerenja otkloniti. Kod magnetometara GSM-18 to se postiže kontrolom rada instrumenata i uvođenjem korekcije instrumenta u njegovu memoriju;

- slučajne pogreške nose karakter slučajnosti i one mogu biti i pozitivne i negativne. Na veličinu ovih pogrešaka djeluju razni uzroci koji se ne mogu ispitati i odrediti im veličinu. Budući da se te pogreške ne mogu izbjeći, nazivaju se neizbježnim. Slučajne pogreške su predmet računa izjednačenja (metoda najmanjih kvadrata).

Granice koje karakteriziraju pojedine vrste mjerenja nazivaju se dopuštena odstupanja. Ona su uvjetovana svrhom i metodom rada. Prema tome da bi se rezultatima i zaključcima dala veća sigurnost i točnost, izvodi se veći broj mjerenja nego što je to neophodno potrebno, dakle uvijek obavljamo prekobrojna mjerenja. Zadatak računa izjednačenja je na osnovi izmjerenih veličina

Sl. 1. Podaci mjerenja dnevne promjene s dva ista modela magnetometra (T_{DP1} i T_{DP2}) i njihova razlika (Δ)Fig. 1. Daily magnetic field variation registered using two magnetometers (T_{DP1} and T_{DP2}) and calculated differences (Δ)

pronaći rezultat koji će što bolje definirati traženu veličinu.

Osnovni zakoni slučajnih pogrešaka proizlaze iz teorije vjerojatnosti što slijedi iz:

1. vjerojatnost pojave pogreške $+w$ ista je kao i vjerojatnost pojave pogreške $-w$;

2. manje pogreške bit će češće od većih, jer pojava malih pogrešaka ima veću vjerojatnost nego pojava većih pogrešaka;

3. slijedom t. 1 kod velikog broja mjerenja aritmetička sredina slučajnih pogrešaka mjerenja jedne te iste veličine teži k nuli.

Nastavljajući razmatranje slijedi da će se slučajne pogreške pokoravati zakonu normalne razdiobe.

Gauss je za ocjenu kvalitete točnosti uveo srednju kvadratnu pogrešku (u statistici se naziva varijanca):

$$m^2 = \frac{w_1^2 + w_2^2 + \dots + w_N^2}{N} \quad (1)$$

i srednju pogrešku (u statistici se naziva standardna devijacija):

$$m = \sqrt{\frac{[ww]}{N}} \quad (2)$$

Postotak slučajnih pogrešaka uključenih u odgovarajuće granice mijenjat će se ovisno o rasponu promatranih granica. Tako na primjer u granicama od:

0 do $\pm 1 \times m$ bit će uključeno:	68.27% pogrešaka
0 do $\pm 2 \times m$	95.45%
0 do $\pm 3 \times m$	99.73%
0 do $\pm 4 \times m$	99.99%

U praksi se za maksimalnu dopuštenu pogrešku uzima za granice veličina $3 \times m$ t. j. trostruki iznos srednje pogreške. Ako neko mjerenje prijeđe tu granicu, kaže se da je grubo pogrešno.

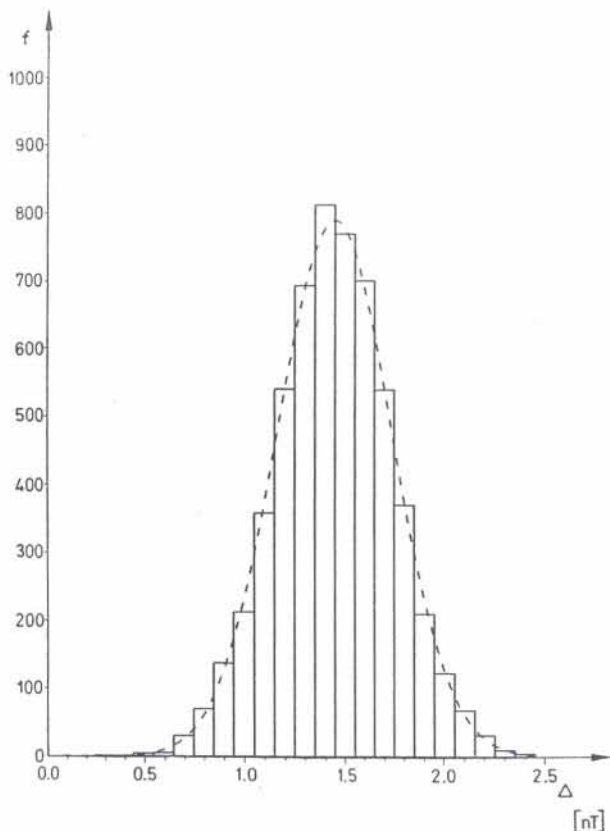
Dokaz za ovu teoriju izvodi se na temelju neizmjernog broja jednako točnih mjerenja. U praksi se moramo zadovoljiti ograničenim brojem mjerenja. Ako su ova mjerenja iste točnosti, to će se najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine (L_m) dobiti po teoriji najmanjih kvadrata, uz uvjet da suma kvadrata odstupanja (v) i rezultata mjerenja (1) bude minimum ($v = L_m - 1$). Rješavajući gornji uvjet dolazi se do zaključka da je kod direktnih mjerenja jednake točnosti najvjerojatnija vrijednost mjerene veličine (L_m) aritmetička sredina svih mjerenja (Macarol, 1959). Tada je srednja pogreška pojedinog mjerenja jednaka:

$$m = \pm \sqrt{\frac{[vv]}{N-1}} \quad (3)$$

Srednja pogreška najvjerojatnije vrijednosti mjerene veličine je:

$$M = \frac{m}{\sqrt{N}} \quad (4)$$

Iz ove se formule može uočiti da se srednja pogreška M smanjuje s kvadratnim brojem mjerenja. Povećanjem broja mjerenja, srednja pogreška mjerenja M teži k nuli, a najvjerojatnija vrijednost (L_m) približava se pravoj vrijednosti, te bi za neizmjerni broj mjerenja poprimila pravu vrijednost.



Sl. 2. Poligon distribucije frekvencija razlike mjerenih podataka i teoretskih frekvencija za normalnu razdiobu
 Fig. 2. Comparison of calculated differences with the theoretical normal distribution function

Mjerenje dnevne promjene

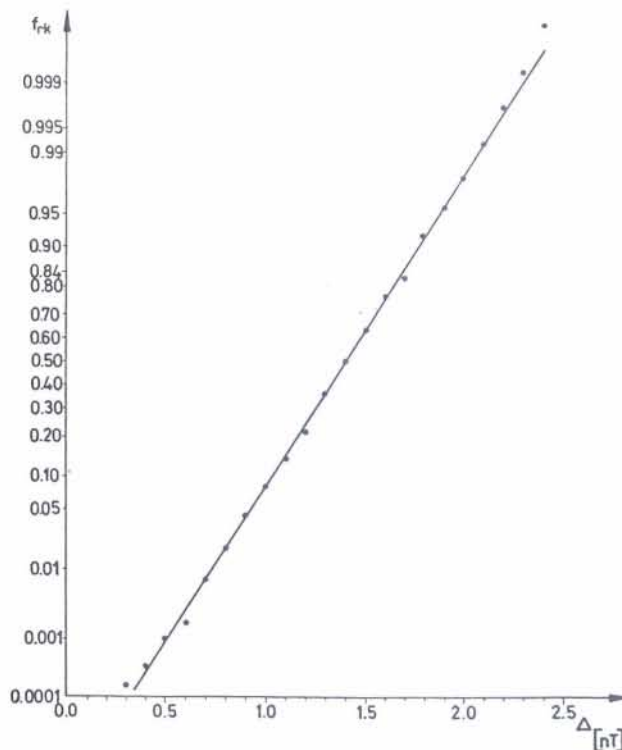
Protonski magnetometri mjere jakost totalnog magnetskog polja Zemlje, a izmjerena vrijednost označena je simbolom T_m . Magnetsko polje Zemlje mijenja se vremenski i prostorno. Promjena magnetskog polja Zemlje tijekom dana ima oznaku T_{DP} .

Dnevna promjena (T_{DP}) mijenja se tijekom dana, a svaki dan je drugačije vrijednosti (Breiner, 1973). Dnevne se promjene mogu dobiti od geomagnetskog opservatorija ili ih možemo sami izmjeriti.

Korištenje podataka o dnevnoj promjeni iz geomagnetskog opservatorija je nepraktično jer zbog dostave kasni obrada podataka, potrebno ih je korigirati s obzirom na astronomsko vrijeme, podaci se mijenjaju udaljavanjem od opservatorija itd.

Najbolje rezultate dobijemo kada se mjeri s više instrumenata. Tada jedan instrument ostaje u bazi i mjeri dnevnu promjenu, a drugi mjeri(e) po terenu. Najkvalitetniji je rezultat kada se sinkrono (automatski) mjeri dnevna promjena i izvodi premjer terena, kao što je slučaj kada se mjeri s magnetometrima model GSM-18.

U cilju usporedbe podataka mjerenja između dva magnetometra izvršeno je mjerenje dnevne promjene s magnetometrima modela GSM-18 u blizini PD »Graficar« na Medvednici. Magnetometri su bili na međusobnoj udaljenosti od 4 metra. Instrumenti su sinkrono mjerili svakih 5 sekundi, a opažanje je izvršeno od 9-28-30 do 17-29-10 (sati-minute-sekunde). Za analizu su odabrani podaci između 9-29-00 i 17-29-



Sl. 3. Henryjev pravac
 Fig. 3. Henry's line

00 sati, što iznosi 8 sati. Budući su opažanja izvršena svakih 5 sekundi, to je za analizu od svakog instrumenta bio na raspolaganju 5761 podatak (Gregl, 1997).

Navedeni magnetometri pokazuju (u svojoj memoriji), između raznih podataka, i podatak koliko se neko mjerenje razlikuje od prethodnog. Pregledavajući te podatke moglo se primijetiti da se te razlike međusobno malo razlikuju. Međutim, kod magnetometra broj 6744 mogla se uočiti povremena pojava povećanog očitka (najveći je bio 56.3 nT), dok bi slijedeći očitak bio ponovno u redu veličina ostalih iznosa. Ako se za ta vremena povećanih iznosa uspoređi što se događa s podacima dnevne promjene na drugom magnetometru, vidi se da su ovdje svi podaci istog reda veličine (< 1 nT). Iz toga se može izvući zaključak da instrument broj 6744 povremeno izvrši opažanje s grubom pogreškom. U promatranom vremenskom intervalu bilo je 19 podataka s grubom pogreškom. Za donju granicu takvih grubih pogrešaka pretpostavljen je iznos od 2.4 nT, što se nakon obrade mjerenih podataka pokazalo ispravno. Podaci za koje se pretpostavlja da su grube pogreške su zamijenjeni, pa su umjesto njih uzeti iznosi aritmetičkih sredina između susjednih podataka.

Podaci mjerenja (T_{DP1} i T_{DP2}) prikazani su na slici 1 (zbog velikog broja podataka, a malog prostora slika nije dovoljno čitljiva). Iz slike se može uočiti da su dijagrami podataka oba magnetometra razmaknuti. Kada bi magnetometri bili jednako kalibrirani, tada bi podaci bili istog reda veličina. Zbog toga se može zaključiti da su podaci mjerenja, osim s grubim pogreškama, opterećeni i sa slučajnim i sistematskim pogreškama.

Za podatke dnevne promjene za oba instrumenta izračunate su njihove aritmetičke sredine, koje iznose:

$$\bar{x}_{DP1} = 47154,71 \text{ nT}$$

$$\bar{x}_{DP2} = 47153,26 \text{ nT}$$

a razlika tih aritmetičkih sredina je:

$$\bar{\Delta} = 1,45 \text{ nT}$$

Za uočavanje zakonitosti razlike opažanja dnevne promjene, između svih podataka mjerenja oba magnetometra, izračunata je razlika:

$$\Delta = T_{DP1} - T_{DP2} \quad (5)$$

Izračunavši

$$\Delta_{\max} = 2,4 \text{ nT}$$

$$\Delta_{\min} = 0,3 \text{ nT},$$

utvrđen je raspon podataka koji je podijeljen u intervale od 0,1 nT, tako da je prvi razred u granicama od 0,25 do 0,35, a zadnji od 2,35 do 2,45 nT. Podjelom u takve intervale dobilo se 22 razreda, za izračunavanje distribucije frekvencija.

Na slici 2 prikazan je poligon distribucije frekvencija (f) mjerenih podataka.

Za razlike mjerenih podataka (Δ) izračunate su:

- srednja pogreška pojedinog mjerenja $m = 0,288 \text{ nT}$
- srednja pogreška mjerene veličine $M = 0,00379 \text{ nT}$
- koeficijent asimetrije $\alpha_3 = -0,015$
- koeficijent spljoštenosti $\alpha_4 = 3,042$

Kada se kumulativne relativne frekvencije (f_{rk}) mjerenih podataka ucrtaju u papir vjerojatnosti, vidi se, da se one nalaze na Henryjevom pravcu (slika 3).

Netom navedeni rezultati ukazuju kako navedeni skup podataka poštuje normalnu razdiobu. Za tu je razdiobu izračunata i teoretska raspodjela frekvencija koja je također prikazana na slici 2.

Za tu normalnu razdiobu izračuna je i χ^2 -test koji iznosi:

$$\chi^2 = 14,248$$

te vjerojatnost:

$$0,50 < P(14,248) < 0,70$$

U intervalu od $\bar{\Delta} \pm 1,96 \times m = \bar{\Delta} \pm 0,56 = 0,89$ do 2,01 nalazi se 95% svih vrijednosti slučajne varijable, a za vjerojatnost od 99,73% interval iznosi $\bar{\Delta} \pm 3 \times m = \bar{\Delta} \pm 0,86 = 0,59$ do 2,31 nT.

Iz izračunate vjerojatnosti može se zaključiti »...da razlike između empiričkih i teoretskih frekvencija nisu prevelike, naime takva odstupanja mogu nastati posve slučajno.« (Pavlić, 1962). Znači da χ^2 -test pokazuje da se može ostati pri pretpostavci da se promatrani empirički skup pokorava zakonu normalne razdiobe.

Kao što je naprijed navedeno odnos $\bar{\Delta} \pm 3 \times m$ dijeli grube pogreške od slučajnih. Iz toga se može zaključiti da je dobro odabrana granica od 2,4 nT koja dijeli grube pogreške od slučajnih. Budući su razlike Δ rasporedene

u normalnoj razdiobi, to će 99,73% podataka biti između 0,59 i 2,31 nT.

Dobivena razlika aritmetičkih sredina $\bar{\Delta} = 1,45 \text{ nT}$ je zapravo korekcija magnetometra. Ako se ovaj iznos, u pripremi instrumenata za rad, uvrsti kao korekcija instrumenta, tada će magnetometri izvesti opažanja na istoj razini.

Zaključak

Posljednjih godina širom svijeta bilježi se sve veći i brži napredak mjerne tehnike, čime se poboljšavaju rezultati mjerenja, što zahtijeva nove pristupe u metodologiji obrade podataka i interpretaciji. Razvojem u konstrukciji magnetometara povećala se njihova osjetljivost, čime se omogućuje mjerenje i magnetskog polja manjeg intenziteta.

Mjerenja su izvedena s dva protonska magnetometra firme Gem Systems Inc. Canada model GSM-18. Kvalitetu upotrebljenih magnetometara utvrdilo se istovremenim mjerenjem dnevne promjene s oba magnetometara koji su postavljeni na razmaku od 4 metra. Obračun mjerenih podataka je izvršen pomoću razlike podataka mjerenja s oba magnetometara. Te se razlike pokoravaju normalnoj razdiobi, a srednja pogreška mjerenja $m = 0,288 \text{ nT}$. Iz razlike aritmetičkih sredina podataka mjerenja od oba magnetometra dobila se korekcija magnetometra koja iznosi $\bar{\Delta} = 1,45 \text{ nT}$ (sistem-ska pogreška). Konstatiralo se da magnetometri povremeno izvrše mjerenja i s grubom pogreškom koja je veća od $\bar{\Delta} + 3 \times m = 2,31 \text{ nT}$.

Primljeno: 1990-01-20

Prihvaćeno: 1999-09-14

LITERATURA

- Breiner, S. (1973): Application Manual for Portable Magnetometers. Geometrics, 64 str. Sunnyvale.
- Brodovoj, V. V., Dobrohotova, N. D., Kovalenko, N. D., Ljahov, L. L. i Jakubovskij, Ju. V. (1980): Rukovodstvo po učebnoj geofizičkoj praksi – Elektorazvedka, magnitorazvedka. Nedra, 60 sr. Moskva.
- Čubranić, N. (1958): Račun izjednačenja. Tehnička knjiga, 211 str., Zagreb.
- Gregl, T. (1997): Analiza kvalitete geomagnetskih istraživanja s obzirom na utjecaj dnevnih promjena i bliskih magnetskih materijala. Disertacija, 147 str. Rudarsko-geološko-naftni fakultet, Zagreb.
- Hrvoić, I. (1972): Mjerenje slabih magnetskih polja dinamičkom polarizacijom protona. Disertacija, 153 str. ETF, Zagreb.
- Hrvoić, I. (1987): GSM-18 proton precession magnetometer instruction manual. GEM systems Inc, 31 str. Richmond Hill.
- Krulić, Z. (1970): Današnje stanje i tendencije daljnjeg razvoja praktične geofizike. *Geol. glasnik*, 14, 309–331 Sarajevo.
- Krulić, Z. & Gregor, S. (1973): Suvremena primijenjena geofizika: današnje stanje i tendencije daljnjeg razvoja. *Geol. vjesnik*, 26, 311–318 Zagreb.
- Macarol, S. (1959): Praktična geodezija. Tehnička knjiga, 343 str., Zagreb.
- Pavlić, I. (1970): Statistička teorija i primjena. Tehnička knjiga, 343 str., Zagreb.

Comparison of Magnetic Field's Daily Variation Using two Magnetometers

T. Gregl and G. Brzica

Quick development in the measurement's techniques during the recent years resulted in obtaining more precise survey results, as well as in development of new methods of their processing and interpretation. Progress in magnetometer's design resulted in increase of their sensitivity, that allowed accurate survey even of magnetic fields of very low intensity.

The survey was performed using two proton magnetometers made by Gem System Inc., Canada. Model GSM-18. Their quality was tested

by measurement of daily variation of magnetic field using two such magnetometers located 4 m apart. Obtained results were compared on the basis of calculated differences in measured values on both magnetometers. The differences follows normal (Gaussian) distribution curve with average error equal to $m=0.288$ nT. The magnetometer measurement correction, i. e. calculated using these results, is $\bar{\Delta}=1.45$ nT. However, occasionally measured data using two magnetometers has error greater than $\bar{\Delta} + 3 \times m = 2.31$ nT.