

Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Obszervatórium

KOVÁCS P.^{1,@}, CSONTOS A.¹, HEILIG B.¹, HEGYMEGI L.², MERÉNYI L.¹,
VADÁSZ G.¹, KOPPÁN A.¹

¹Magyar Földtani és Geofizikai Intézet (MFGI), Földfizika Főosztály, 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.

²MinGeo Kft., 1142 Budapest, Ráskai Lea u. 20.

@E-mail: kovacs.peter@mfgi.hu

A Tihanyi Geofizikai Obszervatórium 1954-ben nyitotta meg kapuit. Elsődleges célja a mágneses tér változásának folyamatos monitorozása, de az idők során az obszervatórium gravitációs, paleomágneses, geotermikus vagy szeizmológiai kutatások színhelye is volt. A több évtized alatt összegyűlt mágneses észlelések alapján a mágneses tér néhány másodperctől több évtizedig terjedő hullámhosszú változásai kutathatók. Az obszervatóriumi méréseket a tér hosszú idejű változásának hálózatban végzett terepi mérései egészítik ki. Míg a gyors változásokkal a Nap–Föld kapcsolat egyes fizikai folyamatait modellezzük, addig a lassú változások és az ezeket vizsgáló terepi mérések a Föld domináns mágneses terét kialakító külsőmágneses áramokról adnak képet. Az űrkörnyezet földi megfigyelését szolgálják a Tihanyban több évtizedes hagyománnyal rendelkező ULF és VLF (népszerű nevén whistler) mérések is. Az obszervatórium a folyamatos mágneses észlelésekben saját adatgyűjtő rendszert és részben saját fejlesztésű műszereket használ.

A Tihanyi Geofizikai Obszervatórium egyik alapító tagja a mágneses tér globális obszervatóriumi megfigyelő hálózatának, az INTERMAGNET-nek. Az obszervatóriumban koordináljuk a plazmaszféra dinamikai állapotának monitorozását szolgáló meridionális obszervatóriumi láncot, az MM100-at. A hálózatot FP7-es uniós pályázati forrás felhasználásával új észlelési pontokkal egészítjük ki, illetve egy már meglévő, hasonló európai hálózattal (SEGMA) kötjük össze. Az EMMA névre keresztelt kibővített hálózat, VLF mérési adatokkal kiegészítve, a plazmaszféra egyenlítői részecskesűrűség profiljának real-time modellezését teszi a jövőben lehetővé. Az FP7-es STORM pályázat tagjaként részt veszünk a jövőben a naprendszer nemlineáris dinamikai folyamatainak megfigyelésében és modellezésében ESA és NASA műholdak mágneses és plazmaparaméter észlelései alapján.

Kovács, P., Csontos, A., Heilig, B., Hegymegi, L., Merényi, L., Vadász, G., Koppán, A.: Geomagnetism: Tihany Geophysical Observatory

Tihany Geophysical Observatory was founded in 1954 to monitor geomagnetic variations. In addition to its original task, however, it has always provided opportunity for other geophysical activities, such as observation and study of paleomagnetic, geothermic, seismologic, and different space phenomena. Geomagnetic data, gathered since 1954 provide an excellent data base for investigating magnetic variations at various time-scales ranging from a few seconds (pulsations) to several decades (secular variations). The investigation of the secular variations in the observatory is complemented, from time to time, by secular or national network campaigns. While fast geomagnetic variations inform on the dynamic processes of the Sun–Earth system, secular variations provide information on the internal processes of the Earth. Study of the dynamics of the space environment is promoted by the recording of ULF and VLF magnetic and electromagnetic phenomena. The observatory contributed to the development of some magnetic instruments and data recording system, as well.

Tihany Geophysical Observatory is one of the founding members of INTERMAGNET, the worldwide network of observatories. It coordinates the MM100 meridional magnetometer array organized for monitoring the dynamical state of the plasmasphere. Currently, the network is complemented by new stations and merged with the SEGMA array, within the framework of an EU FP7-funded project, PLASMON, under the name of EMMA. The ULF records of EMMA observatories, together with VLF observations of other stations, are aimed at real-time modeling of the equatorial mass density profile of the plasmasphere. Within the framework of the forthcoming STORM FP7 project, the nonlinear dynamics of the solar system plasma will be studied using records of current ESA and NASA space missions.

Beérkezett: 2012. május 9.; *elfogadva:* 2012. szeptember 12.

1. Bevezetés

A földmágnesség vizsgálata Magyarországon hosszú múltra tekint vissza. Nagyszombaton már 1768-ban zajlottak rendszeres mágneses észlelések, 1847 és 1857 között pedig a mágneses tér első országos felmérése is megtörtént a Monarchia területén, K. Kreil (1798–1862), a bécsi meteorológiai és geomágneses intézet vezetőjének irányításával.

A Tihanyi Geofizikai Observatórium alapjait Barta György professzor (1915–1992) fektette le 1954-ben (1. ábra). Az observatórium első, teljes évet átölelő folyamatos mágneses regisztrátuma 1955-ből való (Csontos et al. 2006). Az observatórium alapítása egyértelműen illeszkedett ahhoz a nemzetközi kutatási törekvéshez, amely Földünk és környezetének minden addiginál részletesebb megismerésére irányult az 1950-es években. A Föld körül zajló elektromos és mágneses fizikai folyamatok megismerése kezdetben a földi observatóriumok folyamatos mágneses vagy ionoszféra megfigyelései alapján történhetett. A különböző területekről származó observatóriumi észlelések egybevetésével mód nyílt pl. a magnetoszférában és az ionoszférában a mágnesesen nyugodt, illetve viharos időszakokban lezajló dinamikai változások modellezésére vagy a napszél és a magnetoszféra kapcsolatának vizsgálatára.

Az observatóriumi adatok azonban a földkéreg feltérképezésében és a Föld belső szerkezetének megismerésében is



1. ábra Barta György (1915–1992), a Tihanyi Geofizikai Observatórium alapítója
Figure 1 György Barta (1915–1992), founder of the Tihany Geophysical Observatory

alapvető szerepet kaptak és kapnak jelenleg is. A földi tér minél részletesebb modellezésére – az observatóriumi észleléseket kiegészítendő – a 60-as évektől kezdődően számos országban hálózatok létesültek, amelyekben rendszeresen meghatározzák a mágneses térkomponensek adott időpontra vonatkoztatott értékét. Az időbeli vonatkoztatásnál observatóriumi adatokat vesznek figyelembe. Az observatóriumok és a hálózatok adatai alapján meghatározható egy-egy ország lokális vagy Földünk globális mágneses tér modellje (International Geomagnetic Reference Field – IGRF), illetve ennek többéves időléptékű, ún. szekuláris változása. A mágneses tér observatóriumokban megfigyelt időbeli változása alapján a modellek különböző időpontokra aktualizálhatók. A modellek referenciaként szolgálnak elméleti és alkalmazott földtani kutatásokhoz, a szekuláris változás alapján pedig a domináns földmágneses teret kialakító geomágneses dinamo körüli fizikai folyamatokra lehet következtetni.

A Föld, illetve a világűr megismerése szempontjából forradalmi előretörést jelentett az observatóriumok digitális adatgyűjtésre való átállása és a hálózati adatkommunikáció elterjedése. A műholdak megjelenésével azonban az observatóriumok szerepe az utóbbi évtizedekben szerte a világon átértékelődött. A műholdak pályamagasságán (4–500 km) ugyanis napról napra hatalmas mennyiségű mágneses adat válik elérhetővé, de ezek az adatok a felszínre vonatkoztatva jelentős bizonytalansággal terhelték. Az újonnan előálló globális geomágneses referenciamodellek ezért a nagy adatsűrűségű műholdas észleléseket az observatóriumi és földi hálózati mérésekkel kiegészítve veszik figyelembe. Az observatóriumi adatok ezenkívül alapvető szerepet játszanak a műholdas adatok kalibrációjához, és ezáltal a felszínre való vonatkoztatás pontosításához is.

Az observatóriumok szerepe a műholdak megjelenésével az űrkutatásban is erősödött. Annak ellenére, hogy a műholdak az űrkörnyezet különböző régióiban közvetlen és ezáltal pontos észleléseket végeznek, a mozgásuk lehetetlenné teszi egy adott terület folyamatos monitorozását. A felszíni észlelések ezzel szemben alkalmasak a magnetoszféra egy-egy régiójának hosszú idejű megfigyelésére is, sőt a különböző földi pontokon végzett észlelések egy széles tértartomány monitorozását is lehetővé teszik. A földi megfigyelések azonban természetesen a közvetlenül az űrben végzett méréseknél pontatlanabbak, ezért ebben az esetben a földi megfigyeléseket kell kalibrálni a műholdas regisztrátumok alapján. A földi és a műholdas mérések tehát minden esetben egymást kiegészítve alkalmasak csak a magnetoszféra és a földi környezet minél pontosabb megismerésére.

A Tihanyi Geofizikai Observatóriumban hagyományosan szerepet kapnak a földi mágneses tér modellezésével, illetve az űrkörnyezet vizsgálatával kapcsolatos kutatások. Az observatórium emellett lehetőséget teremt az observatóriumi vagy terepi mágneses műszerek, illetve korszerű digitális adatgyűjtő rendszerek tesztelésére és fejlesztésére is. A cikkben az alap kutatásban és műszerfejlesztésben végzett munkákat és eredményeket foglaljuk össze.

2. A Tihanyi Geofizikai Observatórium története

Magyarországon a földmágneses mérések komoly szakmai és történelmi múlttal rendelkeznek. Szisztematikus obszervatóriumi mérések Hell Miksa (1720–1792) kezdeményezésére elsőként Nagyszombaton zajlottak 1768 és 1777 között. Az észlelések később Budán folytatódtak, először Sajnovics János (1733–1785), később Schenzl Guidó (1823–1890) vezetésével. A feladat 1870-től a Schenzl Guidó által vezetett Meteorológiai és Földdelejjességi Magyar Királyi Központi Intézet keretei között intézményesült. 1893-ban Konkoly Thege Miklós – az egyre nagyobb városi zajok elkerülése miatt – Ógyallán (a jelenlegi Szlovákia területén) alapított új obszervatóriumot, amely később – a két világháború közötti rövid időszaktól eltekintve – csehszlovák fennhatóság alá került.

Ógyalla pótlására Barta György 1949-ben Budakeszin létesített ideiglenes obszervatóriumot, amely 1949–1950-ben a szintén Barta által irányított országos mágneses felmérés bázisául is szolgált (lásd 5. fejezet). 1950-ben a földmágneses mérési feladatok az Országos Meteorológia Szolgálatától az Eötvös Loránd Geofizikai Intézethez (ELGI) kerültek. A Tihanyi Geofizikai Observatórium végleges helyszínét az országos felmérés és a Tihanyi-félszigeten végzett részletező mérések eredményei alapján választották ki. Az építkezések Barta vezetésével 1953-ban indultak. Az obszervatórium 1954-ben nyílt meg, első vezetője Barta György volt. Nem sokkal később, 1957-ben, az MTA alapításával Nagycenken megnyílt a Széchenyi István Geofizikai Observatórium is.

Az alapfeladat, azaz a geomágneses regisztrálás mellett az obszervatóriumi környezet hagyományosan számos egyéb geofizikai kutatás számára is lehetőséget kínál. Az ELTE Geofizikai Tanszékével együttműködésben a mai napig zajlanak a VLF whistler regisztrálások, valamint részben paleo- és archeomágneses mérések is. Az alapregisztrálás mellett hosszú múltra tekint vissza az ULF pulzációk megfigyelése (lásd 4. fejezet), de az obszervatórium az ELGI gravitációs kutatásai és szeizmológiai monitoringja számára is terepet biztosít. A múltban termikus mérések, közetfizikai kutatások és meteorológiai megfigyelések zajlottak az obszervatórium területén.

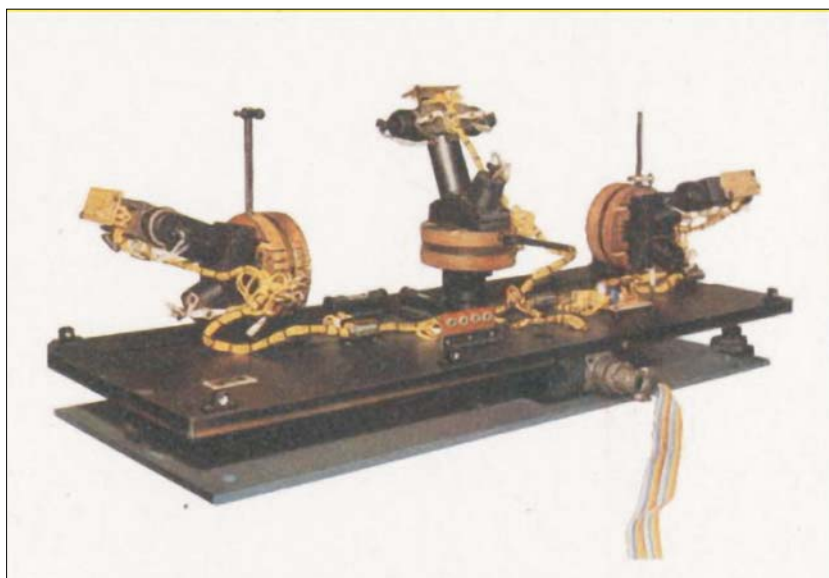
A mágneses tér pontos és hiánymentes monitorozása az anomáliamentes környezetben túl a mérési szempontokat figyelembe vevő anomáliamentes (azaz pl. ferromágneses anyagoktól mentes) épületeket feltételez, és egyedileg készített precíziós műszereket igényel. További követelmény a mérések technikai feltételeinek (tápellátás, hőmérséklet stabilitás, villámvédelem, idő-

szinkron, biztonságos adatgyűjtés) folyamatos fenntartása. Az obszervatórium alapvető feladata még a regisztrálás mellett az adatfeldolgozás és az adatszolgáltatás. A Tihanyi Geofizikai Observatórium alapító tagja a mágneses obszervatóriumok 1990-ben életre hívott nemzetközi hálózatának, az INTERMAGNET-nek. Az INTERMAGNET tagjai a szervezet weboldalán (www.intermagnet.org) nyers adatokat néhány napon belül közzéteszik, a végleges bázisértékekkel számolt és ellenőrzött adatokat pedig évente digitális adathordozón közösen publikálják.

Az 1990-es évek előtti időszakból a mágneses adatok, abszolút mérések eredményei, az eredeti fotoregisztrátumok (1991-ig) és az ezek kiértékeléséből származtatott órás átlagértékeket közreadó obszervatóriumi évkönyvek (1955–1987) maradtak meg mint a folyamatos tevékenység írásos dokumentumai. Az évkönyvek adatainak digitalizálása napjainkban zárul le, és a fotoregisztrátumok digitális archívumban való rögzítése is folyamatban van.

Az obszervatórium analóg korszakának mágneses mérései a nemzetközi átlagnak megfelelő műszerezettséggel és módszerekkel történt. A regisztrálás alapját QHM és BMZ műszerekkel (nagy stabilitású kvarc variométerek) végzett abszolút mérések és a LaCour-, 1983-tól pedig a Bobrov-típusú variométerek (2. ábra) fotoregisztrátumai képezték. Az 1970-es évek végétől már protonmagnetométerek is segítettek a munkát (Csontos et al. 2007a). Lényegi előrelépést jelentett, hogy 1983-ban a deklináció és inklináció abszolút értelmű mérésére alkalmas műszer, a DIM berendezés került az obszervatóriumba.

A digitális korszak egyik első lépéseként 1986-ban elkészült az ELGI-ben az első obszervatóriumi digitális adatgyűjtő berendezés, a DIMARS, amelyet az első IAGA obszervatóriumi workshopon (Ottawa, 1986) is bemutatottak. 1989-től kezdődően a totális tér regisztrálását Overhauser-típusú magnetométer végzi az obszervatóriumban. 1993 és



2. ábra | Bobrov 3 komponenses magnetométere

Figure 2 | Bobrov type of three-components magnetometer

1999 között a háromkomponensű alap regisztrálást egy LEMI gyártmányú fluxgate magnetométer látta el, amelyet 1999-ben egy dán gyártmányú, felfüggesztett FGE fluxgate magnetométer váltott fel. A variométerek bázisát, azaz a tér abszolút értékét jelenleg GSM 19 Overhauser-típusú protonprecessziós és Zeiss-teodolitra szerelt DIM magnetométerekkel határozzuk meg.

A mérési pontosság és megbízhatóság biztosítása érdekében az obszervatóriumban a mágneses variációt és totálteret jelenleg az alaplátványok mellett további két-két műszerrel regisztráljuk. Alaprendszerünk mintavétel időszinkronját egy GPS-vevő PPS jele adja. Az adatgyűjtést Linux operációs rendszerre épülő, részben ELGI-fejlesztésű adatgyűjtő berendezés (MAGREC 4) biztosítja, amely az adatok távoli elérését is lehetővé teszi. A keletkező mérési adatokról tíz percen belül legalább két független másolat keletkezik fizikailag elkülönített helyeken. Tudományos együttműködő partnereink számára az adatokhoz real-time elérést is biztosítunk (pl. a National Institute of Information and Communication Technology (Japan), Space Weather Information Center, PLASMON-projekt stb. számára).

Az obszervatórium létszámának 1990-es évektől kezdődő folyamatos csökkenése (jelenleg 3 fő) az obszervatóriumi alapfelszerelések mellett végzett kutatási feladatok körét is meghatározta. A feladatokban továbbra is alapvető hangsúlyt kapnak az adatainkra épülő hazai és nemzetközi kutatások. Ezek közül jelenleg meghatározó az obszervatóriumi műszerek fejlesztése, a Föld körüli térség kutatása, az országos és szekuláris hálózati mérések végzése, valamint a mágneses térképezésben és modellezésben való részvétel. A következő fejezetek ezekről a feladatokról adnak áttekintő képet.

3. dIdD rendszerek fejlesztése

A nukleáris magnetométerek (protonprecessziós, rubídium stb.) az 1950-es években jelentek meg. Ezek a műszerek csupán a mágneses tér intenzitását képesek megmérni, de a kapott értékek frekvencia-, illetve időmérés eredményeként állnak elő minden egyéb környezeti hatástól (pl. hőmérséklet, nyomás) függetlenül. Az ilyen berendezésekkel végzett mérések tehát abszolút mérések, amelyek ezáltal nem igényelnek kalibrálást. Az 1970-es évek elején protonprecessziós magnetométer fejlesztése a Tihanyi Geofizikai Obszervatóriumban is folyt Szemerédy Pál (1927–2012) vezetésével.

A nukleáris magnetométerek megjelenése gyorsan életre hívta az ilyen berendezésekre épülő vektor magnetométereket is, hogy a skalár magnetométereket alkalmassá tegyék a mágneses tér komponenseinek mérésére is. A cél eléréséhez olyan tekercsrendszereket alkalmaztak (pl. Helmholtz-, illetve Braunbeck-tekercsek), amelyek meghatározott irányú és nagyságú homogén mágneses teret indukáltak a szenzor környezetében. A mágneses tér horizontális komponensének kompenzálásával pl. így alkalmas környezetet lehetett létrehozni a vertikális komponens közvetlen mérésére. Ilyen ab-

szolút mérésre használt ELSEC gyártmányú magnetométer a Tihanyi Geofizikai Obszervatóriumban is üzemelt.

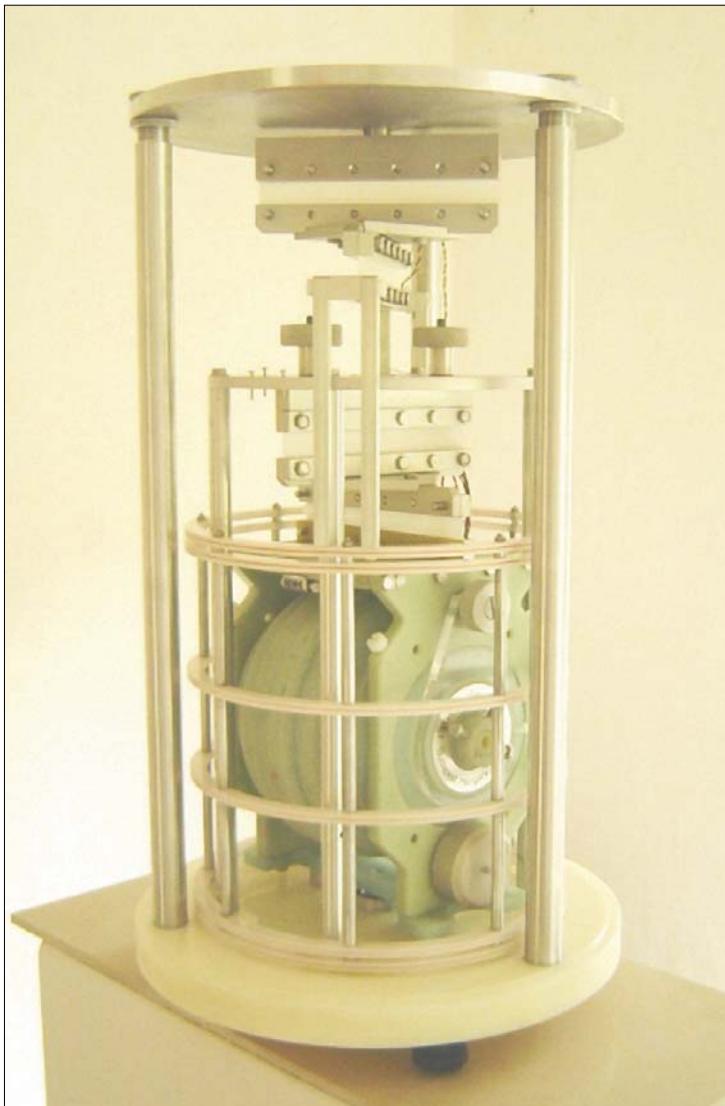
A dIdD (delta inklináció delta deklináció) elnevezésű eljárás szerint működő magnetométerek az 1950-es évek végén jelentek meg. A mérési eljárásban két, egymásra merőleges tengelyű tekercs vesz részt, amelyek homogén mágneses teret indukálnak. Az általánosan elterjedt elrendezésben az ún. deklinációs (D) tekercs tengelye vízszintes, és közel merőleges a mágneses tér irányára. A másik, ún. inklinációs (I) tekercs tengelye a függőleges síkban fekszik, és szintén közel merőleges a totálter vektorra.

A mérési eljárás során a külső mágneses teret a tekercsek tengelyei mentén ellentétes irányokban adott értékekkel eltérítik, és mérik a külső és a kitérítő tér eredőjeként előálló tér nagyságát. Az összesen öt mérés (kitérítés nélküli, illetve a két tekercstengely mentén mindkét irányban kitérített) eredményéből egyszerű matematikai eljárással származtatható a mágneses deklináció és inklináció bázisértékekhez képesti eltérése, illetve az eljárás folyamatos ismétlésével az eltérések időbeli változása is. A bázisértékeket abszolút mérésekkel határozzák meg.

Az eljárás annyira hatékony, hogy az USGS által a 60-as években megépített első ilyen berendezések lehetséges automatikus obszervatóriumként merültek fel (Allredge 1960). A dIdD elterjedését azonban a tekercsek mérete, súlya és ezekből fakadóan egy sor mérés technikai nehézség akadályozta. A 90-es években A. W. Green kezdeményezésére indult USGS–ELGI együttműködés (Pankratz et al. 1999) során elkészült az első ELGI által tervezett kompakt, gömb alakú tekercsrendszer. Ez a változat – 30 cm-es átmérőjű tekercsével – már sokkal alkalmasabb volt, hogy a modern igényeknek megfeleljen. A fejlesztésbe bekapcsolódó kanadai Gem Systems Overhauser-magnetométerébe áramgenerátort épített, s ezzel 5 másodpercre tudta redukálni egy dIdD ciklus időtartamát (ún. fastdIdD). Ezzel a fejlesztéssel a rendszer nagy stabilitású variométerre vált (Csontos et al. 2001).

Kérdés maradt viszont, hogy az Overhauser-magnetométer adottságai, pl. hőmérséklet-független mérés, nagy bázisstabilitás, alacsony zajszint, hogyan lehetnének átörökíthetőek az új variométerre. A 2000-es évek elején elvégzett kísérletek tanulságai alapján világos lett, hogy a tekercsrendszer mechanikai stabilitását radikálisan növelve javíthatóak csak a rendszer mutatói. 2003-ra megszületett az eddigi legkisebb méretű Overhauser-szenzorra tervezett 20 cm átmérőjű tekercsrendszer. A berendezés már lehetőséget teremtett felfüggesztett mérőrendszer létrehozására (Hegymegi et al. 2004), amely jól kompenzálja a környezeti hatások által kiváltott deformációk (hosszúság változások, megdölések) hatását. Az új magnetométerrel végzett tesztek nagy bázisstabilitásról (< 5 nT/év) és alacsony hőmérséklet-érzékenységről ($< 0,1$ nT/°C) tanúskodnak (Csontos et al., 2007b). 2010-ben már terepi méréseinket kiegészítő variométerként is sikerrel alkalmaztuk a dIdD rendszert (Hegymegi et al. 2009, Csontos et al. 2012).

A berendezést ma már a világ több mint harminc obszervatóriumban alkalmazzák. A gyártás jelenleg a Gem



3. ábra A forgatható, vertikális tengelyű tekercessel kiegészített dIdD magnetométer
Figure 3 dIdD magnetometer equipped by the third turnable coil. The magnetic axes of the third coil is vertical

Systems (Overhauser-magnetométer) és a MinGeo Kft. (felfüggesztett tekercsrendszer) munkamegosztásában zajlik.

A műszaki fejlesztés mellett a méréselméletben is több előrelépést tettünk. A dIdD-ek telepítés utáni kalibrációjára nem volt kidolgozott, hatékony módszer. A dIdD rendszer teljes kalibrációjához négy paraméter meghatározása szükséges: 1. a két tekercsrendszer merőlegességi hibája, 2. a deklinációs tekercs vízszintesességi hibája, 3. és 4. a két tekercs ún. kezdőszöge (merőleges tekercsek és vízszintes D tekercs esetén éppen a dD és a dI bázisa).

A két tekercsrendszer merőlegességének mérésére fejlesztett indukciós eljárás egyrészt nem érte el a várt pontosságot, másrészt a már telepített, működő rendszeren az alapmérés megszakítása nélkül az eljárást nem lehetett végrehajtani. A deklinációs tekercs vízszintesességét optikai módszerrel állítottuk be, szűk térben azonban a rendszeres kontroll megvalósítása szintén nehézségekbe ütközött.

A Schott et al. (2001) által a korábbi közelítő szögformulák helyett bevezetett vektorrepresentációra alapozva új kalibrációs eljárásokat fejlesztettünk ki (Heilig 2007). Ezek segítségével a rendszert jellemző paraméterek a mérések megszakítása nélkül, a rutinszerű observatóriumi abszolút méréseket vagy egy kalibrálnak tekintett kontrollvariométer adatait felhasználva meghatározhatóvá váltak. A referenciavariométeren alapuló keresztkalibrációs eljárás a dIdD-et mint variométert kalibrálja. Az abszolút mérésekre alapozott kalibrációs eljárás a dIdD tekercsek merőlegességi hibájának és a dIdD abszolút orientációjának meghatározását teszi lehetővé. Ezek az eljárások ma már az observatóriumi rutinmunka részei.

Kezdetektől megvolt a szándék egy abszolút dIdD megalkotására. A megvalósítás előtt azonban komoly akadályok tornyosultak (mechanikai instabilitás, szenzor irányérzékenysége, melyek következtében pl. a műszer átforgatása mérés technikai okok miatt nem megvalósítható). Az első jelentősebb áttörést egy új, ám igen egyszerű mérési eljárás hozta: a dIdD tekercseiben keltett terek hét megfelelő kombinációját egymás után alkalmazva a tekercsek merőlegességi hibája a magnetométer-leolvasásokból közvetlenül meghatározható (Heilig 2012).

Jelenleg egy, a dIdD körül körbeforgatható vertikális tengelyű tekercsrendszer és a kapcsolódó eljárások fejlesztése folyik (3. ábra). A körbeforgatott vertikális tekercsrel az inklináció abszolút mérését már sikerült megvalósítani, az eredményekről a legutóbbi IAGA Workshopon számoltunk be (San Fernando, Spanyolország, 2012). A forgatható vertikális tekercs egyszerre mind vertikális referenciaként is szolgál, s segítségével (a merőlegességihiba-mérési eljárást alkalmazva) a deklinációs tekercs víz-

szintesességi hibája is mérhetővé vált. A hiányzó lépés a deklinációs tekercs ún. kezdőszögének meghatározása külső referenciainyomvonal és optikai eljárások segítségével. Erre a problémára már léteznek más műszereknél (pl. GAUSS, lásd Auster et al. 2007) alkalmazott megoldások. Mindezek mellett még néhány, nem elhanyagolható mérés technikai problémával (pl. gerjesztőáramok instabilitása, keltett tér inhomogenitása stb.) kell megküzdeni ahhoz, hogy az első, a korszerű igényeknek megfelelő valódi abszolút dIdD megszülethessen.

4. A Föld körüli térség kutatása

A Tihanyi Geofizikai Observatórium az alapításától kezdve végzett űrkutatási célú méréseket is. Ezek közül is kiemelkedő a VLF whistlerek máig tartó megfigyelése az ELTE Geofizika Tanszékével együttműködésben az 1970-

es évektől. Az űrtudományi kutatásokban való részvételünk az 1990-es évektől fokozódott. Ekkor indultak meg a nemlineáris geomágneses és bolygóközi jelenségek (káosz, turbulencia) mágneses idősorokon keresztül történő tanulmányozásai, valamint a földmágneses pulzációk behatóbb vizsgálatai is. Újabban az ionoszférában észlelt részecskék energiaeloszlását, és ennek geomágneses dinamikai folyamatokkal és pulzációs tevékenységgel való kapcsolatát is tanulmányozzuk. Mindegyik terület része az MFGI jelenlegi és hosszú távú kutatási programjának, hazai és nemzetközi pályázatok támogatásával.

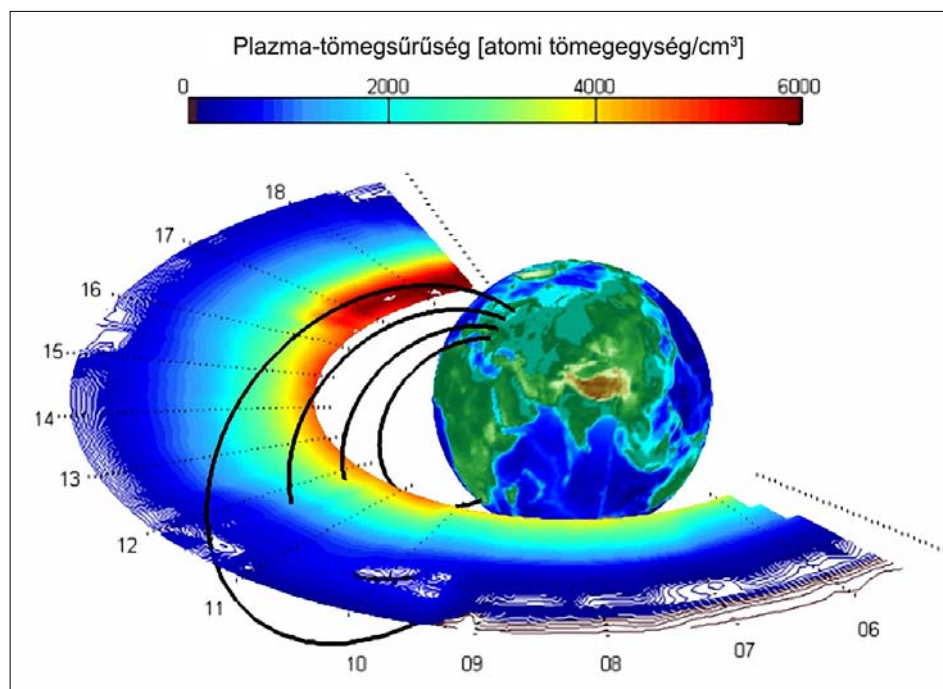
4.1. Földmágneses pulzációk vizsgálata

A földmágneses pulzációk (régebben mikropulzációk, újabban ULF-hullámok) a mágneses tér földfelszínén észlelt néhány másodperces, néhány perces periódusú hol szabályosabb, hol szabálytalanabb fluktuációi. Mivel energiájuk végső forrása a napszélben, illetve a bolygóközi térben van, s mivel terjedésük során áthaladnak a magnetoszférán, a plazmaszférán és az ionoszférán is, vizsgálatuk a Föld körüli térség kutatásának sok területén hasznosítható.

Földmágneses pulzációk észlelése kampányszerűen már legalább az 1960-as évektől folyt, részben az MTA GGKI-val együttműködésben. E terület kutatásának egy amerikai–magyar közös pályázat adott új lendületet az 1990-es évek közepén. A projekt vezetői A. W. Green, a USGS Geo-

mágneses Osztályának vezetője (Golden, Colorado), akkoriban az INTERMAGNET elnöke, illetve magyar részről Körömdi Alpár (ELGI Tihanyi Geofizikai Observatóriumának vezetője) voltak. A projekt keretében 1996-ban telepítették a pulzációk észlelésére alkalmas első, már digitális észlelőállomásokat Tihanyban és a Szlovák Tudományos Akadémia obszervatóriumában, Šrobárován (Szilasháza). A projekt célja az ún. erővonal-rezonanciák megfigyelése volt. Ezek a földi mágneses tér oszcillációként megfigyelhető sajátrezgése. Frekvenciájuk többek között a földmágneses szélességnek (azaz az erővonal hosszának és az indukciós tér erősségének), adott helyen pedig elsősorban az erővonal menti plazmasűrűségnek és eloszlásnak a függvénye. Az 1996-ban Európában elsőként, kifejezetten az erővonal-rezonanciák megfigyelésére telepített állomáspár célja éppen rezonáns frekvencia monitorozása volt az akkor újdonságnak számító fázisgradiens módszerrel (pl. Green et al. 1991). 2000-ben az USGS–ELGI közös hálózata két további hazai állomással bővült (Nagycenk és Farkasfa). Ugyanekkor az USA-ban is zajlottak észlelések. A távlati cél egy globális (amerikai, magyar, szlovák, finn, ukrán, orosz) hálózat létrehozása volt (Green et al. 1999).

Részben a pályázati lehetőségek megváltozása, részben Green halála a tervezett globális hálózat létrejöttét ugyan megakadályozta, azonban a koncepció kissé átalakult formában 2001-ben újraéledt. Az 1999-es napfogyatkozás alkalmával szervezett egyhetes mérési kampány (Bencze et al. 2007) mint előzmény után ekkor hoztuk létre az ELGI



4. ábra A plazmaszféra egyenlítői sűrűségterképe 2003. április 30-án hat (finn, lengyel, magyar) MM100 állomás erővonal-rezonancia megfigyelései alapján. A déli meridián síkjában felrajzolt mágneses indukcióvonalak a 45°, 50°, 55°, 60° mágneses szélességen érik el a felszínt. Az egyenlítői síkban a pontozott vonalak a helyi időt jelzik órában. A mérések a plazmaszféra fokozatos, de nem egyenletes feltöltődéséről tanúskodnak

Figure 4 Map of the equatorial plasma mass density based on ULF field line resonance observations made along the MM100 chain on 30 April, 2003. Field lines starting from 45°, 50°, 55°, 60° mag. lat. and the local time of the observations are also plotted as solid and dotted line, respectively

kezdeményezésére és koordinációjával, már meglévő európai infrastruktúrára alapozva az MM100 meridionális európai földmágneses pulzációmegfigyelő hálózatot (Heilig et al. 2007b). A név arra utal, hogy a hálózatba bevont finn, észt, lengyel, szlovák és magyar állomások hozzávetőlegesen a 110. mágneses meridián mentén helyezkednek el. Az állomáshálózat nemzetközi kampányok résztvevője volt (pl. Nemzetközi Heliofizikai Év), adatai alacsony földpályás (CHAMP), és a bolygóközi térben megfigyelést végző műholdakkal (WIND, ACE, CLUSTER) kombinálva hasznosultak igazán. 2011-től egy EU által támogatott program (EU FP7 Space, PLASMON projekt 2011–2014) keretében lehetőség nyílt az MM100 állomások korszerűsítésére, a hálózat besűrítésére új állomások telepítésével, valamint az MM100-nak az olasz–osztrák SEGMA hálózattal való egyesítésére. Az új egyesített hálózat neve EMMA lett (European quasi-Meridional Magnetic Array).

Az EMMA fő feladata továbbra is az erővonal-rezonanciák megfigyelése, s ennek révén a plazmaszféra plazmasűrűségének folyamatos, közel valós idejű monitorozása a teljes hálózat mentén (lásd pl. 4. ábra). A Tihanyban és Nagycenken észlelt adatok 2001-ig visszamenőleg világvizonylatban is a leghosszabb, csaknem folyamatos plazmasűrűség-adatsorok közé tartoznak. A pulzációkból származtatott sűrűségadatok, a VLF whistlerek inverziójából számolt elektronsűrűség-adatokkal (ld. Lichtenberger és Ferencz erről szóló cikkét ebben a füzetben) együttesen szolgáltatják a bemenő adatokat a PLASMON adatasszimilatív plazmaszféra modelljéhez.

A geomágneses pulzációk kutatásának másik fontos területe a napszéllel és a bolygóközi térjellemzőkkel való sokrétű kapcsolat vizsgálata. Elsőként igazoltuk a bolygóközi eredetű, ún. upstream pulzációk jelenlétét az egyenlítői ionoszféra felsőbb rétegében, továbbá elsőként sikerült ugyanebben a magasságtartományban és a felszínen is feltérképeznünk a nappali, upstream eredetű energia globális eloszlását (Heilig et al. 2007a, 2007b) is. Orosz–magyar együttműködésben az észleléseket összevetettük a legújabb magnetohidrodinamikai modelltől számított értékekkel és igen jó egyezést találtunk (Pilipenko et al. 2008). Ebroi (Spanyolország) kollégáinkkal közösen értelmeztük az 1999. évi napfogyatkozásnak az ionoszférabeli áramrendszerre és a geomágneses variációra (Heilig et al. 2001, Curto et al. 2006), valamint az MTA GGKI-val, különösen Verő Józseffel, Bencze Pállal, Zieger Bertalannal együttműködve a pulzációkra gyakorolt hatásait (Bencze et al. 2007). Dél-afrikai–magyar együttműködésben először mutattuk ki egyértelműen, s értelmeztük a felszíni pulzációs aktivitás és a napszél sűrűsége közötti kapcsolatokat (Heilig et al. 2010). A pulzációk kutatása ma is aktív terület az MFGI űrkutatási tevékenységében.

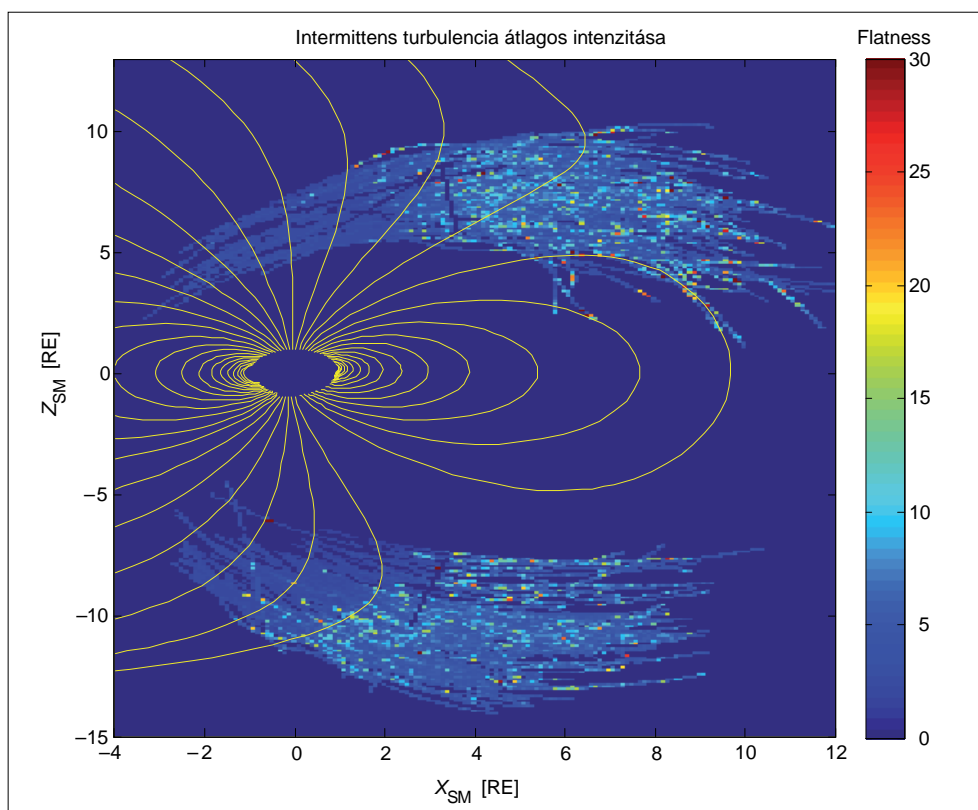
4.2. Mágneses idősorok nemlineáris analízise

A magnetoszféra geomágneses idősorokon is mutatkozó nemlineáris dinamikájának tanulmányozását szintén a 90-es

évek második felében kezdtük meg, különböző területekről származó obszervatóriumi adatok alapján. Az idősorok kaotikus, önszerveződő kritikus, illetve turbulens dinamikára utaló jegyeit vizsgáltuk (Vörös et al. 1998). Kimutattuk a dinamikai jegyek geomágneses aktivitással és szélességgel való változását, illetve a többéves idősorok statisztikai vizsgálata alapján a napszél és a magnetoszféra nemlineáris viselkedése közötti hasonlóságot. Utóbbi esetén igazolódott, hogy a geomágneses idősorokon a turbulenciára utaló hirtelen, ún. intermittens változások E energiájának eloszlása a geomágneses rendszerben a $P(E) \sim E^{-b}$, ún. power-law statisztika szerint alakul. Hasonló függvényvel írható le az intermittens események közötti várakozási idők eloszlása is, ami arra utal, hogy az idő előrehaladtával a hirtelen változások előfordulásának valószínűsége fokozatosan nő, azaz az események között korreláció (memória) áll fenn (Kovács et al. 2001). Ez a felismerés ellentmond a magnetoszférát önszerveződő kritikus rendszerként (Bak et al. 1987) értelmező elméletnek, és inkább nemlineáris turbulens rendszerként való értelmezését támogatja. A WIND műhold hosszú idejű mágneses regisztrátumai alapján a napszélben tapasztalt intermittens jelenségek energiáinak és várakozási időinek statisztikai eloszlásai a magnetoszféra esetén megfigyeltenél azonosak. Ez megerősíti a napszél domináns szerepét a magnetoszféra nemlineáris folyamatainak kialakulásában (Kovács és Vörös 2001).

A Cluster műholdkvarter in situ regisztrátumainak felhasználásával tanulmányozzuk a magnetoszféra különböző egységei (plazmalepel, plazmaszféra, sarki tölcser) és környezete (magnetoszféra-burok, lökéshullámfront, napszél) nemlineáris dinamikai tulajdonságait. A turbulenciára jellemző, különböző τ időskálájú intermittens változások intenzitását a $\delta B(t, \tau) = B(t + \tau) - B(t)$ különbségi idősorokon vizsgáljuk. Intermittens események domináns jelenlétét egy adott időskálán az jelzi, ha valószínűségük a véletlenszerű folyamatok esetén vártnál nagyobb (Frisch 1995). Az eltérést mennyiségileg a különbségi idősorok negyedik statisztikai momentumával, az ún. flatnessértékkel mérhetjük. Csúszóablakos analízist alkalmazunk, amelyben a műholdak haladása mentén vett adott idejű mágneses mintákat önállóan elemezzük. A kiszámolt flatnessértékeket a műholdak helyének függvényében ábrázolva kirajzolódnak a pálya mentén azok a területek, ahol a plazma turbulens fluktuációi a legerőteljesebbek. A módszer lehetőséget ad arra is, hogy a turbulencia mértékét az egyes területeken különböző napszélparaméterek vagy geomágneses aktivitás mellett is vizsgáljuk. A 5. ábra példája azt mutatja, hogy a műholdak pályája mentén az intermittens turbulens dinamika intenzitása a sarki tölcseren való áthaladás során – a várakozásnak megfelelően – jelentősen megemelkedik.

A turbulencia megfigyelésére a magnetoszféra–napszél rendszerben a legtöbb esetben csak idősorok állnak rendelkezésre, jóllehet a turbulens plazmaáramlás tér- és időbeli folyamat is egyben. A négy közeli pályán mozgó műholdból álló Cluster misszió egyedi lehetőséget teremtett arra, hogy az áramlást a holdak közötti távolságok térszkáláján a térben is vizsgáljuk. A legtöbb térrész esetén a térbeli és időbeli



5. ábra Az intermittens turbulencia intenzitásának változása a Cluster műholdak pályája mentén a sarki tölcser tartományban a SM (Solar-Magnetic) X - Z síkban (RE – föld sugár). Az intenzitást a valószínűségi sűrűség-függvény analízise alapján számolt statisztikai paraméter, a *flatness* értékével jellemezzük. A magasabb értékek erősebb intermitenciára utalnak

Figure 5 The change of the intensity of the intermittent turbulent dynamics in the polar cusp regions, along the orbit of the Cluster spacecrafts in the SM (Solar-Magnetic) X - Z plane (RE – Earth radii). The intensity is measured by the flatness, a statistical parameter obtained by the probability density function analysis of the magnetic records of the spacecrafts. The higher the value of flatness the more intermittent the turbulence in the studied region

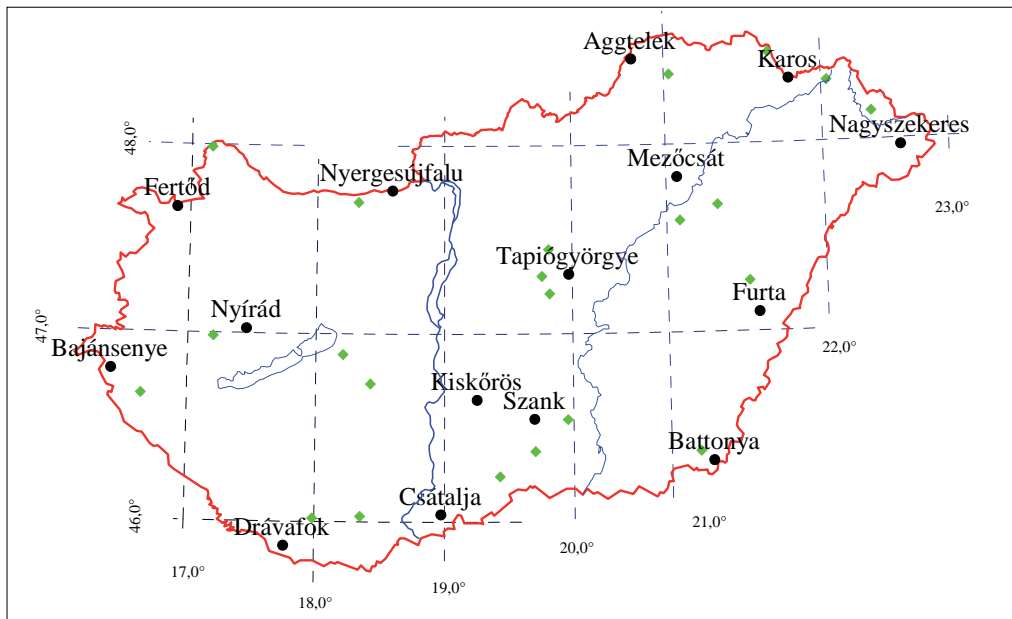
vizsgálatok eredményei megegyeztek, ami megerősítette a Taylor-hipotézis (lásd pl. Frisch 1995) alkalmazásának lehetőségét a Föld körüli rendszerek dinamikájában is.

A Cluster műholdak lökéshullámfrontjának előterében észlelt adatai (pulzációk keletkezésének helye), illetve obszervatóriumi idősorok alapján tanulmányozzuk a pulzációk és a nemlineáris folyamatok intenzitása közötti kapcsolatot. Ebben az esetben figyelembe kell vennünk, hogy a szabályos hullámként megjelenő pulzációk amplitúdója a háttér turbulens fluktuációinál jóval nagyobb, így a hagyományos nemlineáris módszerekkel (pl. valószínűségi sűrűség-függvény vagy struktúrafüggvény analízise) a turbulens dinamika jegyei az eredeti idősorokon nem mutatkoznak meg. Ezért olyan wavelet alapú szűrési eljárást alkalmaztunk, amelynek során a széles frekvenciatartományú turbulens jeleknek csak a pulzációs frekvenciasávon kívüli része jelenik meg, így a turbulencia ezeken már egyértelműen tanulmányozható. Megmutattuk, hogy a turbulens dinamika a lökéshullámfront előterében, az ún. kvázi párhuzamos *foreshock*-tartományban, azaz az upstream pulzációs hullámok keletkezésének tartományában a legerősebb. Igazoltuk továbbá, hogy az intermittens turbulencia intenzitása ugyanitt a napszél sebességével illetve az Alfvén Mach-számmal arányosan növekszik.

Egy 2013-ban induló EU FP7 Space pályázat (Solar System PlasmaTurbulence: Observations, Intermittency and Multifractals – STORM) konzorciumi tagjaként a jövőben részt veszünk több, a naprendszerben szolgálatot teljesítő ESA és NASA műhold (Ulysses, Venus Express, THEMIS, Mars Global Surveyor) mágneses és plazmafizikai regisztrátumainak analízisében is. A pályázat célja a bolygóközi tér és a naprendszer bolygói közelében megfigyelhető nemlineáris dinamikai folyamatok feltérképezése és sajátosságainak elemzése lesz.

5. Hálózati mágneses mérések Magyarországon

A hálózati mérések elsődleges célja a mágneses tér területi változásának egyenletes feltérképezése az obszervatóriumok egyenetlen és ritka hálózatán belül. A hálózatok különböző időpontokban végzett méréseit a közelben lévő obszervatórium vagy obszervatóriumok regisztrátumai alapján azonos időpontra, epochára vonatkoztatják (időbeli korrekció). Egymás utáni epochákra vonatkozó mérések különbségei alapján a tér belső eredetű, ún. szekuláris változása is monitorozható.



6. ábra A magyarországi anomáliamentes szekuláris ponthálózat 1966-ból. A fekete pontok az elsődrendű, a zöldek pedig a tartalék állomásokat jelölik. A Nyergesújfalu pont az idők során mágneses mérésre alkalmatlanná vált, míg a Kiskőrös ponton Szank közelsége miatt nem végzünk méréseket

Figure 6 Primary (black dots) and secondary (green dots) repeat stations in the original repeat station network established in 1966. The Nyergesújfalu and its secondary stations have been perished. During the last campaigns the Kiskőrös site were not surveyed because of the close vicinity of the Szank station

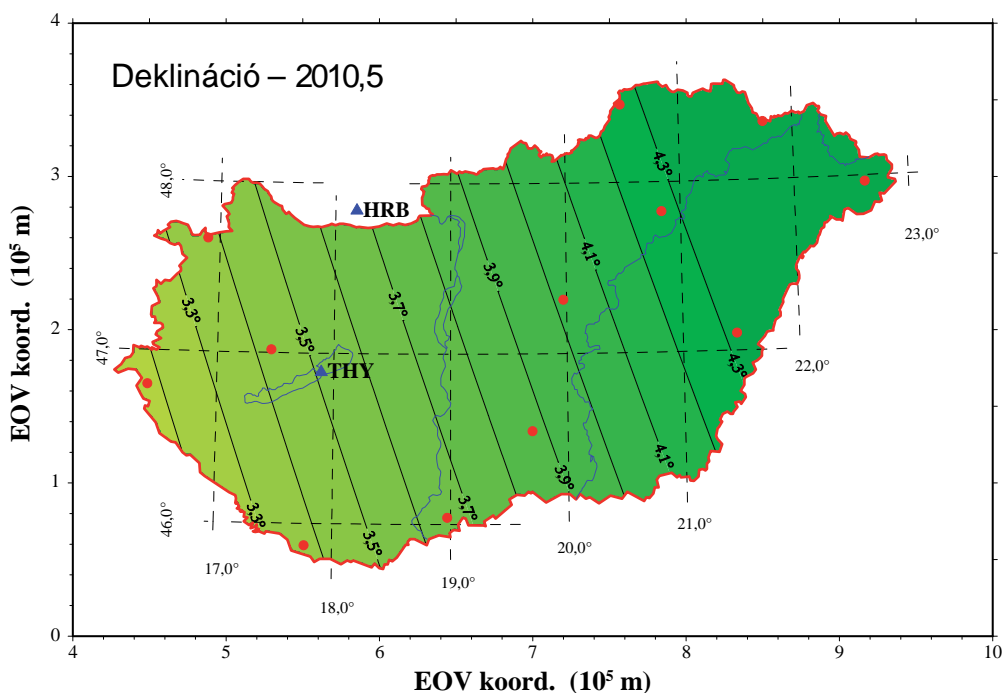
A tér minden komponensére kiterjedő hálózati méréseket Magyarország területén a Monarchia időszakában elsőként Karl Kreil végzett 1847 és 1857 között 52 ponton (Szabó 1983). Később Schenzl Guidó (1867–1879, 117 állomás), majd Kurländer Ignác (1892–1894, 38 állomás) vezetésével indultak újabb kampányok. Eötvös Loránd a gravitációs kutatások helyszínén szintén végzett mágneses méréseket, sőt új mágneses műszereket is fejlesztett. A II. világháború utáni Magyarország első országos mágneses felmérésére Barta György vezetésével került sor 1949–1950-ben, 290 ponton. 1995-ig a mérések 15 éves rendszerességgel ismétlődtek az eredeti hálózathoz képest eltérő, 300 (1964–1965; 1979–1982), illetve 195 (1994–1995) pontot tartalmazó hálózatokon (Aczél, Stomfai 1968, Kovács, Körmendi 1999). Az 1950-es kampány időbeli kiegyenlítéséhez az ideiglenes Budakeszi obszervatórium adatait használták fel, a későbbi országos felmérések azonban már természetesen a Tihanyi Geofizikai Obszervatórium folyamatos mágneses észleléseire épültek.

Az országos hálózatok felmérése között eltelt idő túl hosszú ahhoz, hogy a mágneses tér időbeli változása a felmért területen pontosan követhető legyen. Ezért az 1965-ös hálózat anomáliamentes pontjaiból kiindulva Aczél és Stomfai (1969) egy kisebb, 15 pontból álló hálózatot jelölt ki (6. ábra) a tér néhány éves időközönként történő rendszeres meghatározására. Ez az ún. szekuláris hálózat alkalmas a tér időbeli változásának monitorozására és ezáltal az országos felmérések térképeinek folyamatos aktualizálására is. Az első szekuláris hálózati felmérésre 1966-ban került sor. A mai gyakorlat szerint a hálózat pontjait páros években

kétéves rendszerességgel mérjük. Szekuláris méréseinkkel csatlakoztunk a 2003-ban létrejött nemzetközi hálózati együttműködéshez, a MagNetE-hez, amelynek keretében egyrészt vállaljuk az együttműködés által meghatározott mérési sztenderdek betartását, valamint adatainkat egy közös adatbázis számára is szolgáltatjuk. Méréseink szerepet kapnak az 5 évente frissülő nemzetközi mágneses referenciamodell, az IGRF megalkotásában is.

A mérési pontok területi eloszlásának függvényében a mágneses tér különböző hullámhosszúságú változásai térképezhetők. A néhány ezer km hullámhosszú változásokat alapvetően a geomágneses dinamo határozza meg, az ennél rövidebb változások pedig a kéreg anomáliáitól származnak (lásd pl. Bullard, 1967). A mérések alapján meghatározható a mágneses tér egy olyan lokális analitikai modellje, amely a nagy hullámhosszú változásokat írja le, és így referenciaként szolgál a kéreg anomáliáit vizsgáló regionális kutatások számára is. Ez a tér a normáltér, amely Magyarországon szekuláris mérések esetén hagyományosan a földrajzi koordináták első, országos mérések esetén pedig másodrendű polinomjaként áll elő (Aczél, Stomfai 1969). Az országos mérések másodrendű polinommal meghatározott normáltér modelljeit Aczél és Stomfai (1971), illetve Kovács és Körmendi (1999) cikkei közlik. A 7. ábra példaként a 2010-ben végzett szekuláris hálózati mérésünk alapján, elsőrendű polinommal számolt magyarországi deklinációmodellt mutatja be.

A polinommodellek egyértelmű hiányossága, hogy nagyobb terület esetén nem veszik figyelembe a Föld görbültségét, illetve automatikusan nem tesznek eleget a tér kon-



7. ábra | A deklináció 2010.5 epochára vonatkoztatott elsőrendű polinommal számolt normáltér modellje a 2010. évi szekuláris hálózati mérések alapján
Figure 7 | First-order polynomial declination normal field model for the epoch of 2010.5 compiled on the basis of the repeat station campaign carried out in 2010

zervatív jellegének elektromosáram-mentes esetben. A teret leíró V potenciál ugyanis ilyenkor a Maxwell-egyenletek alapján a tér minden pontján a Laplace-függvény szerint viselkedik. A tér komponensei a valóságban így nem lehetnek függetlenek egymástól, amit a polinomközelítés figyelmen kívül hagy.

A Laplace-egyenlet gömbi rendszerben való megoldása a Gauss által bevezetett gömbharmonikus analízis által lehetséges. A Gauss-féle sorfejtés bázisfüggvényei (Legendre- és a trigonometrikus szinusz és koszinusz függvények) azonban csak a teljes gömbfelület esetén alkotnak teljes ortonormált rendszert, regionális modellek esetén ezért nem alkalmazhatók. Kisebb, gömbsüveg alakú terület sorfejtéssel való modellezésére Haines (1985), majd később ennek módosításával De Santis (1992) közölt eljárást. De Santis, ún. kiegyenlített gömbsüveg harmonikus analízisében (ASHA – Adjusted Spherical Cap Harmonic Analysis), Θ_0 nyílásszögű gömbsüveg esetén a mágneses potenciált az alábbi függvény közelíti:

$$V(\Theta, \Lambda, r) = a \sum_{k=1}^{K_{\max}} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a}{r} \right)^{q+1} \times \left[g_k^m \cos(m\Lambda) + h_k^m \sin(m\Lambda) \right] P_k^m(\cos\Theta), \quad (1)$$

ahol a a referenciagömb sugara, P_k^m a k -ad fokú, m -ed rendű Schmidt-normalizált egyesített Legendre-függvény, r a mérési pontok geocentrikus távolsága, Θ és Λ pedig a pontok kiegészítő szélességi és hosszúsági koordinátáinak pólusra transzformált, majd az északi féltekére való kiterjesztéssel kapott értéke (lásd De Santis 1992). A g_k^m , h_k^m

együtthatók az ún. Gauss-együtthatók. A Gauss-féle kiegyenlítéshez képest az alapvető különbség az, hogy a hatványkitevőben szereplő q értéke nem egész szám, hanem k függvényében a következő közelítő képlettel kapható:

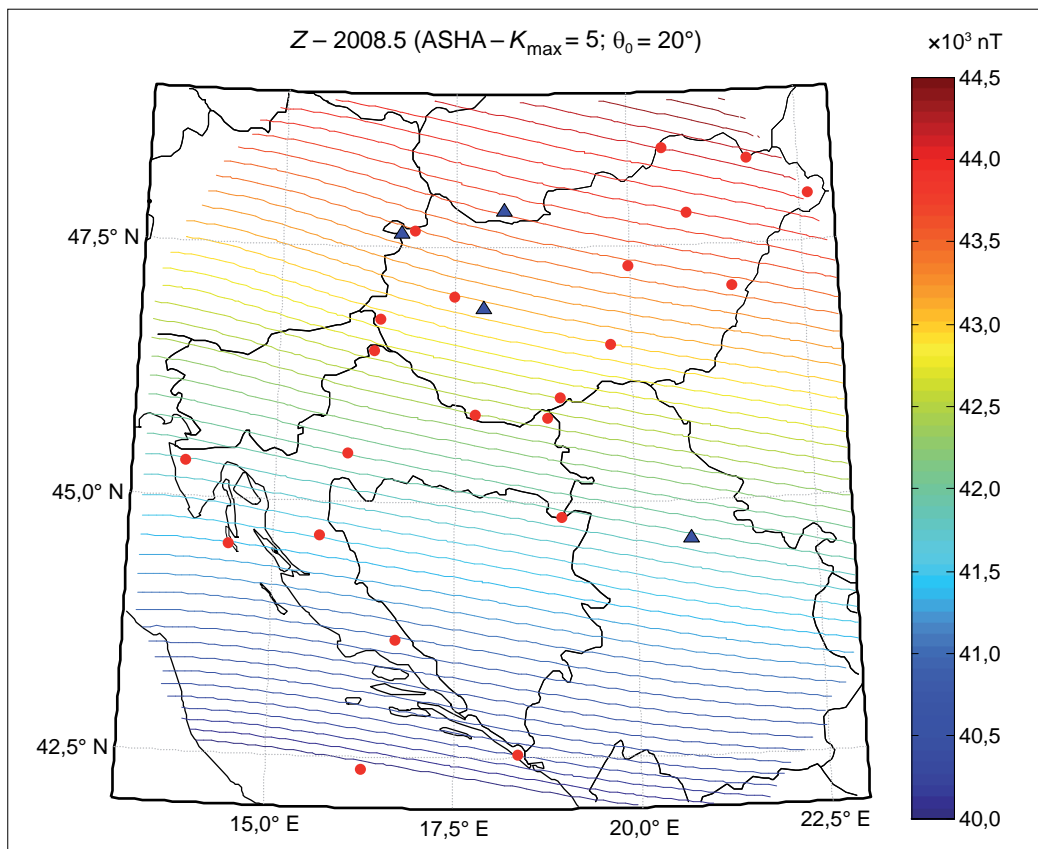
$$q \cong \frac{\pi}{2} \Theta_0 (k + 0,5) - 0,5.$$

A mágneses tér területi változásának ASHA modellel közelített legkisebb hullámhossza: $\lambda_{\min} = 4\Theta_0 a / K_{\max}$.

Az ASHA módszerrel Horvátország és Magyarország 2008.5 epochára kiegyenlített szekuláris hálózati méréseinek eredményeire illesztettünk mágneses modellt. A modell $K_{\max} = 5$ fokszámát (lásd (1) egyenlet) és az alkalmazott gömbsüveg optimális $\Theta_0 = 20^\circ$ nyílásszögét előzetesen az eredeti észlelési pontokon számolt, IGRF modelladatokra történő, ASHA modellillesztés alapján határoztuk meg (Kovács et al. 2011). A számítások eredményeként kapott Z komponensű modellteret a 8. ábrán mutatjuk be.

6. Összefoglalás

A Tihanyi Geofizikai Observatórium alapfeladata a földmágneses tér változásának folyamatos monitorozása alap- és alkalmazott geofizikai kutatások igényeinek biztosításához. A feladat megköveteli az adatgyűjtés folyamatosságának fenntartását és a mindenkori pontossági követelmények biztosítását. A folyamatosan fejlődő technika révén a pontossági igények napról napra változnak, ami az observa-



8. ábra A mágneses tér Z komponensének közös horvát–magyar szekuláris mérésekre (piros körök) és obszervatóriumi (kék háromszögek) éves átlagokra illesztett normáltere a $K_{max} = 5$ és $\Theta_0 = 20^\circ$ paraméterű ASHA modell alapján számolva. Epoch: 2008.5

Figure 8 Z component magnetic normal field model fitted according to the ASHA (see text) method for the observations (red dots) of the joint Croatian–Hungarian repeat station campaigns and observatory (blue triangles) annual means. Model parameters are: $K_{max} = 5$ and $\Theta_0 = 20^\circ$. Epoch: 2008.5

tóriumtól újabb és újabb fejlesztéseket követel meg. A legkomolyabb kihívást ebből a szempontból mindeddig az analóg regisztrálásról a digitális adatgyűjtésre való átállás jelentette a 1980-as évek második felében. Az átállás sikeressége megteremtette a lehetőséget ahhoz, hogy az obszervatórium az 1990-ben alakuló nemzetközi obszervatóriumi hálózat, az INTERMAGNET alapító tagja lehessen.

Az obszervatórium az évek során nemcsak alkalmazta a fejlesztési eredményeket, hanem az infrastruktúrális lehetőségeket és a mérési tapasztalatokat kihasználva folyamatosan részt is vett a műszerek és korszerű digitális adatgyűjtő rendszerek fejlesztésében. Ma már a világ több obszervatóriumában használják a részben Tihanyban fejlesztett dID típusú magnetométereket és az ELGI – MinGeo Kft. együttműködésben fejlesztett Maglin szoftverrel felszerelt, Magrec típusú, sokadik generációs adatgyűjtő eszközöket.

Az obszervatóriumi alaptervekenység mellé több alaputatási téma is társult az évek során. Ezek közül a cikkben kiemeltük a földkörüli térségünk dinamikai folyamatainak vizsgálatát, röviden az űrkutatást. A plazmaszféra földi megfigyelésekkel való monitorozására – a 90-es évek második felétől kezdődően – egymásra épülő kétoldalú magyar–amerikai, majd hazai, jelenleg pedig EU-s pályázatok révén az obszervatórium határain túli fejlesztéseket, illetve háló-

zatépítést tudunk kezdeményezni és koordinálni. A földi adatok elemzésével és műholdas észlelések bevonásával évek óta részt veszünk a csatolt magnetoszféra–napszél rendszer nemlineáris dinamikájának vizsgálatában is.

Az obszervatóriumban és az általunk koordinált magnetométer-hálózatokban gyűjtött adataink azonban más intézetek űrkutatási programjaiban is hasznosulnak. Folyamatos real-time adatszolgáltatást végzünk például egy japán információs központ, a NICT (National Institute of Information and Communication Technology) számára, ahol adatainkat az űridőjárás előrejelzésében hasznosítják.

A hazai földmágneses tér feltérképezésének és a tér modellezésének szintén az obszervatórium jelenti a bázisát, több szempontból is. A terepi mérés egy rövid időszakra vonatkozó obszervatóriumi mérésnek felel meg, ezért a terepen alapvetően az obszervatóriumi műszerparkot és mérési tapasztalatainkat használjuk fel. A mérési eredményeink időbeli kiegyenlítésében pedig a tihanyi folyamatos obszervatóriumi regisztrátumokra hagyatkozunk. Szekuláris mérési kampányainkkal és adatainkkal részt veszünk a MagNetE európai együttműködésben; a kampányokat a szervezet ajánlása szerint tervezzük, adatainkat pedig kölcsönösségi alapon szolgáltatjuk egy közös európai adatbázis számára. Az adatbázis alkalmas a mágneses tér és változásá-

nak regionális feltérképezésére (Duma et al. 2012) és egyben modellezésére is. Lokális mágneses térképeink és modelljeink megszerkesztésében kétoldali együttműködések alapján szintén felhasználjuk egymás mérési eredményeit. A hálózatban végzett méréseinkből szerkesztett mágneses deklinációtérképeket éves rendszerességgel szolgáltatjuk a Magyar Honvédség térképezési céljaira. Deklinációadataink a légi navigációt is szolgálják. Az obszervatóriumi adatok mellett a szekuláris és az országos mérések adatai is bekerülnek a nagy geofizikai adatközpontokba (World Data Centre), s felhasználják azokat a mágneses tér globális modellezésében. Adatainkkal ilyen módon is hozzájárulunk a nemzetközi geofizikai és űrkutatáshoz, sőt az adatok a műholdak navigációjában is széleskörűen használt globális modellek (pl. IGRF), vagy pl. a már a NATO-által is rendszeresített globális anomáliatérképek (World Digital Magnetic Anomaly Map) megszerkesztésében is szerepet kapnak.

Az adatok civil felhasználásokban és a geofizikai kutatómunkában betöltött meghatározó szerepének is köszönhető, hogy a Tihanyi Geofizikai Obszervatórium 2010-ben csatlakozhatott a Nemzeti Innovációs Hivatal által nyilvántartott Stratégiai Nemzeti Kutatási Infrastruktúrához. Hasonló státuszt kaptak az obszervatóriumi infrastruktúrához köthető országos, valamint szekuláris mágneses hálózataink is. A csatlakozás lehetősége az alapítástól kezdve egymást váltó szakmai és kutatói generációk érdeme. Az obszervatóriumi infrastruktúra folyamatos fejlesztése a következő évtizedeknek is alapvető feladata.

Köszönetnyilvánítás

A cikk szerzői köszönetüket fejezik ki a Tihanyi Geofizikai Obszervatórium alapítóinak és korábbi munkatársainak a bemutatott eredmények alapjainak megteremtéséért. A jelenlegi és közelmúltbeli kutatásokat a K75640 sz. OTKA pályázat, a magyar űrkutatás fejlesztésére több éven keresztül kiírt TP 153 sz. pályázat, az EU-FP7/2007-2013263218 (PLASMON) projektje, a Nemzeti Kutatási és Technológiai Hivatal által kiírt Magyar–Horvát, Magyar–Dél-afrikai, Magyarország–USA Kormányközi Tét Együttműködések, a német–magyar DAAD, valamint az MTA orosz–magyar kutatócsere-programja támogatta. Infrastruktúránk fenntartásához a Magyar Bányászati és Földtani Hivaltól kapunk támogatást.

A tanulmány szerzői

Kovács Péter, Csontos András, Heilig Balázs, Hegymegi László, Merényi László, Vadász Gergely, Koppán András

Hivatkozások

- Aczél E., Stomfai R., 1968: Az 1964–65. évi magyarországi földmágneses alaphálózatmérés. *Geofizikai Közlemények* XVII/3, 5–17
- Aczél E., Stomfai R., 1969: A földmágneses elemek változása az 1966-os szekuláris mérés szerint. *Geofizikai Közlemények* XVIII/1–2, 3–11
- Aczél E., Stomfai R., 1971: A földmágneses elemek változása Magyarországon 1850-től napjainkig. *Geofizikai Közlemények* XXI/1–4, 85–90
- Allredge L. R., 1960: A proposed automatic standard magnetic observatory. *J. Geophys. Res.* 65, 3777–3786

- Auster H. U., Mandea M., Hemshorn A., Korte M., Pulz E., 2007: GAUSS: Geomagnetic Automated System. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* C-99(398), 49–59
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K., 1987: Self-organized criticality: An explanation of 1/f noise. *Phys. Rev. Lett.* 50, 381–384
- Bencze P., Heilig B., Zieger B., Szendrői J., Verő J., Lühr H., Yumoto K., Tanaka Y., Střeštk J., 2007: Effect of the August 11, 1999 total solar eclipse on geomagnetic pulsations. *Acta Geod. Geoph. Hung.* 42, 23–58
- Bullard E. C., 1967: The removal of trend from magnetic surveys. *Earth and Planetary Science Letters* 2, 293–300
- De Santis A., 1992: Conventional spherical harmonic analysis for regional modelling of the geomagnetic field. *Geophys. Res. Lett.* 19/10, 1065–1067
- Duma G., Leichter B., and the MagNetE Group, 2012: Map of magnetic declination in Europe (2006), ccgm.free.fr
- Csontos A., Hegymegi L., Heilig B., Körmendi A., 2001: The test of the delta “I” delta “D” (DIDD) measuring system in Tihany Geophysical Observatory of ELGI. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 31, 323–330
- Csontos A., Hegymegi L., Heilig B., Kovács P., Szabó Z., 2006: Tihanyi Geofizikai Obszervatórium 1955–2005, ELGI
- Csontos A., Hegymegi L., Heilig B., Kovács P., Merényi L., Szabó Z., 2007a: 50 Years of History of the Tihany Geophysical Observatory. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* C-99(398) 32–37
- Csontos A., Hegymegi L., Heilig B., 2007b: Temperature Tests on Modern Magnetometers. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sci.* C-99(398) 171–177
- Csontos A., Sugar D., Brkić M., Kovács P., Hegymegi L., 2012: How to control a temporary DIDD based observatory in the field? Special issue of “Annals of Geophysics” on 5th MagNetE Workshop on European Geomagnetic Station Survey, Rome, Italy (accepted manuscript)
- Curto J. J., Heilig B., Piñol M., 2006: Modeling the geomagnetic effects caused by the solar eclipse of 11 August 1999. *J. Geophys. Res.* 111, A07312, doi: 10.1029/2005JA011499
- Frisch U., 1995: *Turbulence: The legacy of A. N. Kolmogorov.* Cambridge Univ. Press
- Green A. W., Worthington E. W., Baransky L. N., Fedorov E. N., Kurmeva N. A., Pilipenko V. A., Shvetzov D. N., Bektemirow A. A., Philipov G. V., 1993: Alfvén field line resonances at low latitudes ($L = 1.5$). *J. Geophys. Res.* 98, 15693–15699
- Green A. W., Worthington E. W., Plyasova-Bakounina T. A., Körmendi A., Hegymegi L., Goedecke W., Vörös Z., 1999: Field line resonance studies in North America and Central Europe. *Geophysical Transactions* 42, 181–193
- Haines G. V., 1985: Spherical cap harmonic analysis. *J. Geophys. Res.* 90, 2583–2591
- Hegymegi L., Heilig B., Csontos A., 2004: New suspended dIDD magnetometer for observatory (and field?) use. *Proceedings, XIth IAGA Workshop on geomagnetic observatory instruments, data acquisition and processing, Kakioka, Japan 2004*, pp. 28–33
- Hegymegi L., Csontos A., Heilig B., 2009: Can we use the dIDD magnetometer in the field? *Proceedings of the XIIIth IAGA Workshop on Geomagnetic Observatory Instruments, Data Acquisition, and Processing, Boulder, USA*, pp. 95–99
- Heilig B., Csontos A., Kovács P., 2001: The geomagnetic effect of the solar eclipse of 11 August, 1999. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 31, 83–89
- Heilig B., Lühr H., Rother M., 2007a: Comprehensive study of ULF upstream waves observed in the topside ionosphere by CHAMP and on the ground. *Annales Geophysicae*, 25, 737–754

- Heilig B., Csontos A., Pankratz L., Pajunpää K., Kultima J., Raita T., Reda J., Váczyová M., 2007b: Upstream wave related Pc3 pulsations observed by the MM100 meridional magnetometer array. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. C-99(398)* 339–346
- Heilig B., 2007: Intercalibration of dIdD and fluxgate magnetometers. *Publs. Inst. Geophys. Pol. Acad. Sc. C-99(398)* 144–151
- Heilig B., Lotz S., Verő J., Sutcliffe P., Reda J., Pajunpää K., Raita T., 2010: Empirically modelled Pc3 activity based on solar wind parameters. *Annales Geophysicae*, 28, 1703–1722
- Heilig B., 2012: Determining the orthogonality error of coil systems by means of a scalar magnetometer: application to delta inclination – delta declination (dIdD) magnetometers. *Measurement Science and Technology* 23, 37001, doi: 10.1088/0957-0233/23/3/037001
- Kovács P., Körmendi A., 1999: Geomagnetic repeat station survey in Hungary during 1994–1995 and the secular variation of the field between 1950 and 1995. *Geophysical Transactions* 42/3–4, 107–132
- Kovács P., Carbone V., Vörös Z., 2001: Wavelet-based filtering of intermittent events from geomagnetic time-series. *Planetary and Space Sciences* 49, 1219–1231
- Kovács P., Vörös Z., 2001: Geomagnetic diagnosis of the magnetosphere and its dynamical interaction with the solar wind. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 31/1, 367–374
- Kovács P., Vujic E., Csontos A., Brkic M., Heilig B., Koppán A., 2011: Regional Magnetic Field Model for Croatia and Hungary. 6th Congress of Balkan Geophysical Society, ext. abstract published in earthdoc.org.
- Pankratz L. W., Sauter E. A., Körmendi A., Hegymegi L., 1999: The US–Hungarian Delta I – Delta D (DIDD) Quasi-absolute Spherical Coil System. Its history, evolution and future. *Geophysical Transactions* 42/3–4, 195–202
- Pilipenko V., Fedorov E., Heilig B., Engebretson M. J., 2008: Structure of ULF Pc3 waves at low latitudes. *J. Geophys. Res.* 113, A11208, doi: 10.1029/2008JA013243
- Schott J. J., Boulard V., Péres A., Cantin J. M., 2001: Magnetic component measurements with the DIDD. *Contributions to Geophysics and Geodesy* 31, 35–42
- Szabó Z., 1983: A mágneses deklináció változásai Magyarországon 1850–1980. *Geodézia és Kartográfia* 35/6, 436–442
- Vörös Z., Kovács P., Juhász Á., Körmendi A., Green A.W., 1998: Scaling laws from geomagnetic time series. *Geophys. Res. Lett.* 25/14, 2621–2624