ALTERNATOR
Misliti znanost.

Zemljino magnetno polje in njegovo opazovanje v Sloveniji

8. 5. 2025

Number: 08/2025

Author:

- Rudi Čop



Foto: Aaron Marko

Geomagnetizem proučuje izvor in lastnosti magnetnega polja Zemlje. Kot vsi magneti ima tudi naš planet svoj severni in južni pol. Severni magnetni pol je blizu južnega geografskega pola, medtem ko je južni magnetni pol v bližini severnega geografskega pola. Magnetna pola (https://sites.ualberta.ca/~vadim/Publications-Kravchinsky_files/2014-Geomagnetism-Springer.pdf) nista popolnoma eden nasproti drugemu; premikata se neodvisno in vsak s svojo hitrostjo. V južnem delu Atlantskega oceana se pri tem ustvarja obsežna magnetna depresija (https://www.scielo.br/j/aabc/a/w8TwzbXdFMhtn64wLxnJXZw/?format=pdf&lang=en) . Magnetno polje Zemlje počasi slabi, na ozemlju Slovenije pa se lokalno krepi. Od leta 2015 se je tako pri nas gostota magnetnega polja z vrednosti 47.379,40 nT v štirih letih v povprečju povečala za 43,19 nT na leto [1 nT = 10^{-9} tesla = 1 gama].

Delo na področju geomagnetnih meritev je najpogosteje vezano na obravnavo preteklih dogodkov, ki so neponovljivi in edinstveni za posamezno merilno mesto. Deli se na delo v observatorijih in na delo, vezano na proučevanje fizike Zemlje, ki zahteva meritve v širšem prostoru. Pri obravnavi celotnega geomagnetnega polja so danes potrebne tako meritve geomagnetnih observatorijev na površini Zemlje kot tudi meritve v bližnjem vesolju. Stanje geomagnetnega polja je posledica medsebojnega delovanja naravnih sistemov, ki jih sicer proučujemo ločeno: Sonca, sončevega vetra, magnetosfere, ionosfere in magnetnega polja, ki ga ustvarja notranjost Zemlje (Amory-Mazaudier 2022 (https://doi.org/10.3390/atmos13101699)).

Najpogosteje in v največjih količinah se merilni podatki o stanju lokalnih magnetnih polj uporabljajo v magnetnem nadzoru za odkrivanje rudnih in naftnih nahajališč ter podzemnih zalog vode. Merilni podatki o stanju lokalnega magnetnega polja so potrebni tudi pri geološkem vrtanju, predvsem v naftni industriji. Za usmerjanje zaslonov navigacijskih radarjev in za korekcijo inercialnih kompasov se uporabljajo izključno senzorji geomagnetnega polja. Ko je magnetni kompas umerjen, je to najbolj zanesljiv in robusten merilni instrument, zato je to izhodiščni navigacijski instrument tako na ladjah kot tudi na letalih. Po magnetnih meridianih so orientirane vse pristajalne steze letališč v Sloveniji, večja med njimi pa imajo meridian na pristajalni stezi tudi označen s številko.

Merilni podatki o stanju Zemljinega magnetnega polja z različnih merilnih mest med seboj niso primerljivi. Za to primerjavo se uporabljajo geomagnetni indeksi (https://www.geodetski-vestnik.com/arhiv/59/4/gv59-4_cop.pdf) , ki se izračunavajo iz spremembe horizontalne komponente magnetnega polja. Na vrhu seznama uporabnikov teh indeksov so upravljavci velikih elektroenergetskih sistemov, naftovodov, plinovodov in vodovodov. Te indekse se redno spremlja (https://www.swpc.noaa.gov/sites/default/files/images/FINAL%20SWPC%20User%20Needs%20Report-1.pdf) pri sodobnih geodetskih merjenjih in pri uporabi navigacijskih naprav GNSS (angl. *Global Navigation Satellite Systems*) v vseh transportnih sistemih. Sistemi GNSS so danes primarni navigacijski sistem, ki uporabniku posreduje podatke o njegovi poziciji in hitrosti ter o točnem času. Magnetni navigacijski sistemi, ki izkoriščajo geomagnetno polje, pa omogočajo določanje smeri v prostoru.

Pomen geomagnetnih meritev je pri nas v večini primerov spregledan, čeprav se vsakodnevno na široko uporabljajo tako rezultati meritev Zemljinega magnetnega polja kot njihovi produkti v obliki indeksov. Pozablja se tudi, da živimo v magnetnem polju Zemlje in smo zato od njega odvisni. Biološki senzorji zaznajo spremembo magnetnega polja v celotnem prostoru in ne samo v horizontalni ravnini. Ti senzorji so najbolj raziskani pri bakterijah (https://doi.org/10.1021/cr078258w) , ugotovljeni pa tudi pri višje organiziranih živih bitjih (https://web.gps.caltech.edu/~jkirschvink/pdfs/KirschvinkBEMS89.pdf) . V začetku tega stoletja so trije avtorji pripravili poročilo o napredku pri raziskavah (https://doi.org/10.1007/s10712-006-9010-7) vpliva sprememb magnetnega polja na ljudi. Na osnovi raziskav, ki so bile opravljene v polarnem krogu, je bilo ugotovljeno, da je v vsaki generaciji do 15 % ljudi, ki so izjemno občutljivi na te spremembe. Odstotek je višji pri starejših ljudeh in pri tistih z okvaro življenjsko pomembnih organov. Iz statistične obdelave podatkov, ki so jih zbrali v različnih zdravstvenih ustanovah, so se raziskave preselile tudi v laboratorije, v katerih je lažje nadzirati fizikalne parametre. Te raziskave se odvijajo le v nekaterih državah sveta, zanje pa se je uveljavilo skupno ime: heliobiologija. V preteklem desetletju so na tem področju nadaljevali raziskave o vplivu na naš krvni tlak (https://doi.org/10.3390/ijerph14070770) in na ritem naših možganskih valov (https://doi.org/10.1523/ENEURO.0483-18.2019) .

Zgodovina meritev geomagnetnega polja

V zahodni civilizaciji se je področje geomagnetizma (https://doi.org/10.1029/2000RG000097) začelo razvijati leta 1600, ko je William Gilbert izdal knjigo *De Magnete*. V njej je opisal poskuse s pomočjo krogle iz magnetita, namagnetenega modela Zemlje (lat. *terrella*). Dokazal je, da magnetno polje našega planeta izvira iz njega samega. Kasneje so ugotovili, da se polje spreminja tako glede na kraj kot tudi glede na čas. V sredini osemnajstega stoletja so prepoznali občasne vibracije kompasnih igel v času polarnih sijev, pojav, ki ga danes imenujemo geomagnetna nevihta (Slika 1). Z Magnetnim klubom iz Göttingena (nem. *Magnetischer Verein*) je v obdobju 1836–1841 sodelovalo že 61 observatorijev iz različnih delov sveta. Ti so merili spremembe magnetnega polja po enotni metodi in ob istem dogovorjenem času. Med ustanovitelji Magnetnega kluba je bil tudi Carl Friedrich Gauss, ki je postavil prvi uporabni matematični model magnetnega polja Zemlje (Reich, 2023). Tako geomagnetne meritve kot matematični modeli so bili v zadnjih 425 letih namenjeni predvsem magnetni navigaciji.



Slika 1: Polarni sij, ki je nastal zaradi geomagnetne nevihte najvišje stopnje, fotografiran v Dolenji vasi pri Divači 10. maja 2024 ob 22:31 UTC (foto: Jurij Atanackov). Tako močne magnetne nevihte se v povprečju pojavljajo na vsakih 41 let (https://doi.org/10.1029/2024SW004113) .

Z odkritjem ciklov magnetnih neviht (https://doi.org/10.1098/rstl.1852.0009) na sredini 19. stoletja so se meritve sprememb geomagnetnega polja preobrazile v meritve razmer med središčem Zemlje in središčem Sonca. Poleg izbruhov na Soncu so kot izvor geomagnetnih neviht prepoznali tudi luknje v njegovi koroni. Obstoj teh lukenj so uspeli dokazati šele v drugi polovici preteklega stoletja, in sicer s pomočjo teleskopov v ultravijolični svetlobi na namenskih satelitih. Z odkritjem vzrokov zanje so geomagnetne nevihte začeli tudi napovedovati. V času mednarodnega geofizikalnega leta IGY (angl. *International Geophysical Year*) 1957–1958 se je pospešila gradnja geomagnetnih observatorijev. Na fotografiji (Slika 2) je primer takega geomagnetnega observatorija, zgrajenega v tem času. Leta 1957 je bil izstreljen prvi umetni satelit Sputnik in ustanovljen tudi Svetovni podatkovni center za geomagnetizem (angl. *World Data Centre of Geomagnetism*), ki deluje še danes. V njem so med drugim shranjeni rezultati meritev v geomagnetnem observatoriju v Pulju, ki je deloval od leta 1881 do leta 1922 (WDC 2025 (https://wdc.bgs.ac.uk/data.html)).



Slika 2: Geomagnetni observatorij DOU (Dourbes, Belgija), zgrajen leta 1956: hiša za variabilne meritve (levo) ter hiša za absolutne meritve (desno). Observatorij ima tudi servisno hišo z laboratorijem in skladiščem.

Standardni matematični modeli globalnega magnetnega polja

Mednarodna organizacija IUGG (angl. *International Union of Geodesy and Geophysics*) priporoča čim bolj enakomerno porazdelitev geomagnetnih observatorijev po površini Zemljine oble na 200 km medsebojne razdalje. Pri taki medsebojni razdalji se v geomagnetnem polju dobro ločijo anomalije (https://doi.org/10.1016/0315-0860(79)90100-9) , ki so večje od 400 km. Ta razdalja med observatoriji popolnoma zadošča za spremljanje počasnih sprememb magnetnega polja Zemlje s pomočjo svetovnih magnetnih modelov. Sekularne spremembe se namreč dogajajo v njenem jedru, to je 2900 km globoko pod površjem, kar je precej več kot 400 km. Evropa prispeva več kot polovico (https://doi.org/10.1007/978-90-481-9858-0_1) vseh meritev, potrebnih za vzdrževanje svetovnih geomagnetnih modelov, in to z magnetometri, ki presegajo merilno točnost 1 nT.

Merilni podatki iz satelitov so povečali natančnost in s tem tudi uporabnost modelov magnetnega polja Zemlje. Sateliti, ki se uporabljajo v ta namen, so bili vsi načrtovani in izdelani v Evropi (Matzka 2010 (https://ftp.space.dtu.dk/pub/cfinl/publications/2010_Matzka_Chulliat_Mandea_Finlay_Qamili.pdf)). Med svetovnimi magnetnimi modeli sta najpogosteje uporabljena standardni matematični model IGRF (angl. *International Geomagnetic Reference Field*) in standardni matematični model WMM (angl. *World Magnetic Model*). Model IGRF je namenjen raziskavam notranjosti Zemlje, njene skorje, ionosfere in magnetosfere (IGRF 2025 (https://www.ncei.noaa.gov/products/international-geomagnetic-reference-field)), model WMM pa navigaciji, in sicer kot referenca za višino in usmeritev v prostoru (WMM 2025 (https://geomag.bgs.ac.uk/research/modelling/WorldMagneticModel.html)). Slovenija po zemljepisni širini komaj presega 160 km, po dolžini pa 250 km. Po svojih dimenzijah je torej precej manjša od 400 km, manjše pa so tudi razdalje do najbližjih geomagnetnih observatorijev v tujini. Rezultati svetovnih modelov magnetnega polja zato na ozemlju Slovenije ne dosegajo take natančnosti, kot jo ti modeli omogočajo. Manj natančne so predstavitve magnetnih anomalij pa tudi označevanje smeri za potrebe pomorske in letalske navigacije ter usmeritev anten, vrtalnih naprav in različnih prenosnih informacijskih sistemov z elektronskimi zemljevidi.

Meritve magnetnega polja v Sloveniji

Po razpadu Avstro-Ogrske je bil leta 1919 v Ljubljani ustanovljen Zavod za meteorologijo in geodinamiko, po drugi svetovni vojni pa je iz njega nastal Meteorološki zavod Republike Slovenije. V letu 2001 se je takratni Hidrometeorološki zavod Slovenije preoblikoval v Agencijo Republike Slovenije za okolje, ki deluje v skladu z ustreznim zakonom, s katerim je urejena državna meteorološka, hidrološka, oceanografska in seizmološka služba (ZDMHS 2017 (https://www.uradni-list.si/glasilo-uradni-list-rs/vsebina/2017-01-2879)). Že iz nazivov teh ustanov je mogoče razbrati, da se je področje

geomagnetizma v Sloveniji razvijalo zelo omejeno.



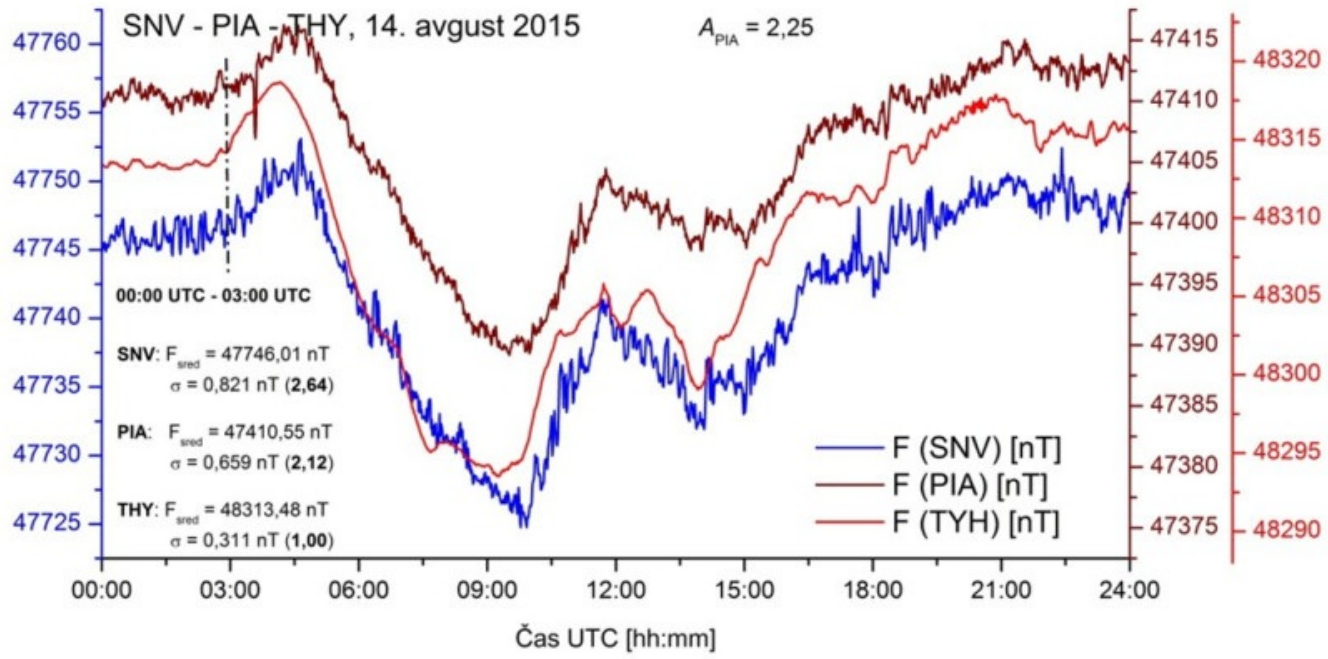
Slika 3: Določanje značilnih parametrov na merilnem kamnu za absolutne meritve. Predhodne meritve za geomagnetni observatorij PIA (Piran, Slovenija), ki so bile dokončane v letu 2019.

Po drugi svetovni vojni je za geomagnetne meritve (http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2020/SZGG_IAGA_25_let_v_Sloveniji-Cop.pdf) na celotnem ozemlju nekdanje Jugoslavije skrbel Geomagnetni zavod Grocka blizu Beograda. Po razpadu skupne države je ta zavod nadaljeval meritve le še na ozemlju Srbije in Črne gore. Prizadevanja, da bi se tudi v drugih republikah nekdanje Jugoslavije nadaljevalo geomagnetne meritve in postavilo geomagnetne observatorije, so se v prvem desetletju tega stoletja začela na Hrvaškem, v Severni Makedoniji in Sloveniji. Njihov razvoj je bil v vseh treh državah precej podoben in prepuščen tako imenovanemu prostemu trgu. Odločitve z dolgoročnimi posledicami so bile izključno poslovne. Pri tem se ni upoštevalo, da se je v zadnji polovici stoletja prav geomagnetizem, poleg astronomije in znanja o bližnjem vesolju, od vseh področij znanosti nadpovprečno hitro razvijal.

Gradnjo geomagnetnega observatorija SNV (Sinji vrh) na ozemlju Slovenije smo začeli po začetnih pripravah (https://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-1-4020-5025-1_8) in meritvah (https://ev.fe.uni-lj.si/3-2011/SCop.pdf) geomagnetnega polja. Ta observatorij je bil ukinjen v sredini leta 2015. Nato smo postavili geomagnetni observatorij z

mednarodno kodo PIA (Piran, Slovenija) na južnem robu vasi Sveti Peter nad Dragonjo (v nadaljevanju: observatorij PIA). Po končani prvi fazi gradnje je bil observatorij PIA 1. januarja 2015 redno vključen v mednarodno informacijsko mrežo INTERMAGNET kot geomagnetni observatorij skupine TEST (Data Viewer (https://imag-data.bgs.ac.uk/GIN_V1/GINTest2)). Rezultati meritev se shranjujejo tudi v Svetovnem podatkovnem centru za geomagnetizem.

Pri iskanju primernega mesta (https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2010.03.469-480) za postavitev geomagnetnega observatorija na ozemlju Slovenije in pri njegovem projektiranju smo morali, poleg mednarodnih priporočil, upoštevati tudi naravne danosti na ozemlju Slovenije. Slovenija leži na potresno aktivnem območju in na območju največje letne gostote strel (https://doi.org/10.5194/gi-3-135-2014) v Evropi. Zato smo instrumente za zvezne meritve spremembe magnetnega polja postavili v zemeljske jaške. Lokalne klimatske razmere pri observatoriju PIA dopuščajo, da lahko absolutne meritve opravljamo na merilnem kamnu, ki je postavljen na prostem (Slika 3). Zaradi pogostih atmosferskih razelektritev na območju, kjer je zgrajen, prenos merilnih podatkov preko omrežja mobilne telefonije omogoča njegovo galvansko ločitev in zaščito pred učinki strel. Največ prekinitev prenosa nastaja ob povečani aktivnosti Sonca (https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2016.02.197-211) . Te prekinitve so napovedljive, napovedi pa so uporabne tudi za vse uporabnike, ki nujno potrebujejo take prenose v realnem času, kot so reševalne in varnostne službe.



Slika 4: Nivo geomagnetnega šuma na observatoriju PIA (magnetogram v rjavem) je za faktor 2,12 višji od nivoja na observatoriju THY (Tihany, Madžarska) (magnetogram v rdečem) na sosednjem Madžarskem. V sredini Slovenije je ta faktor še višji in znaša 2,64 (magnetogram v modrem).

Pri meritvah lokalnega magnetnega polja na ozemlju Slovenije smo se srečali z izjemno visokim nivojem šuma v magnetnem polju (Slika 4). Zaradi tega smo morali najprej dodatno preveriti točnost izhodiščnega instrumenta za meritev absolutne vrednosti (http://fgg-web.fgg.uni-lj.si/SUGG/referati/2010/SZGG2010_Cop_Kosovac.pdf) gostote magnetnega polja in izmeriti vrednosti lokalnih magnetnih polj v krajih, enakomerno razporejenih od obale Piranskega zaliva proti notranjosti Slovenije. Na njenem ozemlju smo do sedaj odkrili naslednje naravne izvore šuma v magnetnem polju: a) nevihtne fronte MCS (https://doi.org/10.5194/gid-5-1-2015) (angl. *Mesoscale Convective Systems*); b) vpliv Lune (https://doi.org/10.15292/geodetski-vestnik.2020.03.303-319) na valovanje morja in zemeljske skorje in c) napetost Jadranske tektonske mikroplošče (https://ev.fe.uni-lj.si/4-2017/Cop.pdf) . Geomagnetno polje prodira skozi vse plasti Zemljinega plašča in skorje ter s seboj prinaša informacije o spremembah v gibanju konvekcijskih tokov v notranjosti našega planeta in o spremembah napetosti tektonskih plošč (Pavlovčič-Prešeren idr. 2020 (https://doi.org/10.4236/ojer.2020.92006) ; Čop idr. 2021 (https://doi.org/10.4236/ojer.2021.103007)).

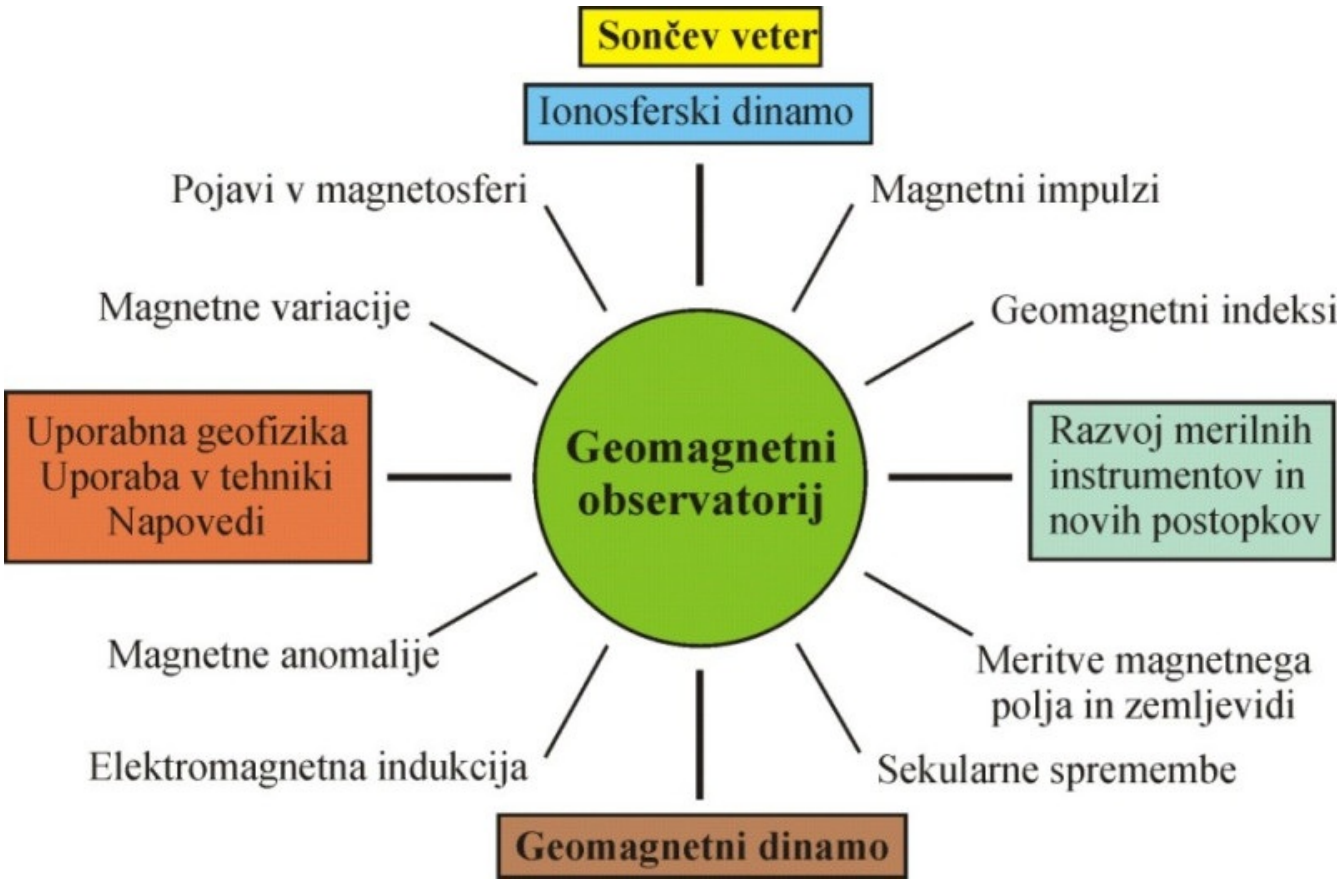
Slovenija leži na skrajnem severovzhodnem robu Jadranske tektonske mikroplošče. Severni rob njenega ozemlja obsega hitro dvigajoče se pogorje Alp in obrobje Panonske nižine, ki se relativno počasneje spušča (Kastelic idr. 2009 (https://www.earth-prints.org/bitstream/2122/5578/1/Kastelic_etal_2009_rend_online_SGI.pdf)). Jadranska tektonska mikroplošča se v vsakem pogledu obnaša popolnoma drugače kot Afriška in Evrazijska tektonska plošča, na kateri meji (Weber idr. 2004 (https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.09.001)). Ta tektonska formacija je dobro proučena in zelo dostopna ter omogoča proučevanje vseh oblik dinamičnih tektonskih procesov in njihovih kombiniranih efektov, zato je izjemen naravni geofizikalni laboratorij mednarodnega pomena (Kissling 2024 (https://doi.org/10.4401/ag-9160%20)).

Nadaljnji razvoj geomagnetnih meritev na površju Zemlje

INTERMAGNET (angl. *International Real-time Magnetic Observatory Network*) je bil ustanovljen leta 1987 kot globalni konzorcij institucij, ki upravljajo z geomagnetnimi observatoriji na površini Zemlje in merijo absolutni nivo sprememb lokalnega magnetnega polja po sprejetih standardih. INTERMAGNET vzdržuje mednarodno informacijsko mrežo za izmenjavo merilnih podatkov o stanju geomagnetnega polja v skoraj realnem času. Geomagnetni observatorij, ki je redno vključen v INTERMAGNET, meri magnetno polje po mednarodno sprejetih priporočilih. Njegovi sodelavci lahko sproti nadzorujejo rezultate meritev in so deležni pomoči te mednarodne organizacije pri izboljševanju delovanja observatorija (INTERMAGNET 2024 (https://tech-man.intermagnet.org/_/downloads/en/stable/pdf/)). Ko ta doseže priporočeno kvaliteto in zanesljivost rezultatov meritev, se rezultate vključi v globalne modele geomagnetnega polja. Meritve z letali in s pomočjo namenskih satelitov dopolnjujejo meritve (https://doi.org/10.1186/BF03351793) geomagnetnih observatorijev, postavljenih na površini našega planeta. Sodelavci observatorija morajo skrbeti za praktično uporabo merilnih rezultatov in za nadaljnji razvoj geofizikalnih meritev (Slika 5). Tako smo na observatoriju PIA za meritve elektromagnetnih valov (https://ev.fe.uni-lj.si/4-2018/Cop.pdf) izjemno dolgih valovnih dolžin, ki jih večinoma izseva Sonce, samostojno razvili magnetometer ICM (angl. *Induction Coil Magnetometer*), bolj poznan kot sprejemnik ELF (angl. *Extremely Low Frequency*).

Geomagnetni observatorij lahko preide v skupino observatorijev IMO (angl. *INTERMAGNET Magnetic Observatory*), ko doseže popoln nadzor nad svojimi merilnimi podatki in je sposoben zvezno posredovati rezultate meritev v najmanj enominutnem zaporedju. To dokaže s posredovanjem enominutnih dokončnih podatkov po mednarodnih priporočilih za obdobje vsaj dvanajstih mesecev. Ker je observatorij PIA (Piran, Slovenia) edino merilno mesto te vrste, ki leži na Jadranski tektonski mikroplošči, je njegov prehod v skupino IMO pomemben tako za mednarodno skupnost kot tudi za Slovenijo in za nadaljnje geofizikalne raziskave na njenem ozemlju.

Z vpeljavo globalnih modelov (http://www.iaga-aiga.org/data/uploads/pdf/guides/iaga-guide-repeat-stations.pdf) magnetnega polja Zemlje se je pomen nekdanjih ponavljalnih postaj za geomagnetne meritve, razporejenih po ozemlju posamezne države, popolnoma spremenil. Njihovo število je manjše, kot najboljša mesta za njihovo postavitev pa so se izkazala letališča (https://publicaciones.defensa.gob.es/media/downloadable/files/links/P/D/PDF502.pdf) . Dostop do njih je enostaven in jih ni treba prestavljati, ker so v neposredni bližini objektov z dolgoročnim namenom. Poleg meritev magnetnih meridianov za potrebe letališč so te meritve namenjene tudi preverjanju lastnosti globalnih geomagnetnih modelov na ozemlju posamezne države in njihovemu dopolnjevanju. To dopolnjevanje je pomembno predvsem zaradi orientacije elektronskih zemljevidov. Model WMM je namreč vgrajen v operacijske sisteme za mobilne naprave.



Slika 5: Na geomagnetnem observatoriju je poleg meritev sprememb lokalnega magnetnega polja (navpično) pomembna tudi praktična uporaba merilnih rezultatov in nadaljnji razvoj geofizikalnih meritev (vodoravno).

S sistemom najnovejše generacije mobilne telefonije 5G (Telekom 2024 (https://www.telekom.si/o-podjetju/sporocila-za-medije/5g-telekoma-slovenije-pokriva-ze-vec-kot-75-prebivalstva)) je podana možnost za nadaljnje povečanje hitrosti prenosa podatkov in širjenje mobilne telefonije pri nas. Zaradi boljše uporabe elektronskih zemljevidov na prenosnih komunikacijskih in navigacijskih napravah za različne namene ter z različnimi načini vključevanja v mobilna

komunikacijska omrežja je zahteva po čim natančnejšem določevanju azimuta na ozemlju Slovenije še bolj izražena.

https://www.alternator.science/en/long/zemljino-magnetno-polje-in-njegovo-opazovanje-v-sloveniji/