

# MAGYAR GEOFIZIKA

HUNGARIAN GEOPHYSICS

A MAGYAR  
GEOFIZIKUSOK  
EGYESÜLETÉNEK  
FOLYÓIRATA



JOURNAL OF THE  
ASSOCIATION  
OF HUNGARIAN  
GEOPHYSICISTS

Tisztelettel gratulálunk a kitüntetéshez  
Tájékoztató

Beszámoló a Magyar Geofizikusok Egyesületének 33. vándorgyűléséről  
Szeniorok Bátaapátiban

Near Surface Geoscience 2012, Párizs

A földi elektromágneses tér kutatása Magyarországon – Tanulmányosorozat  
Bevezető

Változó naptevékenység

A helioszféra háromdimenziós szerkezete

Úridőjárási folyamatok a magnetoszférában

Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Observatórium

A Föld-ionoszféra üregrezonátor

Geomágneses indukció

Kövesligethy Radó (1862–1934)

Kövesligethy-emléknap

Kántás Károlyra emlékezünk

100 éves a kontinensvándorlás és 50 éves a lemeztectonika elmélete

In memoriam: P. Fülöp József, S.J.  
Fabiánncsis László





# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

53. évfolyam (2012) 3. szám



A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA  
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

### TARTALOM • CONTENTS

#### SZERKESZTŐSÉGI ROVAT • EDITORIAL

- 163 Tisztelettel gratulálunk a kitüntetéshez (Congratulations on Academy award)  
164 Tájékoztató (Information) – *Bodoky T.*

#### MGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

- 165 Beszámoló a Magyar Geofizikusok Egyesületének 33. vándorgyűléséről (Report on the 33rd Congress of Assoc. Hung. Geophysicists) – *Kovács A. Cs.*  
167 Szeniorok Bábaapátiában (Excursion of seniors in Bábaapáti) – *Rezessy G.*

#### EAGE HÍREK • NEWS OF ASSOCIATION OF EUROPEAN GEOSCIENTISTS AND ENGINEERS

- 168 Near Surface Geoscience 2012, Párizs (EAGE Conference “Near Surface Geoscience 2012”, Paris) – *Törös E., Ormos T.*

#### TANULMÁNYOK • PAPERS

##### A földi elektromágneses tér kutatása Magyarországon – Tanulmányosorozat (Investigations of the electromagnetic field of the Earth in Hungary – Series of studies)

- 170 Bevezető (Introduction) – *Verő J., Wesztergom V.*  
171 Változó naptevékenység (Varying solar activity) – *Baranyi T., Gyenge N., Győri L., Korsós M., Ludmány A., Muraközy J.*  
176 A helioszféra háromdimenziós szerkezete (Three-dimensional structure of the heliosphere) – *Erdős G., Balogh A.*  
182 Űridőjárási folyamatok a magnetoszférában (Space weather processes in the magnetosphere) – *Lichtenberger J., Ferencz Cs.*  
191 Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Observatórium (Geomagnetism: Tihany Geophysical Observatory) – *Kovács P., Csontos A., Heilig B., Hegymegi L., Merényi L., Vadász G., Koppán A.*  
204 A Föld-ionoszféra üregrezonátor (The Earth-ionosphere cavity resonator) – *Sátori G., Bór J., Barta V., Nagy T., Kovács K.*  
215 Geomágneses indukció (Geomagnetic induction) – *Ádám A., Kis Á., Lempéger I., Novák A., Prácser E., Szarka L., Wesztergom V.*  
223 Kövesligethy Radó (1862–1934) (Radó Kövesligethy (1862–1934)) – *Hágen A., Jaloveczki J.*

#### HÍREK • NEWS

- 226 Kövesligethy-emléknap (Memorial Day devoted to Kövesligethy) – *Wesztergom V.*  
228 Kántás Károlyra emlékezünk (Remembering Károly Kántás) – *Wesztergom V.*  
229 100 éves a kontinensvándorlás és 50 éves a lemeztektonika elmélete (The theory of continental drift is 100 years old and 50 years old that of plate tectonics) – *Wesztergom V.*

#### IN MEMORIAM

- 230 P. Fülöp József, S.J. (1932–2010) – Emlékezés egy különös sorsú évfolyamtársamra – *Gerzson I.*  
231 Dr. Fabiáncsics László, aranyokleveles geofizikus mérnök (1934–2012) – *Baráth I., Bucsi Szabó L., Hursán L., Mészárosné Jelinek B., Papp J., Szalay I., Zsadányi É.*

# MAGYAR GEOFIZIKA

## HUNGARIAN GEOPHYSICS

53. évfolyam (2012) 3. szám

A MAGYAR GEOFIZIKUSOK EGYESÜLETÉNEK FOLYÓIRATA  
JOURNAL OF THE ASSOCIATION OF HUNGARIAN GEOPHYSICISTS

*Főszerkesztő • Editor-in-Chief*

DR. BODOKY TAMÁS

E-mail: bodoky.tamas@mfgi.hu

*Szerkesztőbizottság • Editorial Board*

DR. BARÁTH ISTVÁN, KAKAS KRISTÓF, DR. LENKEY LÁSZLÓ,

DR. PETHŐ GÁBOR, DR. SZARKA LÁSZLÓ, VERŐ LÁSZLÓ

*Technikai szerkesztő • Technical Editor*

HOCK GÁBOR

E-mail: hockg@t-online.hu



Lapunk megjelenését a Magyar Olaj- és Gázipari Nyilvánosan Működő Részvénytársaság támogatja

---

A szerkesztőség a szakcikkek (tanulmányokat) szaklektorálás után közli. A szaklektorok névsorát az évvégő számban tesszük közzé. A lapban megjelenő cikkek adatainak és állításainak helyességért, ill. közölhetőségéért kizárólag a szerzők tartoznak felelősséggel.

---

Kiadja a Magyar Geofizikusok Egyesülete  
A kiadásért felel Király András

Szerkesztőség: 1145 Budapest, Columbus u. 17–23.  
Telefon/Fax: (1) 201-9815  
Titkársági e-mail: postmaster@mageof.t-online.hu  
Honlap: www.mageof.hu

Borító, tipográfia és nyomdai előkészítés:  
EP Systema Bt., Budapest

Készült: NestPress Kft., 1116 Budapest, Vegyész u. 17–25.  
Felelős vezető: Fekete Iván

Előfizethető a Magyar Geofizikusok Egyesületénél  
(1371 Budapest, Pf. 433, Telefon/Fax: (1) 201-9815)  
egyesületi tagoknak tagdíj ellenében  
Megjelenik évente négyszer

INDEX: 26 507  
HU ISSN 0025-0120

## Tisztelettel gratulálunk a kitüntetéshez



**Dr. Posgay Károly**

*Posgay Károly* kiemelkedő tudományos életművét a Magyar Tudományos Akadémia Eötvös József-koszorú adományozásával ismerte el. A kitüntetést, amely az Akadémia legrangosabb kitüntetése, 2012. november 5-én Pálinkás József az Akadémia elnöke adta át ünnepélyes keretek közt az Akadémia felolvasótermében.

Posgay Károly 1925-ben Budapesten született. 1950-ben szerzett kitűnő eredménnyel bányamérnöki oklevelet a Sop-

roni Műegyetem Bányamérnöki Karán. A végzést követően az Eötvös Loránd Geofizikai Intézetnél (továbbiakban ELGI) helyezkedett el, ahol 1950 és 1956 között szeizmikus szénhidrogén- és szénkutató méréseket, valamint mérnök-geofizikai vizsgálatokat irányított. 1956-ban a Szeizmikus Osztály vezetésével bízták meg.

1957-ben Kínába küldték és a Kínai–Magyar Geofizikai Expedíció főkiértékelőjeként. Ez az expedíció volt a magyar geofizika eddigi legsikeresebb expedíciója, amely Kína máig legnagyobb szénhidrogénmezőjének (Danquing, Mandzsúria) a felfedezéséhez vezetett.

1960-ban történt hazatérése után az ország földmágneses térképének értelmezéséből készítette el kandidátusi értekezését, amelyet 1967-ben védett meg. 1962-ben ismét az ELGI Szeizmikus Osztálya, majd 1970-ben a Szeizmikus és Számítástechnikai Főosztálya vezetésével bízták meg. Az általa vezetett osztálynak, illetve főosztálynak az alkalmazott szeizmika valamennyi területén, a szeizmikus szénhidrogén-, szén-, bauxit- és víz-, továbbá bányabeli és mérnök-geofizikai kutatásokban, valamint a szeizmikus és számítástechnikai műszerfejlesztésben is sikerült jelentős tudományos és gazdasági eredményeket elérnie.

A szeizmikus mélyszerkezet-kutatásnak kezdettől fogva motorja és elismert vezető szakembere volt. A szeizmikus kéreg- és felsőköpeny-kutatásban a 60-as évek közepén kezdeményezte a nemzetközi együttműködés kiépítését. Az ezt követő évtizedben jelentős nemzetközi szelvényháló készült el Kelet- és Közép-Európában.

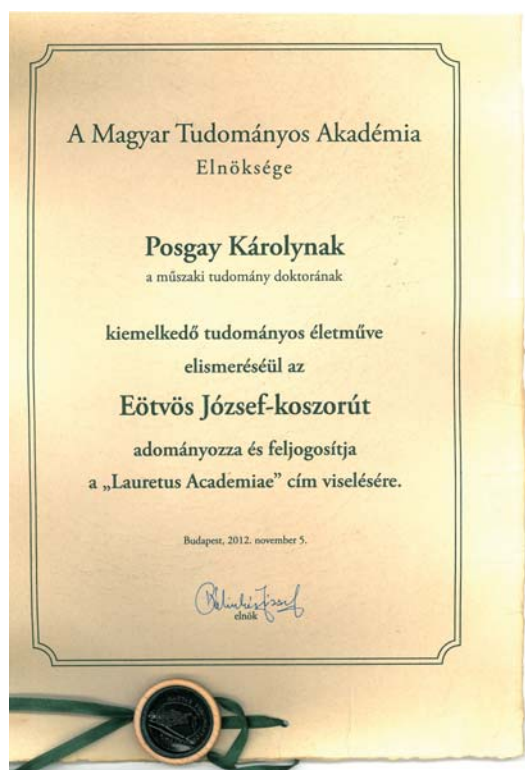
A 70-es évektől módszer- és műszerfejlesztéssel foglalkozott, a számítástechnika felhasználásával az ő vezetésével végezték el a felső köpeny tartományára (a világon) az első reflexiós sebességmeghatározást és az asztenoszféraig hatoló reflexiós szelvényezést. Világszerte elismert eredménye a

Pannon-medence speciális kéregszerkezetének a meghatározása, a Moho-felület országos térképezése és a Békési-medence alatti anómáisan emelt helyzetű asztenoszféra megismerése volt.

1990-ben nyugdíjba vonult, de hazai és nemzetközi szervezetek által támogatott témákban továbbra is az ELGI-ben dolgozik. 1994-ben kutatási eredményeit a Magyar Tudományos Akadémia a Műszaki tudomány doktora címmel ismerte el.

2004-ben a Miskolci Egyetem műszaki-teremtudományi bizottsága a földtudomá-





nyok habilitált doktorává nyilvánította, majd az egyetem rektora és a Műszaki Földtudományi Kar dékánja egyetemi magántanári címet adományozott neki. 2009-ben kapta meg a Miskolci Egyetemen bányamérnöki gyémántoklevelét (lásd *Magyar Geofizika* 51/2).

Posgay Károly kiemelkedő nemzetközi elismertséget szerzett a Pannon-medence kéregszerkezetének vizsgálatával és az eredmények széles körű publikálásával a szakma vezető (angol és német nyelvű) folyóirataiban és monográfiáiban. A Pannon-medence a húzásos (extenziós) eredetű, ív mögötti süllyedékek világszerte elismert alaptípusa lett, nemcsak geotektonikai helyzete okán, hanem a hazai geofizikai, geológiai és geokémiai kutatások magas színvonala miatt is. Ezek alapját a medence kérgének korszerű vizsgálata és a mérésekből levont geodinamikai következtetések képezik.

Az idén 87 éves Posgay Károly teljes szellemi frissességnek örvend, és ma is aktív résztvevője szakmai közéletünknek. Mindannyiunk számára kiemelkedő példa a tudomány szeretetére és alkotó művelésére.

Szerkesztőség

## Tájékoztató

Tisztelt Kollégák! Tisztelt Szerzők és Olvasók!

A különböző szakirodalmi adatbázisok egyre fontosabb szerepet kapnak egy-egy kutatóhely, tanszék, kutató vagy diák teljesítményének megítélésében. Ezért alapvető érdekünk, hogy a szerzők nevei helyesen szerepeljenek bennük. Sajnos, a magyar nevek sorrendje, ahol a családnév áll elől, éppen fordítottja az európai, nem magyar, elsősorban angol nevek sorrendjének, ahol a családnév a keresztnév után áll.

Bár mint ismeritek, a *Magyar Geofizikában* minden szakcikk elején szerepelnek a szerzők nevei angol írásmóddal és cikk címe angolul, az adatbázisokban (elsősorban a *Scopusban*) mégis egyre gyakrabban fordul elő, hogy a szerzők keresztnévét kiírják, míg családnévüknek csak a kezdőbetűje jelenik meg, ami természetesen az adott cikket nem a tényleges szerzőjéhez, hanem egy nem létező névhez sorolja és az érintett szerző scientometriai statisztikáját komolyan rontja.

Amikor az első panaszok érkeztek a Szerkesztőséghez már a *Magyar Geofizika* több évfolyamnyi cikke került az adatbázisba be hibásan, illetve össze-vissza, hol hibásan, hol jól, sokszor még egy többszerzős cikken belül is az egyik név helyesen, a másik név rosszul. Sikertelenül próbáltuk találni a *Scopus* kezelőivel, és miután jelentős munkával kigyűjtöttük a hibásan megjelenő szerzői neveket, kértük ennek javítását, ami némi késedelemmel meg is történt.

Ezután a tartalomjegyzékből kihagytuk a keresztnéveket, mert egyedül ott szerepeltek a magyar nevek együtt az angol címmel, és gondosan elmagyaráztuk a problémát, valamint kértük, hogy szíveskedjenek csak az angol részt nézni.

Ám a hibák nem szüntek meg, azóta is ugyanolyan gyakran jelennek meg a hibásan rövidített nevek. Mit mondhatunk erre? Vagy nagyon buta emberek, vagy – ami még valószínűbb – egy nagyon buta program végzi a *Magyar Geofizika* cikkeinek adatbázisba vételét.

Egyetlen megoldás kínálkozik a problémára, mégpedig az, hogy ne áruljuk el nekik a keresztnéveket, és akkor kénytelenek lesznek helyesen, a családnéveket használni.

- Ezért a jövőben a magyar cím alatt sem fogjuk kiírni a szerzők keresztnéveit, csak a vezetékneveket és a keresztnév kezdőbetűjét.
- Tekintettel arra, hogy több, igen gyakori családnév létezik nyelvünkben, ezért a szerzők teljes nevét kisméretű betűkkel a cikk végén, a lábjegyzetek helyén tüntetjük fel, remélve, hogy ott csak nem találják meg.

A döntéssel kapcsolatban végignéztem több mértékadó, nagy nemzetközi szaklapot és azt tapasztaltam, hogy a keresztnévek kiírása azokban sem általános gyakorlat. Így remélem, hogy ez a kényszer szülte megoldás szerzőink és olvasóink körében nem fog visszatetszést kiváltani.

Bodoky Tamás

# Beszámoló a Magyar Geofizikusok Egyesületének 33. vándorgyűléséről

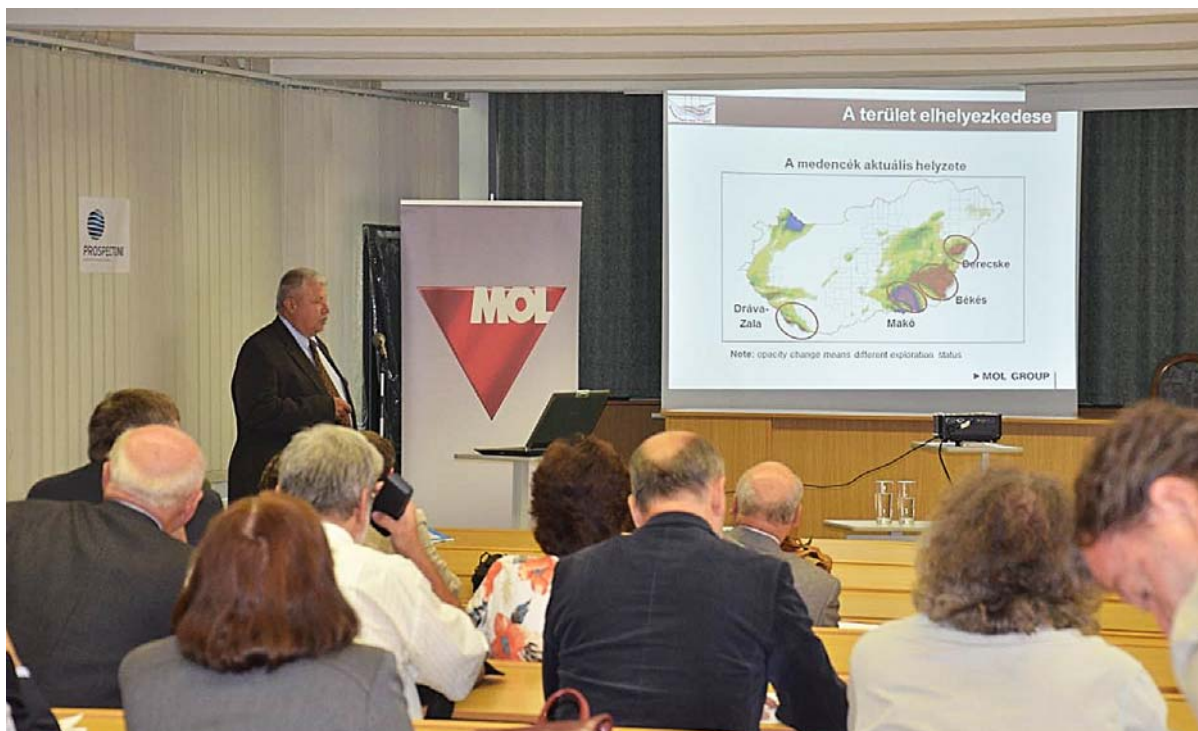
Miskolc-Egyetemváros, 2012. szeptember 27–29.

A vándorgyűlés megrendezése hosszú szakmai múlttal rendelkezik és minden évben jelentős esemény a hazai földtudomány életében. A Magyar Geofizikusok Egyesületének (MGE) elnöksége 1956 októberében határozott arról, hogy „az Egyesület minden év szeptemberében tudományos ankétot rendez külföldi vendégek meghívásával”. Az első ilyen „szeptemberi ankét” 1957 szeptemberében Budapesten és Tihanyban volt. A rendezvény későbbi története elágazó fához hasonlít. A francia eredetű ankét név helyett hamarosan a szimpózium elnevezést használták, és 1964-től az Egyesület törekedett a rendezvény nemzetközivé fejlesztésére. Innen eredt az évenként megrendezett Nemzetközi Geofizikai Szimpózium nagyszerű rendezvénye, amelynek első (nemzetközi) helyszíne Lipcse (1967), az utolsó 1991-ben Kijev volt. A szimpóziumokkal párhuzamosan azonban az Egyesület szervezett hazai vándorgyűléseket is, az első ilyen rendezvény 1965 szeptemberében Szegeden volt. Azóta az ország 15 városa adott helyet harminckét vándorgyűlésnek, teljesítve az alap gondolatot, hogy a rendezvény az adott régió geofizikai/földtani kérdéseit helyezi előtérbe.

A vándorgyűléseket az Egyesület általában évente rendezte, a kilencvenes évektől kezdve mindig ősszel. Később, a pénzügyi nehézségek miatt a három társegylet, a Magyarhoni Földtani Társulat, az Országos Magyar Bányász–Kohász Egyesület és az MGE megállapodott arról, hogy felváltva rendezzi az „őszi” konferenciáját. Így az MGE rendezte a vándorgyűlést 2003-ban Szolnokon, 2006-ban Zalaegerszegre és 2009-ben Pécsen. Így érkeztünk el 2012-ig, amikor az Egyesület 33. vándorgyűlésének a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszéke és az Egyetem Felnőttképzési Regionális Központja adott otthont.

Szeptember 27-én és 28-án a Miskolci Egyetem campusának területén, parkosított környezetben fekvő modern Felnőttképzési Központjába érkezett a vándorgyűlés 102 regisztrált résztvevője. Az előadások száma beleértve a plenáris, az angol, ill. magyar nyelvű szóbeli és poszterelőadásokat összesen 62 volt, melyet 5 szekcióban hallgathattak meg az érdeklődők. A három évvel ezelőtti pécsi vándorgyűléshez hasonlóan a külföldi résztvevőnek köszönhetően egy önálló angol nyelvű szekció is megrendezésre került.





11 előadással. A vándorgyűlés programfüzetében ezek rövid tartalmi kivonatát magyarul vagy angolul adtuk közre. A szerzők lehetőséget kaptak arra is, hogy a Miskolci Egyetem *Geosciences and Engineering* c. folyóiratában teljes értékű, hatoldalas angol nyelvű cikkben mutassák be eredményeiket. Emellett lehetőség volt négyoldalas magyar és angol nyelvű ún. „extended abstract”-ok elkészítésére is. A cikkek és az összefoglalók nyílt forrásként, pdf formátumban letölthetők a konferencia kétnyelvű tematikus honlapjáról (<http://www.uni-miskolc.hu/~earthc>). A kiadványokat a konferencia résztvevői a helyszínen megkapták. A vándorgyűlések anyagának ilyen mértékű publikáltsága, valamint a konferencia nemzetközi jellege – több külföldi országból jöttek résztvevők (Lengyelország, Olaszország, Ukrajna) – jelentős előrelépést jelent a korábbiakhoz képest.

A napirendet egy baráti vacsora (a miskolci Vigadóban) és egy borkóstolóval egybekötött záróvacsora tette színessé. A harmadik, zárónap délelőttjén szakmai-kulturális kiránduláson vehettek részt a regisztrált látogatók, melynek keretében a Miskolci Egyetem oktatói bemutatták a környék földtani és történelmi nevezetességeit. Az emlékezetes pillanatokat több társunk is megörökítette, a válogatott felvételek a konferencia honlapján („képek-letölthető fájlok” menüpont alatt) és az Egyesület fényképalbumában ([www.picasaweb.google.com/magyar.geofizika](http://www.picasaweb.google.com/magyar.geofizika)) megtekinthetők.

A rendezvényt *dr. Késmárky István*, az Egyesület elnöke nyitotta meg, külön köszönve a rendezvény létrejöttét támogató cégeket és intézményeket. Ezt követően a házigazda Miskolci Egyetem tudományos rektorhelyettese, *dr. Dobróka Mihály* köszöntötte az egybegyűlteket. A társ-egyesületek vezetőinek, *dr. Baksa Csabának* (MFT) és *dr. Havasi Istvánnak* (OMBKE) beszéde után kezdődött el a plenáris szekció. Elsőként *dr. Holoda Attila*, a Nemzeti

Fejlesztési Minisztérium helyettes államtitkára beszélt a földtudományok energiastratégiai vonatkozásai legújabb kihívásairól. Ezt követően *dr. Fancsik Tamás*, a nemrégiben létrehozott Magyar Földtani és Geofizikai Intézet igazgatója beszélt a MÁFI és az ELGI egyesítéséről és az új intézet feladatairól. Zárásként *dr. Ettore Cardarelli*, a római „La Sapienza” Egyetem Geofizikai Tanszékének professzora a geofizika régészeti alkalmazásába nyújtott betekintést olaszországi példák révén.

A megnyitót követő délután során angol nyelvű előadásokat hallgathattak meg a résztvevők külföldi és hazai előadótól, különböző témákban a mérnökgeofizikai problémáktól a mélyfúrás geofizikáig. Pénteken két külön teremben, a Miskolc-, illetve a Bosch-teremben folytatódott a vándorgyűlés. Ezen a napon összesen 38 szóbeli előadás volt, melyek számos érdekes tudományos eredményt mutattak be az érdeklődők számára. Az előadások során részletes betekintést nyertek a résztvevők a Miskolci Egyetem Műszaki Földtudományi Karán folyó kutatási programokról, az ásványi nyersanyagkutatástól a különböző laboratóriumi és elméleti vizsgálatokig. Az előző vándorgyűléshez hasonlóan jó néhány előadás foglalkozott a bátaapáti radioaktív hulladék-tároló kérdésével. Egy közel teljes szekcióban ismerkedhettünk meg a Magyarországon folyó uránérc- és szénkutatás legújabb eredményeivel. A péntek délutáni programot színesítette a 10 poszterelőadás is, ahol a résztvevőknek lehetőségük nyílt az előadókkal további eszmecsere folytatni.

Végezetül, ezúton is szeretnénk megköszönni a rendezvény létrejöttében és sikeres lebonyolításában kiemelkedő szerepet vállaló MOL Nyrt., a Miskolci Egyetem és az EAGE PACE Alapítvány által nyújtott támogatást.

*Kovács Attila Csaba, titkár*



# Szeniorok Bátaapátiban

(A Szerkesztőség által az előző számban hiányolt beszámoló pótlása)

Mi, Egyesületünk lélekben ifjú nyugdíjasai idén a Bátaapátiban épülő Nemzeti Radioaktív hulladék-tárolót (NRHT, [www.rhk.hu](http://www.rhk.hu)) választottuk úti célul. A 44 résztvevő közül valószínűleg nem gondolta mindenki, milyen hosszú lesz ez a nap. Talán túlbecsültük állóképességünket. Kelés álmosan, pirkadat előtt, hazaérkezés este tíz után, és volt, aki még ezután ült fel egy Szolnokra tartó vonatra.

2012. szeptember 5-én reggel fél hatkor találkoztunk Budapesten, a Déli pályaudvaron. Pécsről egy bérelt busszal mentünk tovább Bátaapátiba. Vendéglátónk, *Berta József*, a Mecsekérc Zrt. főmérnöke a bejáratnál várt minket. Rövid, szemléletes ábrákkal és fényképekkel tarkított előadásban ismertette a felszín alatti munkálatokat.

Az NRHT felszín alatti tereinek építését egy felszíni és egy felszín alatti kutatás előzte meg, a kutatás részeként sokunk által ismert geofizikai mérésekkel. 2005 és 2008 között, még a felszín alatti kutatás során kialakításra került két, egyenként 1700 méter hosszú, 10%-os dőlésű lejtakna összekötő vágatokkal, vizsgálati célra szolgáló oldalkamrákkal és vízkezelő zompokkal. Ezt követte a kutatási zárójelentés, további kiviteli tervek készítése, jóváhagyása, majd a tárolásra kiválasztott terület feltárása (nagy hurok). Az I-K1 és I-K2 tárolókamrák kiképzése idén fejeződött be. A 97 m<sup>2</sup> keresztmetszetű tárolókamrák hossza 74,5 és 85,6 m. A kamrák hosszát agyagos zóna korlátozta, amelyet 5 méternél jobban nem közelíthetett meg sem a kamra, sem a záró homlokzatot biztosító közethorgony.

Társaságunkat az előadást követően többszöri fordulóval szállították le a tárolókamrákba. Bárhol fényképezhattünk, éltünk is a lehetőséggel. Megtapasztalhattuk a létesítmény lenyűgöző méreteit. Láttuk, hogy a beszivárgó víz mennyisége csekély, nagy része elpárolog. Ez annak köszönhető, hogy a vágatok előtt a víz kizárására a repedéseket injektál-

ták, így a tárolókamra nyaktagjába épített vízhozammérő szerint az összegyűjtött víz mennyisége percentként fél liter.

A szakmai programot követően a palatincai Nimród fogadóban költöttük el előre megrendelt ebédünket. Ezután visszabuszoztunk Pécsre, a Zsolnay Kulturális Negyed bejáratához. A Zsolnay Gyár aranykorát bemutató Gyugyi-gyűjteményt ([www.gyugyi.hu](http://www.gyugyi.hu)) idegenvezetői segédlettel néztük meg. Fiatal tárlatvezetőnk ugyancsak értette a dolgát. Két órán keresztül – az interneten mindössze hat és fél perc – mesélt a gyárról, a Zsolnay családról és természetesen a 600 kiállított kerámiáról. Ne hagyja ki senki sem, ha Pécsen jár!

Elismerés minden szeniornak, aki részt vett a programon, és köszönet a kirándulást szponzoráló ELGOSCAR Kft-nek ([www.elgocar.hu](http://www.elgocar.hu)) és a Magyar Geofizikusokért Alapítványnak ([www.mageof.hu](http://www.mageof.hu)).

*Rezessy Géza*



## Near Surface Geoscience 2012, Párizs

Az EAGE „Near Surface” éves konferenciájának megrendezésére az idén Párizsban került sor, szokásosan szeptember első hetében. A rendezvényt itthon sokan ismerik, akik nem, azoknak annyit, hogy ez az általunk tavaly megrendezett Balkán Geofizikusok Konferenciájához hasonlít leginkább, azaz zömében geofizikai előadások vannak (az EAGE éves nagy konferenciáján a teljes geotudományok szerepelnek a palettán), műszerkiállítással, terepi műszerek bemutatásával, s mindez a rendezvény előtti szakmai workshopokkal, esetleg kirándulással kiegészítve.

Apropó workshop: az EAGE rendszeresen szervez önálló workshopokat szerte a világban, konferenciáktól függetlenül is. Itt és most elsőként az EAGE történetében két, egymást időben átfedő, témájában egymáshoz nem feltétlenül illeszkedő rendezvénye volt az EAGE-nek ugyanazon a helyen, mert a mienkkel szinte egyidejűleg tartották a Távérzékelési Workshopot is. Mindez pozitívan hatott mindkét

rendezvény látogatottságára. Persze ne tagadjuk, a résztvevők létszámának alakulásában a kiszemelt városnak is jelentős szerepe van.

Az EAGE „Near Surface” konferenciák témájukat tekintve lefedik az alkalmazott geofizika szinte minden területét, kivéve talán a szénhidrogén-kutatást, amely nyilvánvalóan nem „Near Surface” feladat. A Párizsban elhangzott előadások alapján elmondható, hogy egyre nagyobb tért nyernek a geofizika geotechnikai célú alkalmazásai, valamint hogy növekszik a 3D-s alkalmazások súlya a sekély geofizikában, a geoelektromos és a szeizmikus módszereknek is.

A helyi előadók, egyetemek, geofizikai, geotechnikai cégek előadói egy adott rendezvény helyszínén általában többségben vannak, így jól le lehet mérni, hogy az adott országban milyen szinten áll a mérnökgeofizikai kutatás művelése, kik a meghatározó szakmai egyéniségek. Meg lehet becsülni a szakmai oktatás színvonalát (hány PhD-



Somogyiné Molnár Judit előadása

hallgató tart előadást), a fontosabb kutatási irányvonalat egy-egy intézménynél. E szempontok szerint a franciák viszonylag jól szerepeltek, de pl. nem annyira jól, mint ahogy az ezt megelőzőn a svájciak a náluk rendezett konferencián.

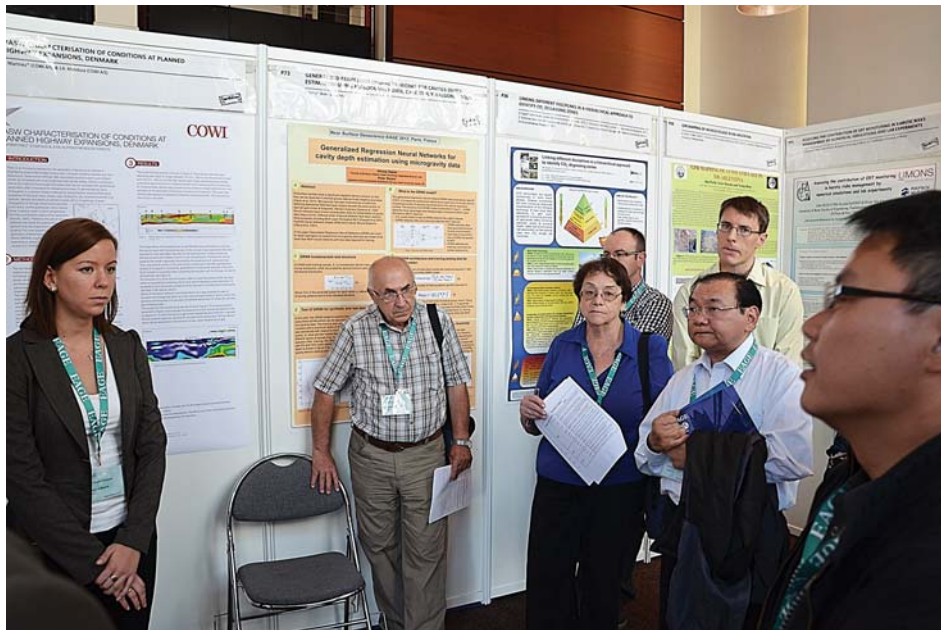
Visszatekintve az általunk 1999-ben Budapesten rendezett még EAGE konferenciára, sajnos mi magyarok egyre kevesebben járunk ezekre a szeptemberi rendezvényekre. Ebből a szempontból a mostani kivétel volt, köszönhetően

elsősorban a Miskolci Egyetemről jött, nagy létszámú geofizikus oktatói és hallgatói csoportnak.

Az EAGE honlapján már lehet jelentkezni a jövő németországi rendezvényre (Bochum), és be lehet jegyezni a naptárba a 2014-es athéni szeptemberi konferenciát is. A mostani előadások kivonata pedig, ahogyan ahhoz már hozzászoktunk, megtekinthetők az „EarthDoc” honlapon.

*Törös Endre*

A fotókat *Ormos Tamás* készítette



Paripás Anikó Noémi várja a kérdéseket



Professzorok diskussziója (Gyulai Ákos és Dobróka Mihály)

# A földi elektromágneses tér kutatása Magyarországon

## Bevezető

Még 2011-ben vetődött fel az a gondolat a földi elektromágneses tér eredetével és jelenségeivel foglalkozó magyar kutatói közösségben, hogy célszerű lenne az ezen a téren elért újabb eredményeinket összefoglalóan ismertetni a szélesebb tudományos közösséggel. A gondolat a 2012. évi akadémiai közgyűlés keretében, a X. Földtudományi Osztály rendezvényeként valósult meg. A *Magyar Geofizika* vállalta, hogy az ezen előadások nyomán készült tanulmányokat – a jelzett *Tanulmány sorozat* keretein belül – megjelenteti.

A tanulmányok nyomon kísérik a földi elektromágneses tér létrejöttét, kezdve annak elsődleges forrásánál, a Nap elektromágneses terénél, folytatva a bolygóközi tér jelenségeivel, majd a földi magnetoszférában lejátszódó folyamatokkal, beleértve a villámokkal kapcsolatos elektromágneses jelenségeket és befejezve a Föld belsejében indukálódó áramokkal.

Az egyes szerzőcsoportok által megfogalmazott fejtegetések sok helyen kapcsolódnak egymáshoz, sőt egyes esetekben látszólagos ismétlések is előfordulnak. Ez utóbbiak azonban a kérdéseket az éppen tekintett jelenségcsoport szempontjából vizsgálják, így részben anyagukban, de szemléletükben feltétlenül újat is hoznak.

Magyarországon hosszú ideje folynak ezen a téren kutatások. Nem részletezve a 18. század második felétől soraközó geomágneses obszervatóriumlétesítési próbálkozásokat, az első jelentős eredmény Hell Miksa norvégiai expedíciója során végzett megfigyeléseken alapuló doktori értekezése

volt. Ezt 1769-ben Koppenhágában védte meg. Ez volt a világon az első, a sarki fénnel foglalkozó doktori értekezés. 1900 körül Fényi Gyula, a változó Nap világszerte ismert kutatója szerkesztette az első, a villámok elektromágneses sugárzásán alapuló zivatarjelző készüléket, amely e jelenségek első gyakorlati alkalmazása volt. Kunetz Géza a múlt század 30-as éveiben jelentősen hozzájárult a földkéreg kutatására szolgáló elektromágneses módszerek fejlesztéséhez. Ő volt az, aki elsőként felfigyelt egyes geomágneses jelenségek térbeli és időbeli összefüggéseire. Ezt a munkát folytatta Kántás Károly a Sopronban és Pekingben végzett egyidejű tellurikus észlelések elemzésével. Az 50-es, 60-as években alakult meg a legtöbb olyan kutatóhely, amely az űrkutatás gyors fejlődésével párhuzamosan egyre nagyobb részt fedett le a Nap–Föld fizikai jelenségeken belül.

Az itt tárgyalt jelenségekkel kapcsolatos nemzetközi érdeklődés azért is fokozódott, mert egyes ide tartozó események közvetlenül veszélyeztetnek fejlett technikát alkalmazó eszközöket, pl. a magnetoszférában keringő mesterséges holdak berendezéseit vagy földi elektromos hálózatokat, ugyanakkor segítségükkel kutatható a globális éghajlatváltozás a villámgyakoriság révén, ugyanígy a Föld belső szerkezete is különböző elektromágneses módszerekkel.

A következő tanulmányok bizonyos értelemben egy korszak lezárását jelentik, hiszen éppen 2012-ben szinte valamennyi szerző munkahelyének neve megváltozott. Bár kutatásaikat remélhetőleg folytatják, mégis célszerűnek látszott az elmúlt években elért eredményeket összegezni.

*Verő József, Wesztergom Viktor*

# Változó naptevékenység

BARANYI T., GYENGE N., GYÓRI L., KORSÓS M.,  
LUDMÁNY A.<sup>@</sup>, MURAKÖZY J.

MTA CsFK CsI Napfizikai Obszervatórium, 4010 Debrecen, Pf. 30.

<sup>@</sup>E-mail: ludmany@tigris.unideb.hu

A Nap mágneses tereinek hosszú távú viselkedését, a szoláris dinamófolyamat sajátosságait leginkább a napfoltok tér- és időbeli mintázatainak vizsgálatával lehet feltárni, ennek eszközei a greenwichi és debreceni napfoltkatalógusok. Az utóbbi évek eredményei közül említésre méltó a félgömbi ciklusok fáziskülönbségeinek 4 + 4 ciklusnyi periódusa, a foltkeletkezés axiálszimmetriától való eltérése és annak dinamikája, a Spörer-diagramnak a torziós oszcilláció sebességterével való összefüggése, adalékok a naptevékenység hosszú távú változásához, illetve új fejleményként fler-előrejelzési kutatások a nagyfelbontású katalógusadatok elemzése révén.

## Baranyi, T., Gyenge, N., Gyóri, L., Korsós, M., Ludmány, A., Muraközy, J.: Varying solar activity

The long-term behaviour of solar magnetic fields, the properties of solar dynamo process can be studied mostly by examining spatial and temporal patterns of sunspots, the tools of this work are the sunspot catalogues of Greenwich and Debrecen. Among the achievements of the recent years the following results are worth mentioning: the 4+4 cycle period of the phase-lags of solar hemispheric cycles, the non-axisymmetry of spot emergence and its dynamics, the connection of Spörer-diagram with the velocity field of torsional oscillation, evidences for the long-term variation of solar activity, and as a new progress, flare-forecast investigations by using high-resolution sunspot data.

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

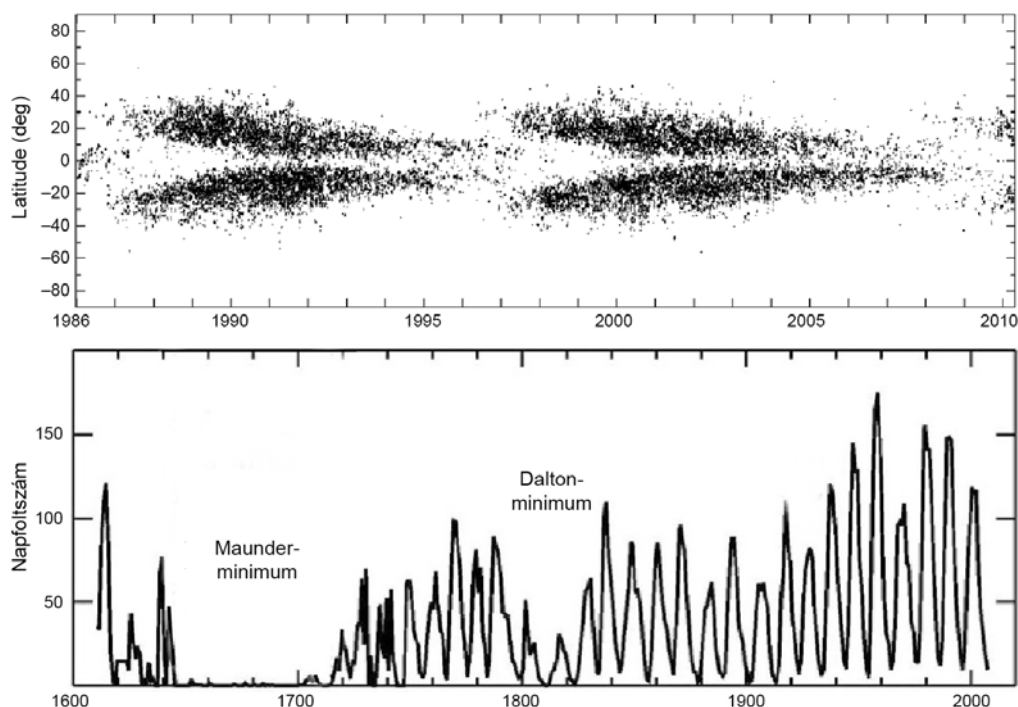
A „naptevékenység” gyűjtőfogalom a Nap mágneses tereinek változásait és eseményeit jelöli. A Nap plazmaanyaga jelentős mennyiségű töltést tartalmaz, ezek áramai mágneses tereket keltenek. Azt a folyamatot, melyben mechanikai (mozgási) energiából mágneses energia jön létre, dinamófolyamatnak nevezzük. Ennek mechanizmusa igen bonyolult sebességtereket feltételez. A plazma-asztrofizika egyik alapvető felismerése a Cowling-féle antidinamó tétel, mely szerint stacionárius tengelyszimmetrikus mágneses tér nem lehetséges, más szóval, ha egy köráram (forgó plazma) létrehoz egy poloidális mágneses teret, az tartósan nem maradhat fenn. Az asztrofizikai mágneses terek tehát csak úgy létezhetnek, ha a különböző struktúrájú mozgásterek folyamatosan alakítják azokat egyik alakzathoz a másikba oda-vissza, vagyis a naptevékenység csakis változó lehet.

E változékonyság legrégebben ismert eleme a ciklikus viselkedés, közismertebb nevén a 11-éves napfoltciklus (1. ábra). Ennek során a globális poloidális tér (amikor a Nap globális mágneses tere dipól jellegű) az alacsonyabb szélességi zónák nagyobb szögsebessége (az ún. differenciális rotáció) miatt felcsavarodik, és két – északi és déli – toroidális tér jön létre. A két tórusz a ciklus során közelít az egyenlítőhöz, és ezekből helyenként mágneses fluxuskötegek emelkednek a felszínre, melyeknek a felszínnel való met-

szeteit napfoltokként észleljük. A felbukkanó napfoltok száma eleinte növekszik, majd egy maximum után csökken, és mire a tóruszok elérik az egyenlítőt, a fluxusfelbocsátásuk is megszűnik. Ekkorra azonban már készen áll az új dipóltér ellenkező mágneses polaritással és indul az új ciklus. A folyamat tehát a globális poloidális és toroidális mágneses terek váltakozó egymásba alakulásaként írható le.

Az itt nagyon röviden vázolt folyamatban a legnagyobb elméleti kihívást annak megértése jelenti, hogy hogyan jön létre a következő ciklus kiindulópontjaként az új poloidális tér. Az említett mozgásterek közül a legrégebben ismert a differenciális rotáció, ez nagy léptékű, globális sebességtér hasonlóan a nehezebben kimutatható meridionális áramlásokhoz. Vannak azonban kis léptékű sebességterek is, mégpedig a konvektív mozgásoké, melyek a Nap gömbjének külső 30%-ában az energiatranszportot végzik, valamint a rotáció következtében minden elmozdulásra ható Coriolis-elfordulások. E folyamatok tényleges szerepét kell feltárni a dinamóelméletnek.

A Napfizikai Obszervatórium adatbázisa és kutatási profilja elsősorban ebbe a jelenségkörbe enged betekintést, a jelen írás azt a címet is viselhetné, hogy változó naptevékenység debreceni szemmel. A feladat magának a ciklusnak a változékonyságát feltérképezni. Érdekes jelenségek: a cik-

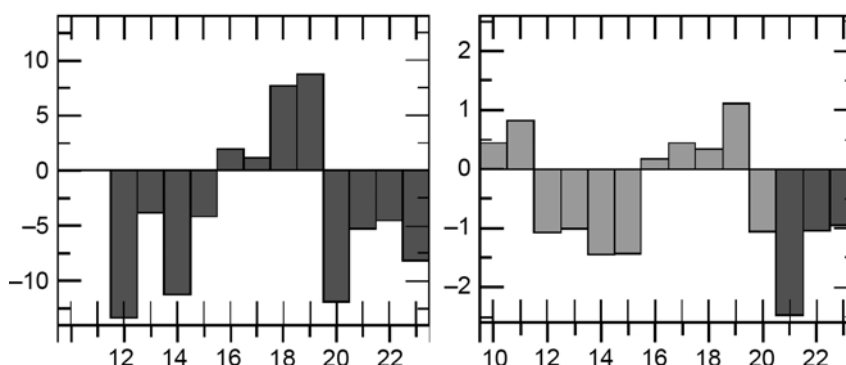


**1. ábra** A 11-éves ciklus legfontosabb időbeli mintázatai. Felül: a napfoltcsoportok heliografikus szélességének vándorlása az egyenlítő felé a debreceni napfoltkatalógus alapján a 22. és 23. ciklusban (Spörer-diagram). Alul: a napfoltrelatívszám négyszáz éves változása

**Figure 1** The most important patterns of 11-year cycle. Upper panel: the equatorward migration of heliographic latitudes of sunspot groups from the Debrecen sunspot catalogue in cycles 22 and 23 (Spörer-diagram). Lower panel: the variation of sunspot number in the last 400 years

lusok burkológörbéjének ingadozásai – mint a kb. 90 éves Gleissberg-ciklus, a ciklusok leállása és újraindulása – mint az ún. Maunder-minimum a 17. században és a többi elhúzódó minimum, az egymás utáni gyenge ciklusok – mint a Dalton-minimum a 19. században, továbbá a mostani, a 24. számú ciklus kb. 2 éves késése és a vártnál gyengébb aktivitása, ami jelenleg sok találgatásra ad okot. A napciklusnál rövidebb, ún. közepes periódusok is fontos célpontok, ezek között a kb. 3,5 éves és a kb. 1,3 éves ingadozások látszanak különösen lényegesnek.

A jelenségkör vizsgálatának egyik legfontosabb eszköze sok évtized óta a Greenwich Photoheliographic Results (GPR, 1874–1976), a klasszikus napfoltkatalógus, mely napi rendszerességgel adja meg a foltcsoportok súlypontjának koordinátáit és összterületét. A napciklusra vonatkozó tudásunk jelentős részben ezen adatok elemzéséből származik. A katalógus készítését 1976-ban befejezték, azóta a Nemzetközi Csillagászati Unió felkérésére a Napfizikai Observatórium dolgozik a folytatáson. A Debrecen Photoheliographic Data (DPD) katalógus 2011-ben érte el a GPR



**2. ábra** A félgömbi ciklusok fáziskülönbségei két módszerrel. Vízszintes tengely: a ciklusok sorszáma. A bal oldali diagram az időbeli eltolódást mutatja hónapokban greenwichi és debreceni adatok alapján, a jobb oldali diagram a félgömbi aktivitások közepes szélességeinek különbségét mutatja fokokban zürichi (világos) és debreceni (sötét) adatok felhasználásával

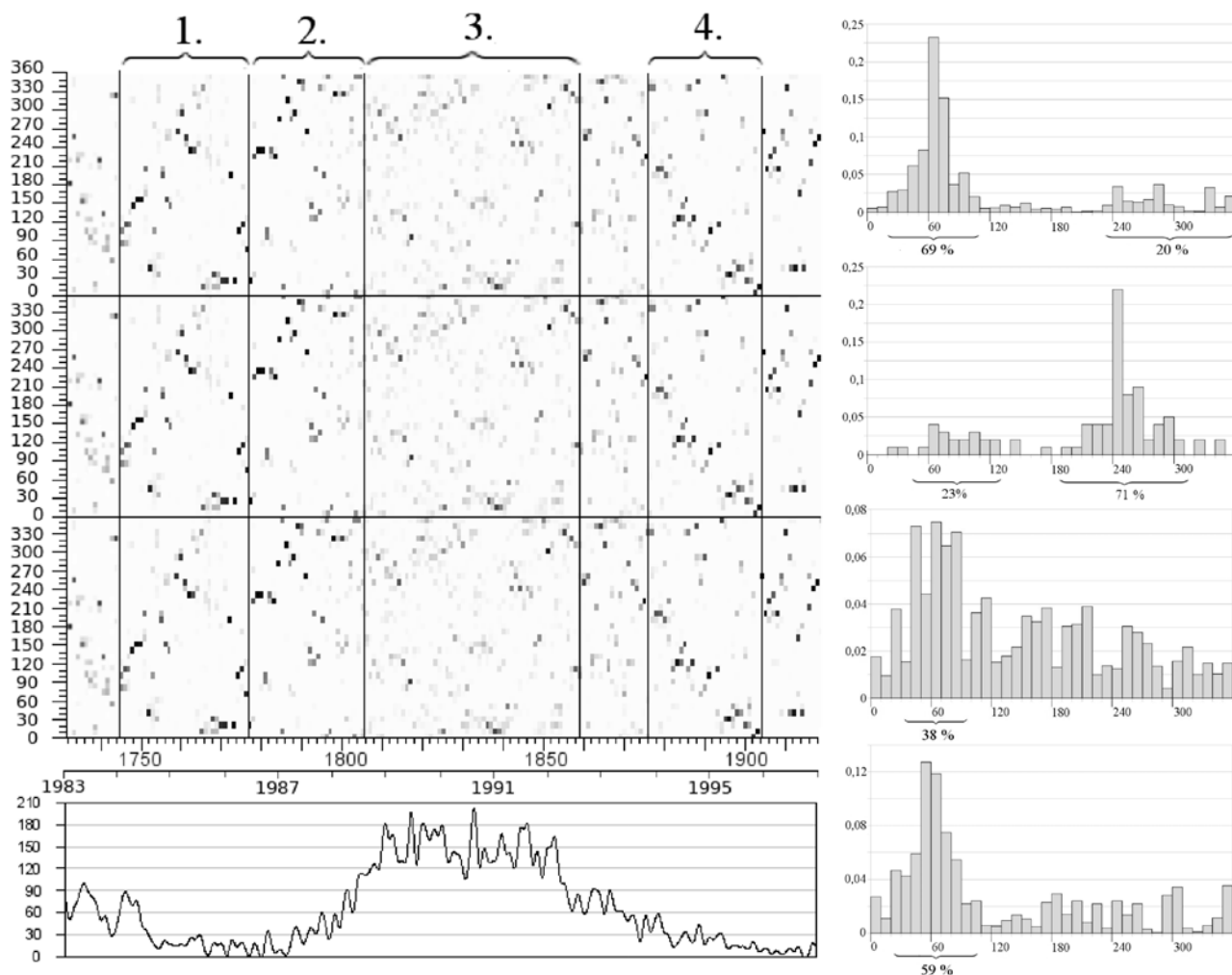
**Figure 2** Phase lags of hemispheric cycles by two methods. Abscissae: cycle numbers. The left diagram shows the time shifts in months based on Greenwich and Debrecen data, the right diagram shows the differences between mean latitudes of hemispheric activities in degrees by using Zürich (light) and Debrecen (dark) data

utáni időszak teljes lefedettségét, a két anyagon együtt immár 150 év napfolttevékenysége vizsgálható.

*Egyformán zajlik-e a ciklus a két félgömbön?* Azt vizsgáltuk, hogy lehetséges-e összefüggés a félgömbi (északi és déli) ciklusok fáziskülönbsége és intenzitása között. Az derült ki, hogy az adatokkal lefedett időszakon egy hosszú távú váltakozás zajlik: négy ciklus során az északi félgömb vezet, a következő négyben pedig a déli, majd újból az északi (2. ábra). Kiderült, hogy korábbi időszakra Waldmeier (1971) is hasonló viselkedést talált Zürichben, az ő eredményeit felhasználva, valamint módszerét a debreceni adatokra alkalmazva kaptuk a 2. ábra jobb oldali diagramját, amely immár 14 ciklusra kiterjedően mutatja a jelenséget. A váltakozás periódusának hossza a vélelmezett Gleissberg-ciklus hosszával mérhető össze, melynek talán ez jelenti a megerősítését, és elvezethet a háttéréhez. Természetesen

nem tudhatjuk, hogy sokkal hosszabb távon is működik-e ez a váltakozás (ezt persze még magáról a napciklusról sem tudhatjuk), de ez a feltűnő szabályosság felveti azt a kérdést, hogy lehetséges-e hosszú távú memóriája a szoláris dinamó valamely kulcsszereplőjének. (Muraközy, Ludmány 2012)

*Hol (a felszín mely pontjain) bukkanhatnak fel aktív vidékek (napfoltcsoportok)?* A szoláris dinamó működésének kezdettől ez az egyik legérdekesebb kérdése, véletlenszerű-e a felbukkanás helye, vagy valamilyen térbeli struktúra kitüntetett környékéhez köthető. Az 1. ábrán látható szélességi mintázat, a Spörer-szabálynak nevezett egyenlítő irányú aktivitásvándorlás már a 19. században is ismert volt, de a hosszúságbeli eloszlás, az ún. aktív hosszúságok vizsgálata a mai napig nehezebb feladat. A kérdés ugyanakkor elméletileg igen lényeges, hiszen a tengelyszimmetriától való eltérés fontos mélybeli struktúrák indikátora. A mód-



**3. ábra** Bal oldali diagram: 10°-os hosszúságintervallumok foltterület-adatai az összes foltterület százalékában Carrington-rotációnként az északi félgömbön 1983–1996 között, a Nap kerülete háromszor van egymás alá rajzolva. Alatta: a 22. ciklus profilja. A kiugró értékek vonulatára parabolát illesztettünk, négy időszakot számokkal jelöltünk. Jobb oldali diagramok: a parabola mentén haladva a kijelölt négy időszak aktivitásának hosszúságbeli eloszlása. Az első és második diagram különbsége jelenti a flip-flop jelenséget

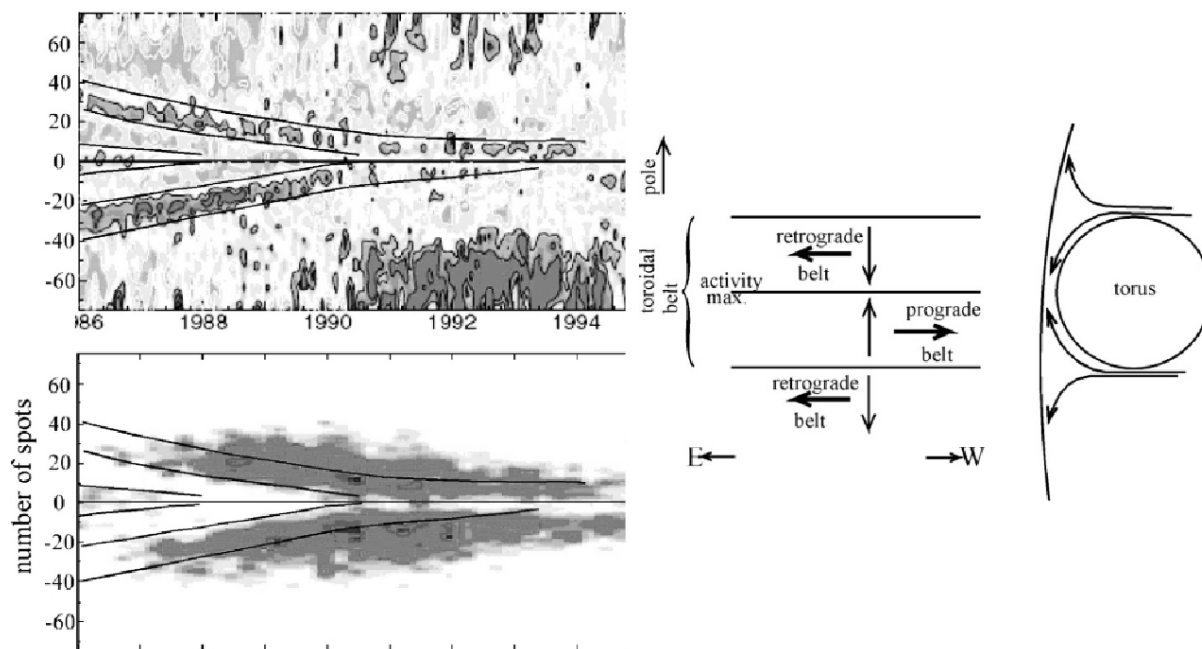
**Figure 3** Left diagram: sunspot area data of 10° longitude bins in percentage of the total sunspot area by Carrington rotations in the northern hemisphere between 1982–1996, the solar circumference is plotted three times under each other. Bottom panel: time profile of cycle 22. A parabola has been fitted on the path of enhanced values, four intervals are marked by numbers. Right diagrams: longitudinal distribution of activity along the path of the parabola. The difference between first and second diagrams means the flip-flop event

szertani nehézségnek az az oka, hogy az a hosszúsági zóna, amelyből az átlagosnál nagyobb valószínűséggel emelkednek ki fluxuskötegek, vélhetőleg egy olyan mélységbeli struktúrához tartozik, melynek rotációs szögsebessége különbözik a felszínén. Carrington-féle szögsebességétől. Ennek elkülönítése alkalmas stratégiát igényel, a módszertani megközelítés sok korábbi munka eredményét befolyásolta. A Napfizikai Observatórium vizsgálatai a korábbiaknál nagyobb térbeli felbontásra és hosszabb időintervallumra épülnek, így sikerült láthatóvá tenni az átlagosnál nagyobb aktivitású zóna vándorlását a felszínhez képest és ezt követve meghatározni a zóna szélességét különböző időszakokban (3. ábra). Az ábrán jól látható, hogy a 2. számú időszakban, az aktivitási zóna átkerül a Nap túlsó oldalára, ez a foltos csillagoknál is megfigyelt flip-flop jelenség (Gyenge et al. 2012).

*Honnan (milyen mélyről) bukkannak fel aktív vidékek?* Erre a kérdésre jelenleg eléggé általánosan elfogadott válasz az, hogy az ún. konvektív zóna aljáról, a tachoklin zóna fölött elhelyezkedő toroidális mágneses térből válik ki egy fluxusköteg, és valamilyen instabilitás következtében felhajtóerő hat rá, majd a felszínre emelkedik. Egyik újabb eredményünk (Muraközy, Ludmány 2011) árnyalhatja ezt a képet. A napfoltcsoportok Spörer-diagramjának és a torziós oszcilláció térképének összehasonlítása (4. ábra) azt a modellt látszik alátámasztani, mely szerint a kifelé tartó konvektív áram a toroidális teret megkerülve Coriolis-

elfordulást szenved, és ez alakítja ki a torziós sebességi sávokat. Mivel a torziós sávok oszcillációs mérések szerint csak kb. 0,9 napsugárnyi mélységig mutathatók ki, ez azt is jelentheti, hogy a globális mágneses tórusz elemei a konvektív zóna aljától, (kb. 0,71 napsugárnyi mélységtől) ilyen magasságig terjedhetnek ki. Ha ez így van, akkor nem minden aktív vidék a tachoklin zóna mélységéből emelkedik a felszínre.

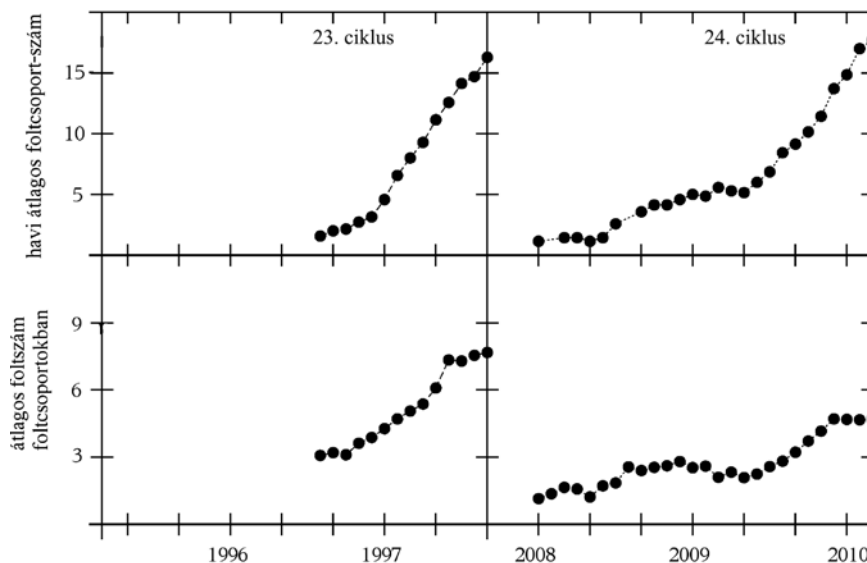
*A napciklus jövője.* Az 1b ábrán a naptevékenységre vonatkozó leghosszabb adatsor, a napfolt-relatívszám négyszáz éves diagramja látható. A 17. század második felében csak elhanyagolhatóan csekély aktivitást figyeltek meg, tehát a napciklus átmenetileg akár le is állhat; az ábrán látható fél évszázados minimumot Maunder-ről nevezték el. Mivel közvetett információk azt jelzik, hogy ilyen kiterjedt minimumok korábban is előfordultak, felvetődik a kérdés, hogy a mostani, a 24-es sorszámot viselő ciklus kétéves késése és a korábbiaknál lassabb fejlődése és gyengébb intenzitása lehet-e előjele egy kiterjedt minimumnak a nem túl távoli jövőben. Erre egyéb közvetett információk mellett Penn és Livingston (2011) három adatsora utal, mely szerint 1990 óta a foltokban mért mágneses tér, valamint a foltok kontrasztja fokozatosan csökken, a foltokban mért hőmérséklet pedig fokozatosan nő. A debreceni adatokból az 5. ábra diagramjai rajzolhatók fel, ezek a 22–24. ciklus kezdeti időszakát mutatják. Amikor a 24. ciklus elérte azt az aktivitási szintet, mint korábban a 22. és 23. ciklus, akkor a



**4. ábra** Bal oldali diagramok, felül: a napfelszín torziós hulláma 1886–1995 között (Ulrich, Boyden 2005), a függőleges tengely a heliografikus szélességet mutatja, a sötétszürke sáv a rotációs profilhoz képest előretartó, a halványoszürke sáv a hátramaradó sáv, határvonalaitat felrajzoltuk; alul: a napfoltok számának szélességbeli eloszlása a felső diagram határvonalaiival. Jobb oldali diagram: a torziós hullám lehetséges modelljének sematikus rajza

**Figure 4** Left diagrams, top: the torsional wave on the solar surface between 1886–1995 (Ulrich, Boyden 2005), y axis shows the heliographic latitude, the dark grey and light grey belts show the prograde and retrograde belts with respect to the rotation profile, their separating borders are indicated by lines; bottom: the latitudinal distribution of sunspot group number with the borderlines of the upper diagram. Right diagram: schema of a possible model of torsional wave





**5. ábra** | Foltszámok összehasonlítása a 23. és 24. ciklus elején. Felső diagramok: 16-os havi átlag foltcsoport-szám elérésének folyamata a két ciklusban. Alsó diagramok: foltcsoportokon belüli átlagos foltszámok ugyanezen időszakban

**Figure 5** | Comparison of sunspot numbers at the beginning of cycles 23 and 24. Upper diagrams: process of reaching the monthly mean sunspot group number of 16 in the two cycles. Lower diagrams: mean spot numbers within sunspot groups in the same time interval

foltcsoportok átlagban fele annyi foltot tartalmaztak, mint a 22. és 23. ciklus ugyanilyen fejlettségi foknál. Ez is azt sejteti, hogy a foltcsoportok eljelentéktelenedhetnek. A kérdés nincs lezárva, jelenleg intenzív vita tárgya, a gyengülés azonban tény, bár a Maunder-típusú minimum esélyére jelenleg nemigen lehet becslést tenni.

A fentiekből látható, hogy a debreceni obszervatórium elsősorban saját napfolt-adatbázisa, a bevezetőben említett DPD révén tud hozzájárulni a szoláris dinamó kérdéseéhez. A DPD elődjénél a greenwichi GPR-nél jóval részletesebb, a foltcsoportok pozíció- és területadatai mellett minden folt adatait is tartalmazza napi rendszerességgel. Az adott időszakban (1977–2012) ez az egyetlen ilyen részletes napfolt-adatsor. Az obszervatórium azonban elkészített egy ennél is részletesebb napfoltkatalógust az 1997–2011 időszakra, de ez már nem földfelszíni észlelésekre épül, hanem a SOHO/MDI űreszköz adataira. Ez a nagyszabású munka a Napfizi-

kai Obszervatórium által kezdeményezett és szervezett SOTERIA (Solar-TERrestrial Investigations and Archives) nevű FP7-es projekt keretében készült el. Az űreszköz észlelései lehetővé tették a másfél órás időfelbontást folyamatosan, továbbá a foltok mágneses adatainak megadását is. Ez megnyitotta a lehetőségét a foltcsoport-fejlődés részletes vizsgálatának. A SOTERIA folytatásaként megvalósult eHEROES (Environment for Human Exploration and Robotic Experimentation in Space) nevű FP7-es projekt keretében jelenleg egy olyan felerőrejelző módszeren dolgozunk, mely részletesen követné a foltcsoport-fejlődés olyan vonatkozásait, melyek a flert megelőző instabil állapotokhoz vezetnek. Ezek a vizsgálatok tehát már nem a naptevékenység hosszú távú változásait célozzák, hanem olyan rövid távú aktivitási folyamatokat, melyek egy viszonylag új kutatási terület, az űridőjárás jelenségköréhez tartoznak.

**A tanulmány szerzői**

Baranyi Tünde, Gyenge Norbert, Győri Lajos, Korsós Marianna, Ludmány András, Muraközy Judit

**Hivatkozások**

Gyenge N., Baranyi T., Ludmány A., 2012: Distribution of activity at the solar active longitudes. *Central European Astrophysical Bulletin* (elfogadva)  
 Győri L., Baranyi L., Ludmány A., 2011: Photospheric data programs at the Debrecen Observatory. *Proceedings IAU Symposium 2010*, No. 273, 403–407, <http://fenyi.solarobs.unideb.hu/DPD/>  
 Muraközy J., Ludmány A., 2011: Correlations of magnetic features and the torsional pattern. *Proceedings IAU Symposium 2010*, No. 273, 393–398

Muraközy J., Ludmány A., 2012: Phase-lags of solar hemispheric cycles. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 419, 3624–3630  
 Penn M., Livingston W., 2011: Long-term evolution of sunspot magnetic fields. *Proceedings IAU Symposium 2010*, No. 273, 126–133  
 Ulrich R. K., Boyden J. E., 2005: The solar surface toroidal magnetic field. *The Astrophysical Journal* 620, L123–L127  
 Waldmeier M., 1971: The asymmetry of solar activity in the years 1959–1969. *Solar Physics* 20, 332–344

# A heliosféra háromdimenziós szerkezete

ERDŐS G.<sup>1,@</sup>, BALOGH A.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Részecske- és Magfizikai Intézet  
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós u. 29–33.

<sup>2</sup>The Blackett Laboratory, Imperial College of Science, Technology and Medicine  
London SW7 2BZ

@E-mail: erdos.geza@wigner.mta.hu

A napszél egy buborékot fúj ki a csillagközi térbe, amelyet helioszférának nevezünk. Ennek a buborékknak a fizikai tulajdonságait elsősorban a napszelet alkotó részecskék sűrűsége, sebessége, valamint a plazmába befagyott mágneses tér határozza meg. E tanulmányban űrszondák méréseinek elemzésével vizsgáljuk a napszél és mágneses fluxus térbeli és időbeli változékonyságát. Bemutatjuk a gyors és lassú napszél eltérő tulajdonságait. Megvizsgáljuk a napszélbe befagyott mágneses fluxus változásait a napciklussal összefüggésben, beleértve a Nap mágneses terének pólusváltását. Kitérünk a geoeffektivitás szempontjából fontos koronatómeg-kilöködésekhez és együttforgó gyors napszélnyalábokhoz kapcsolódó struktúrák kialakására.

## Erdős, G., Balogh, A.: Three-dimensional structure of the heliosphere

The solar wind blows a bubble into the interstellar space which we call heliosphere. The physical properties of this bubble are primarily determined by the density and velocity of particles forming the solar wind, as well as the magnetic field frozen into the plasma. With the analysis of measurements by space probes we investigate the spatial and temporal variations of the solar wind and magnetic flux. We demonstrate the diverse properties of the fast and slow solar wind. Investigated also is the variations of the magnetic flux frozen into the solar wind in association with the solar cycle, including the polarity reversal of the solar magnetic field. We also touch the formation of structures related to coronal mass ejections and co-rotating fast solar wind streams, which is of importance from the point of view of geoeffectivity.

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

## Bevezetés

A heliosféra egy buborékknak tekinthető, amelyet a Napból származó szupersonikus plazmaáram, a napszél fúj ki a csillagközi térbe. A helioszférát kitöltő anyag elsődleges forrása a Nap. A Nap felszínének közelében található mágneses teret a napszél magával ragadja, amely ezáltal kiterjed a helioszférába. A heliosféra Földünk legtávolabbi környezetének tekinthető, amelyet még űrszondákkal el tudunk érni. Ennek a környezetnek a megismerése gyakorlati szempontból is fontos, mert a Földet kívülről érő, a technikai berendezések működésére is hatással lévő űridőjárási jelenségek jobb megértését szolgálja. A heliosféra kutatása másik két szempontból is érdekes:

- a mágnesezett plazma tulajdonságainak méréséből visszakövetkeztethetünk a forrásnál uralkodó viszonyokra, következtetni tudunk az egyébként helyszíni mérések számára hozzáférhetetlen alsó napkoronában lejátszódó folyamatokra (napfizikai aspektusok),
- a heliosféra fizikai állapotának ismerete szükséges a galaktikus kozmikus sugárzás naprendszerbeli modulációjának megértéséhez.

A heliosféra tulajdonságainak komplexitását az adja, hogy a térbeli változások mellett rövid és hosszú időskálán egyaránt változó viszonyokkal van dolgunk. Rövid időskálájú jelenségeknél elsősorban a napkitörések hatására kell gondolnunk. Hosszú idejű változások közül kiemelkedő jelentőségű a napfoltciklus 11 éves hullámzásának hatása.

A bolygók pályasíkja közel merőleges a Nap forgástengelyére. A Nap körül keringő űrszondák pályasíkja is közel esik a Föld pályasíkjához, az ekliptikához, mert a pályára állításkor ki kell használni a Föld Nap körüli keringésének sebességét (30 km/s, míg a rakéták „végsebessége” csak 11 km/s). Egy másik ok, amiért az űrszondák nem léptek ki az ekliptikából az, hogy az érdekes égitestek, a bolygók és holdjaik szintén abban a síkban tartózkodnak. Ezért a heliosféra kutatása csak annak egy kétdimenziós szeletére, az ekliptikára korlátozódott.

A Nap felszínéről és az alsó koronáról távérzékeléssel szerzett információk segítségével megállapították, hogy a fizikai viszonyok jelentősen változhatnak a Nap egyenlítőjétől a sarkok felé távolodva. Régóta ismert a napfoltok gyakoriságának heliografikus szélesség szerinti változása, amely ráadásul a napfoltciklus szerint is változó törvényszerűségeket mutat.

rúséget mutat (Maunder 1904) (pillangódiagram). A napkorona hőmérsékletére utaló röntgen-felvételeken koronalyukak (hidegebb területek) figyelhetők meg a sarkoknál (Cranmer 2009), amelyek kiterjedése napfoltminimum idején megnő. A forrásnál mutatkozó heliografikus hosszúsággal és a napfoltciklus fázisával összefüggő jelenségek vizsgálata megkövetelte egy olyan űrmisszió létrehozását, amely segítségével a helioszféra sarki területeire is el tudunk jutni. Ezt a tervet az is motiválta, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás modulációja várhatóan a sarkoknál minimális, mert egyenlő távolságban a Naptól, az átlagos mágneses erővonalak a sarkoknál mintegy 50-szer rövidebbek. Ez a jelentős különbség a Nap forgásából adódik, az erővonalak a sarkoknál radiálisak, míg az egyenlítőnél spirális alakúra csavarodnak fel. A moduláció eltorzítja a galaktikus kozmikus sugárzás eredeti tulajdonságait. A kutatók régóta szerettek volna már egy olyan missziót létrehozni, melynek révén a sugárzásnak az eredetihez közeli (naprendszeren kívüli) állapota figyelhető meg.

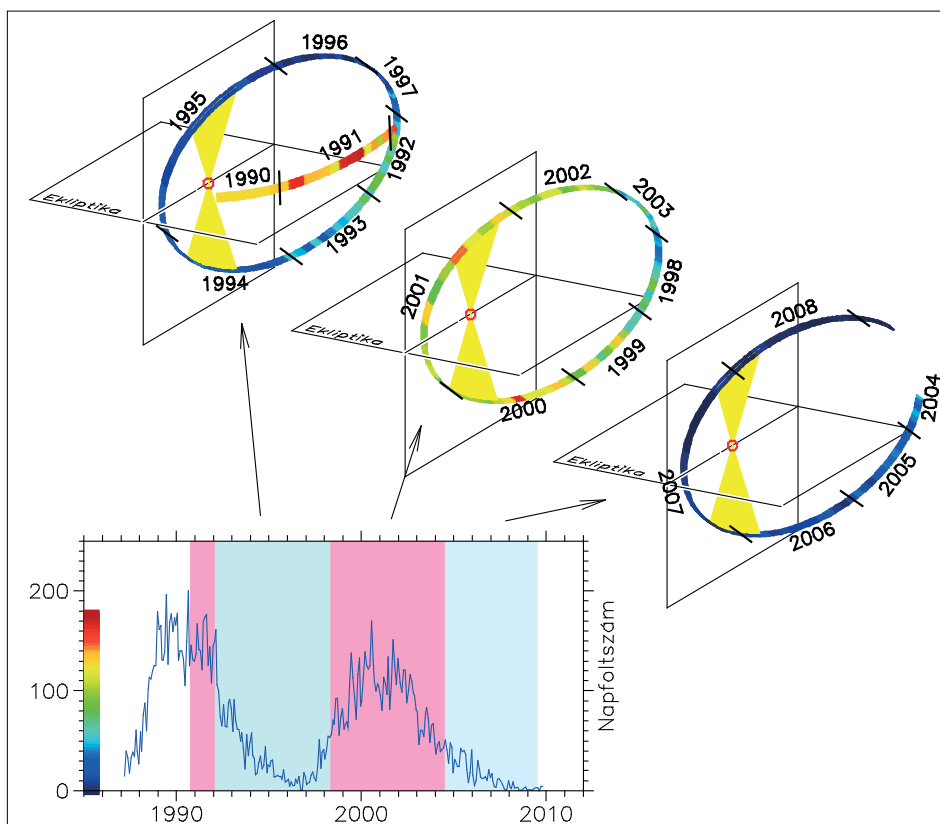
Cikkünkben az Ulysses űrszondával készült mérések néhány eredményéről számolunk be. Ez a szonda az első és eddig egyetlen űreszköz, amely nagy heliografikus szélességekre jutott el. A cikkben arra a kérdésekre is válasz kívánunk adni, hogy

- Érdemes volt-e kilépni az ekliptikából, vannak-e heliografikus szélességtől függő tulajdonságok?
- Van-e a napciklussal összefüggő időbeli változás a helioszférában?

### Az Ulysses szonda pályája és a napciklus

Az Ulysses 1990 októberében lőtték fel a Jupiter irányába. Az óriásbolygó mellett 1992 februárjában haladt el, amelynek gravitációs tere a szonda pályasíkját 80 fokkal elfordította, ezzel a szonda Nap körüli poláris pályára állt. A pálya periódusideje 6,2 év, a Naptól mért legkisebb, ill. legnagyobb távolság 1,34, ill. 5,4 CsE. A szonda követését 2009 júniusában fejezték be, ezalatt majdnem három teljes Nap körüli forduló során végzett méréseket. A hosszú élettartam abból a szempontból is érdekes, hogy a megfigyelések majdnem két napciklust fednek le.

Az 1. ábra az Ulysses szonda pályáját mutatja háromdimenziós ábrázolásban. Az ekliptika a vízszintes síkban van, a Napot piros köröcske jelzi. A bal felső ábra mutatja a szonda pályáját az ekliptikában a Földtől a Jupiterig 1990-ben és 1991-ben, majd az első ekliptikára közel merőleges keringést a Nap körül (1992-től 1998-ig). A szonda pólusátmeneteit a 70 fokosnál nagyobb szélességű (egyaránt déli és északi) pályaszakaszokkal definiálták, ezek a szakaszok sárga színű területekkel vannak kiemelve. A szonda pályájának másik figyelemre méltó szakasza a déli és északi legnagyobb heliografikus szélesség (80° S és 80° N) közötti pályaszakasz, amelyen a szonda gyorsan, egy év alatt haladt keresztül (mivel a szonda ekkor napközélben volt). Ezt a pályaszakaszt gyors szélességi pásztázásnak nevezték el. Jobbra haladva a másik két ábrán a második és harmadik



**1. ábra** | Az Ulysses szonda három Nap körüli keringése a napfoltciklussal összefüggésben. A pálya színkódja a Nap aktivitását jellemzi  
**Figure 1** | Three orbits of Ulysses around the Sun, in association with the sunspot cycle. Color code of the orbit marks solar activity

Nap körüli keringés látható hasonló formában. A bal alsó panel a napfoltszámot mutatja, amely alapján az Ulysses pályáját színekkel láttuk el, a meleg szín napfoltmaximumot, a hideg minimumot jelöl. Ezek szerint a szonda Jupiterig tartó pályája, valamint a második keringés napfoltmaximumra esett. Figyelemre méltó, hogy a második keringéshez tartozó gyors szélességi pásztázás a napfoltciklus legaktívabb idejére esett, és mint ahogy később megmutatjuk, a Nap mágneses terének pólusváltása erre az időre esett. Az első és harmadik keringés napfoltminimum idején történt.

## Gyors és lassú napszél

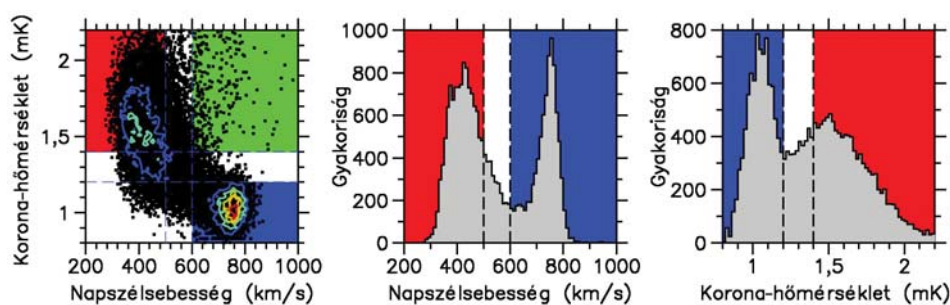
Parker (1958) elméletileg megjósolta, és az első interplanetáris térbe kijutó szondák – Mariner–2 (Neugebauer, Snyder 1962) és Luna–1, Gringauz nem publikált eredménye – kísérletileg megerősítették, hogy a Naphoz közel radiális irányban egy szuperszonikus sebességű plazmaáramlás indul ki. Az áramlás sebessége időben változó, értéke nagyjából a 300–1000 km/s sebességtartományt fedi le. Később a Nap felszínéről röntgen-tartományban végzett felvételeken sötét foltokat fedeztek fel (koronalyukak), amelyek főleg napfoltminimum idején a sarkokon jelennek meg. Megállapították, hogy a nagy sebességű napszélnyalábok általában a koronalyukakból erednek. A koronalyukakból származó gyors napszélnyalábok hosszú ideig fennálló struktúrák, amelyek a földpályánál több napforgáson keresztül is 27 naponta visszatérhetnek. Az egyenlítői tartományban főleg koronaanyag-kilökődések (angol mozaikszóval CME-nek nevezzük) alkalmával is megjelenhetnek nagy sebességre felgyorsult plazmaáramlások. Az interplanetáris térben végzett megfigyelések statisztikai vizsgálatát megnehezíti a CME-ből származó és az egyenlítőnél viszonylag ritkább koronalyukakból származó gyors napszélnyalábok keveredése. A gyors és lassú napszél kölcsönhatásba lép egymással, a plazma sebessége a terjedés során módosul, nehéz következtetni a Naphoz közeli viszonyokra. Az Ulysses szonda azonban hosszú időt töltött a sarki koronalyukak felett, amely vizsgálatokból kiderült, hogy a kétfajta napszél, a lassú és a gyors élesen elkülönül. Ez utóbbi a koronalyukakból származik (von Steiger, Fröhlich 2005).

A 2. ábra középső paneljén a napszélsebesség 6 órás átlagának eloszlásfüggvénye látható az Ulysses misszió teljes időtartamára (Erdős, Balogh 2012). A grafikonon jól látszik a kétféle sebességű napszél-populáció éles elkülönülése. Az Ulysses szondán helyet foglalt a SWICS nevű plazmadetektor, amely alkalmas volt a napszélben kisebbségben levő ionok töltésállapotának a meghatározására. A hatszorosan és hétszeresen ionizált oxigén fluxusának arányából meghatározható a korona hőmérséklete a Naptól mért néhány napsugár ( $R_s$ ) távolságban, ahol az oxigénionok ütközése már elhanyagolhatóvá válik. Érdekes ez a kísérleti technika, mert az oxigénionok mint fossziliák szállítják hozzánk a koronahőmérséklet-adatokat több CsE távolságra. A 2. ábra jobb oldali paneljén a korona hőmérsékletének eloszlásfüggvénye látható. Megállapíthatjuk, hogy a korona-hőmérséklet eloszlásában is két populáció van jelen, a hidegebb populáció legvalószínűbb hőmérséklete 1 millió fok, a melegebbé 1,5 millió fok. A hidegebb a gyors napszélnyalábhoz tartozik, a melegebb a lassúhoz. Ez az ábra bal oldalán található szórásdiagramból állapítható meg, amelyen feltüntetjük a hőmérséklet- és sebességtérre vonatkozó kétdimenziós eloszlásfüggvény kontúrvonalait is. Megfigyelhető, hogy csekély számban vannak gyors napszélnyalábok is, amelyek hőmérséklete magas, ezek a szórásdiagrammon elszórtan vannak jelen (az ábrán zöld színnel megjelölt tartományban). Habár ezeknek az eseményeknek egyedi elemzését nem végeztük el, valószínűsíthető hogy koronaanyag-kilökődésekről van szó.

Az Ulysses szonda megfigyelései rámutattak arra, hogy a sarki koronalyukakból származó gyors napszél és az inkább egyenlítői tartományra jellemző lassú napszél fizikai tulajdonságai élesen különböznek, így a keletkezési mechanizmusuk megértéséhez is elkülönülő modelleket kell alkotni. Ennek a feladatnak a megoldása a napfizikusok számára jelenleg is kihívást jelent.

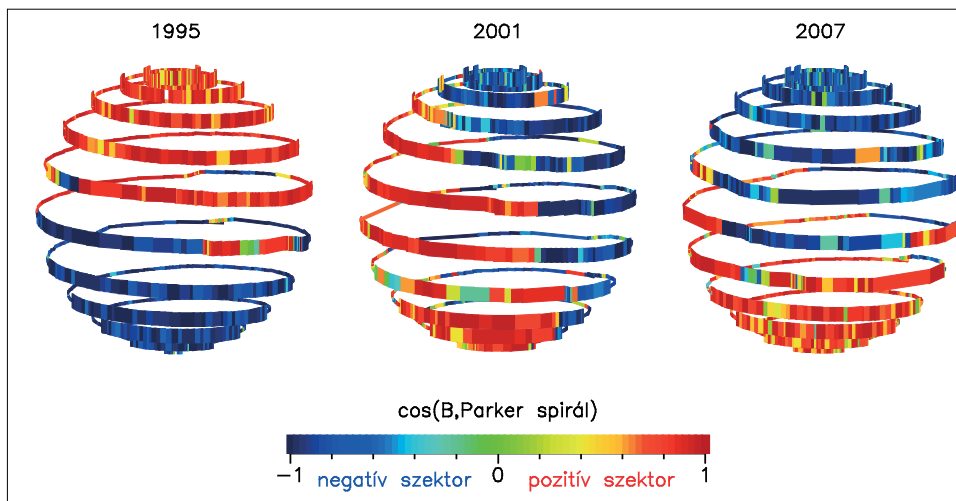
## Mágneses pólusváltás

Néhány napsugár ( $R_s$ ) távolságban a korona már olyan híg, hogy a plazmarészecskék ütközésének elmaradása miatt a közeg jó vezetővé válik. Ezzel a mágneses tér befagyásának



**2. ábra** A napszél sebessége és a korona hőmérséklete az Ulysses misszió teljes időtartamára (1990–2008) a SWICS műszer méréseinek 6 órás átlagaiból számolva

**Figure 2** Velocity of solar wind and coronal temperature during the whole duration (1990–2008) of Ulysses mission, calculated from the 6 hour averages of the measurements by SWICS instrument



**3. ábra** A Nap forrásterének mágneses polaritása az Ulysses három gyors szélességi pásztázása alkalmával 1995-ben, 2001-ben és 2007-ben. A csavart vonalak az Ulysses pályáját mutatják a Nappal együtt forgó koordináta-rendszerben. A színek a megfigyelt mágneses térerősségvektor és a Parker-spirális közötti szög koszinusza

**Figure 3** Magnetic polarity of the source surface field of the Sun observed by Ulysses during the three fast latitude scans in 1995, 2001, and 2007. Spiral lines show the trajectory of Ulysses in the frame co-rotating with the Sun. Color code is the cosine of the angle between of the observed magnetic field vector and the Parker spiral

feltétele teljesül, ezért a kifelé áramló napszél magával ragadja a mágneses erővonalakat. A Nap középpontjában elhelyezett néhány  $R_s$  sugarú gömb mágneses terét a napszél forrásterének hívják, amelynek ismeretében a mágneses tér kiterjedése a gömbön kívüli tartományokba a mágneses fluxus befagyása miatt már könnyen meghatározható. Radiális és egyenletes napszélsebességet feltételezve a mágneses erővonalak az ekliptikában arkhimédészi spirál alakot alkotnak (Parker 1958). Nagyobb heliografikus szélességeken is hasonló a helyzet, csak az erővonalak sík helyett egy kúpra csavarodnak fel.

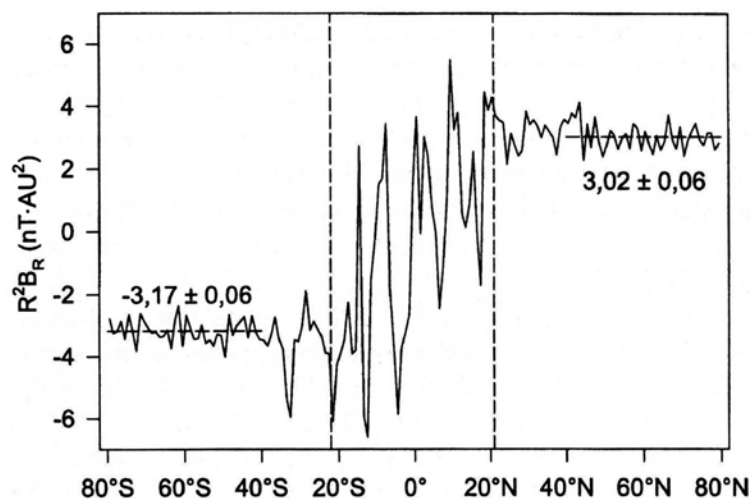
A helioszférában végzett mágneses tér mérésekből viselkedésüket a forrásfelület mágneses terére abban a pontban, amelynek heliografikus szélessége és hosszúsága megegyezik az Ulysses heliografikus szélességével és hosszúságával, figyelembe véve azt a néhány napos időeltolódást, amely idő alatt a napszél a forrástól a szondáig áramlott. A helioszférában mért mágneses tér legjellegzetesebb tulajdonsága az előjele, vagyis az, hogy az erővonal kifelé vagy befelé mutat-e a Naptól. A kétféle polaritást elválasztó felület, amelyet áramlepelnek hívnak, hullámos alakú. Napfoltminimum idején az áramlepel a Nap egyenlítői síkjához közel helyezkedik el, de kis mértékben akörül hullámzik. A napfoltok számának növekedésével a hullámzás amplitúdója megnő, és az áramlepel inklinációja is megnő az egyenlítői síkhoz képest. Napfoltmaximumban történik a Nap mágneses terének pólusváltása. Az Ulysses misszió előtt kétféle elképzelés létezett: a pólusváltás az áramlepel átfordulásával következik be, vagy a forrásfelületen a sarkok közelében a domináns polaritással ellentétes szigetek képződnek, amelyek területe felnő, és kiszorítják az eredeti polaritást.

Az Ulysses-megfigyelések egyik fontos eredménye, hogy az első modell igazodott be. A második gyors szélességi pásztázás alkalmával megfigyelt pólusváltás az áramlepel

nagy inklinációja alkalmával történt, ugyanakkor nem tapasztaltunk a domináns polaritással ellentétes szigeteket. A 3. ábra a forráster mágneses polaritását mutatja 1995-ben, 2001-ben és 2007-ben (Erdős, Balogh 2005, 2010). Az 1995-ös és 2007-es megfigyelés a 22. és 23. napfoltciklus minimumában történt. Látható, hogy a várakozásoknak megfelelően az áramlepel hullámossága kicsi. Azt is megállapíthatjuk, hogy a 22. ciklusban az északi polaritás pozitív, a déli negatív volt. A következő ciklus minimumában, 2007-ben a polaritás felcserélődött. 2001-ben, napfoltmaximumban az áramlepel inklinációja közel merőleges volt az egyenlítői síkra. A 3. ábra megerősíti, hogy a Nap mágneses polaritásváltása az áramlepel átfordulásával történt.

### Mágneses fluxus

A forráster polaritása mellett foglalkozunk a mágneses tér erősségével is! A helioszférában végzett mérések esetén a mágneses tér radiális komponense jellemzi a mágneses fluxus nagyságát. A radiális komponens a Naptól mért távolság négyzetével csökken, vagyis a mágneses fluxus sűrűsége könnyen meghatározható akár a forrásfelületen, akár a földpályának megfelelő 1 CsE távolságban, ahol a legtöbb megfigyelést végzik. Az azimutális komponens már kevésbé alkalmas a fluxus meghatározására, mert a távolság mellett a napszélsebesség változásaitól is függ. Dipóltér esetén a mágneses fluxus sűrűségének a pólusok felé haladva növekednie kell. Az Ulysses szonda megfigyeléseinek egyik legnagyobb meglepetése az volt, hogy a fluxus sűrűsége nem nőtt meg a pólusok felé haladva, ez már az első pólusátmenetnél kiderült. A 4. ábra az első gyors szélességi pásztázás során mért mágneses fluxus sűrűségét mutatja a heliografikus szélesség függvényében (Forsyth et al. 1996). Megállapít-



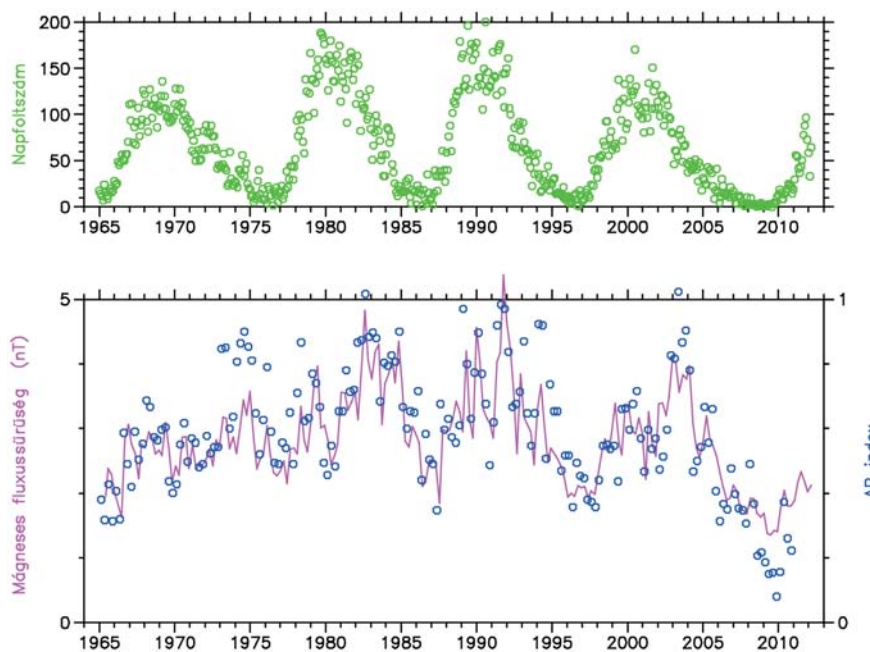
**4. ábra** Mágneses fluxus sűrűségének függése a heliografikus szélességtől. Ulysses-mérések az 1994–1995 időszakban

**Figure 4** Magnetic flux density as a function of heliographic latitude. Ulysses observations in the epoch 1994–1995

hatjuk, hogy a fluxus sűrűsége a déli és északi féltekén egyaránt független a heliografikus szélességtől. Az egyenlítői síktól  $\pm 20^\circ$ -os sávban a fluxus előjele váltakozó, ez a hullámos áramleplelen történő áthaladások következménye. A mágneses fluxus heliografikus szélességtől való függetlensége a gyors napszélben látszik egyértelműen, a lassú napszélben a helyzet bonyolultabb. Megmutattuk, hogy a mágneses fluxus változásának komplexitása a Parker-spirál erővonalakhoz képest megjelenő fluktuációk következménye, amelynek hatása a lassú napszélben nagyobb és a Naptól növekvő távolsággal nő. A fluktuációk hatására korrekciót lehet végezni, az így korrigált mágneses fluxus a lassú napszélben is mutatja a heliografikus hosszúságtól való függet-

lenséget (Erdős, Balogh 2012). Más analízis is arra az eredményre vezetett (Owens et al. 2008), hogy a mágneses fluxus független a heliografikus hosszúságtól és szélességtől, a fluxus egyenletesen terül szét a helioszférában.

A mágneses fluxus egyenletes szétterülése a napszél szuperradiális expanziójával magyarázható a Naphoz közeli ( $< 10 R_s$ ) tartományban (Smith 2008). A Naphoz közel a mágneses tér nyomása meghaladja a plazma nyomását. Ezért a pólusoknál található feltételezett erősebb mágneses tér nyomása szétteríti a plazmát, amíg a nyomásegyensúly ki nem alakul. Ne tévesszen meg bennünket az a jól ismert tény, hogy a távolabbi helioszférában a plazma nyomása a domináns, aminek következménye a radiális expanzió! A



**5. ábra** Az OMNI interplanetáris mágnesestér-adatokból számolt mágneses fluxussűrűség (alsó panel, lila vonal) kapcsolata a napfoltyszámmal (felső panel) és az AP indexszel (alsó panel, körök) négy napcikluson keresztül

**Figure 5** Magnetic flux density calculated from the OMNI interplanetary magnetic field data (bottom panel, magenta line), in association with the sunspot numbers (top panel) and the AP index (bottom panel, circles) through four solar cycles

mágneses tér nyomása azonban gyorsabban csökken a távolsággal, mint a plazma nyomása, ezért a nyomásviszonyok különböznek a Naphoz közeli és távolabbi régiókban.

A mágneses nyomás egyenletes szétterülésének hasznos következménye, hogy a helioszféra bármely pontjában mérjük meg a mágneses fluxus sűrűségét, az érték jól reprezentálja a Nap mágneses fluxusát, amely a napciklus szerint változékonyságot mutat. Az 5. ábra a mágneses fluxus sűrűségét mutatja az idő függvényében négy napcikluson keresztül. A mágneses fluxussűrűség meghatározására az OMNI adatbázist használtuk, amely a Föld közelében tartózkodó szondák adataiból összeállított, az interplanetáris tér fizikai paramétereit tartalmazó hosszú idejű adatbázis. Ha összehasonlítást végzünk a felső panelen látható napfoltszámmal, megállapíthatjuk, hogy a mágneses fluxus maximuma nem esik egybe a napfoltszám maximumával, hanem az inkább a napciklus leszálló ágában figyelhető meg. Érdekesség, hogy a mágneses fluxus látható módon jobban korrelál az AP indexszel (lásd az alsó panelen a köröket). Az AP index a geomágneses viharok gyakoriságát és nagyságát jellemző szám. A jó egyezés magyarázatára két érv is felmerülhet. A mágneses fluxus szállításában a CME-k fontos szerepet játszanak, a CME-k ugyanakkor geoeffektívek, mágneses viharokat keltenek. A másik érv az, hogy a földi magnetoszférában tárolt energia forrása az interplanetáris mágneses tér. Nagyobb mágneses fluxus esetén több mágneses energia halmozódik fel a magnetoszférában, amely erőteljesebb viharokat generálhat. Ez a kérdéskör további kutatásokra vár.

## Összefoglalás

Az Ulysses szonda kilépett az ekliptikából, ezzel lehetővé vált a helioszféra háromdimenziós szerkezetének feltárása. A szonda megfigyelései számos korábbi elképzelést megerősítettek. Ugyanakkor több esetben lehetőség adódott vitatott modellek közötti szelektálásra, a korábbi eredmények pontosítására, sőt több váratlan felfedezés is született. Ebben a cikkben néhány fontos, érdekes megfigyelésről számoltunk be, amelyek összefoglalása a következő:

- Kétféle napszélplazma létezik, amely sebességben és hőmérsékletben élesen elkülönül.
- A Nap mágneses terének legutóbbi pólusváltása az áramlepel átfordulásával történt.
- A mágneses fluxus sűrűsége független a heliografikus hosszúságtól és szélességtől.
- A mágneses fluxus sűrűsége a napciklus szerint változik és feltűnő korrelációt mutat a földi geomágneses viharokra jellemző AP indexszel.

Az Ulysses szonda eredményei hozzájárultak a Nap felszínéről és az alsó koronáról távérzékeléssel végzett megfigyelések pontosításához akár időben visszafelé is, a korábbi mérések újraértelmezésével. A rendkívül sikeres Ulysses misszió megismétlésére nincsen terv. Azonban a Solar Orbiter űrszonda várhatóan jól ki fogja egészíteni az Ulysses szonda méréseit. A 2017-ben induló szonda ugyan csak 30 fokos heliografikus szélességre fog eljutni, de a Naphoz közeli (0,3 CsE) távolságban végzett mérések új távlatokat fognak megnyitni a napfizika és a helioszféra fizikájában.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönetet mondanak R. von Steigernek a munkához szükséges Ulysses szonda SWICS műszerének mérési adatainak rendelkezésre bocsátásáért.

## A tanulmány szerzői

Erdős Géza, Balogh André

## Hivatkozások

- Cranmer, S. J., 2009: Coronal Holes. Living Rev. Solar Phys. 6, 3, <http://www.livingreviews.org/lrsp-2009-3>
- Erdős G., Balogh A., 2005: In situ observations of magnetic field fluctuations. Adv. Space Res. 35, 625–635
- Erdős G., Balogh A., 2010: North-South asymmetry of the location of the heliospheric current sheet revisited. J. Geophys. Res. 115, A01105, doi: 10.1029/2009JA014620
- Erdős G., Balogh A., 2012: Astrophys. J. 753/2, 130, doi: 10.1088/0004-637X/753/2/130
- Forsyth R. J., Balogh A., Horbury T. S., Erdoes G., Smith E. J., Burton M. E., 1996: The heliospheric magnetic field at solar minimum: Ulysses observations from pole to pole. Astronomy and Astrophysics 316, 287–295
- Maunder E. W., 1904: Note on the Distribution of Sun-Spots in Heliographic Latitude, 1874–1902. MNRAS, 64, 747–761
- Neugebauer M., Snyder C. W., 1962: Solar Plasma Experiment. Science 138, 1095–1097
- Owens M. J., Arge C. N., Crooker N. U., Schwadron N. A., Horbury T. S., 2008: Estimating total heliospheric magnetic flux from single-point in situ measurements. J. Geophys. Res. 113, A12103, doi: 10.1029/2008JA013677
- Parker E. N., 1958: Dynamics of the Interplanetary Gas and Magnetic Fields. Astrophysical Journal 128, 664–676
- Smith E. J., 2008: The global heliospheric magnetic field. In: The Heliosphere through the Solar Activity Cycle (Balogh, A., Lanza, L. J., Suess, S. T., szerk.), Springer, Chichester, UK
- von Steiger R., Fröhlich C., 2005: In the Solar System and Beyond: Ten Years of ISSI (Geiss, J. and Hultqvist, B., szerk.), ISSI Scientific Report Series, ESA, Noordwijk, The Netherlands, Vol. SR-003, 99–112

# Űridőjárási folyamatok a magnetoszférában

LICHTENBERGER J.<sup>@</sup>, FERENCZ CS.

ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Űrkutató Csoport, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A  
<sup>@</sup>E-mail: lityi@sas.elte.hu

A belső magnetoszférában zajlanak azok, az űridőjárásnak nevezett folyamatok, melyeknek fő szereplői a naptevékenységből származó nagyenergiájú részecskék. Az itteni „hármastársbérletben” lezajló hullám–részecske kölcsönhatások révén keletkeznek és csapódnak ki a műholdakat is veszélyeztető relativisztikus energiájú töltött részecskék. A kutatások élvonalába tartozó űridőjárási modellekhez és a Space Situational Awareness (SSA) programokhoz kapcsolódnak a magyar felszíni és műholdas mérések.

## Lichtenberger, J., Ferencz, Cs.: Space weather processes in the magnetosphere

The inner magnetosphere is the area where the physical processes driven by the energetic particles originated from the Sun interact with the waves propagated there in the wave–particle interaction. This phenomenon is called *space weather* and it plays an important role in the security of space assets. This is why these investigations are in front of research and supported by both EU FP7 and ESA SSA programs. Space Research Group of Eötvös University is involved in these investigations by ground based and satellite measurements.

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

## 1. Bevezetés

A Föld légkörének alsó tartományában, a troposzférában lezajló, elsősorban fizikai folyamatokat (földi) időjárásnak nevezzük. Az itt lezajló folyamatok fő mozgatója a kívülről, elsősorban a Naptól érkező energia, illetve annak változása. Ez az energia a Föld felső légkörén keresztül éri el az alsó légkört és a felszínt, így a földi időjárás elnevezésének analógiájára a felső légkörben lezajló folyamatokat *űridőjárásnak* (*space weather*) nevezzük. A felső légkör határa egybeesik a földi mágneses burok, a magnetoszféra határával, így az űridőjárás a troposzféra feletti tartományokat, elsősorban az ionoszférát és a magnetoszférát érinti. Ugyanakkor az űridőjárási hatások nem korlátozódnak e tartományokra, hanem megjelennek a felszínen és a semleges felső légkörben is, és így közvetlenül vagy közvetve befolyásolják a bioszférában lezajló eseményeket és a társadalmi-gazdasági életet is.

Ezért az utóbbi 10–15 évben az űrfizika-űr kutatás egyik fő területévé az űridőjárási kutatások váltak, ugyanis napjainkra civilizációnk „űrtevékenység-függővé” vált. Szinte láthatatlanul mindennapi életünk részévé váltak a műholdak

szolgáltatásai, melyekből jelenleg mintegy 3500 (!) kering a Föld körül: telekommunikáció – tv, internet, (mobil-)telefon; navigáció (GPS, GLONASS, GALILEO); távérzékelés (mezőgazdaság, környezetvédelem, természeti katasztrófák monitorozása). Annyira igaz ez, hogy nem is a szolgáltatás létét, hanem esetleges hiányát, zavarát vesszük már csak észre. Az űridőjárás fő hajtómotorja a Nap és kisebb részben a galaktikus kozmikus sugárzás. Az űridőjárás változásainak hatása a Föld felső légkörében főleg az ember alkotta eszközöket (műholdakat) érinti, a sugárzási övekben keletkező és onnan kicsapódó nagy (sokszor relativisztikus) energiájú töltött részecskék – ionok, elektronok – képesek a műholdakat időlegesen vagy véglegesen megbénítani és ezzel – a műhold cseréjének költségén túlmenően, ami dollár tíz- vagy százmilliókban mérhető (!) – társadalmi, gazdasági károkat okozni, esetenként emberéleteket veszélyeztetni (pl. mágneses viharok alatt mind a mágneses, mind a GPS alapú navigáció megbénulhat, ami mind a polgári, mind a katonai légi közlekedésben komoly veszélyforrást jelent).

Az űridőjárási folyamatok azonban nemcsak az űrtevékenységre (műholdak) vannak hatással, hanem a bioszférára, az élőlényekre is: a napszelekciók, mágneses viharok ha-



tással vannak az élő szervezetekre, pl. balesetek, fertőző betegségek gyakorisága. A felső légkörből a semleges légkörbe az űridőjárási folyamatokból becsatoló energiát a földi időjárásra is. A mágneses tér változásai által keltett ionoszférikus áramok pedig zavarokat okozhatnak a villamosenergia-átviteli rendszerekben és elektrokémiai korrózió útján pedig a különböző csővezetékben is.

Ahhoz, hogy képesek legyünk ezeket az űridőjárási hatásokat *modellezni* vagy *előre jelezni*, le kell írni a felső légkörben végbemenő folyamatokat.

## 2. A magnetoszféra és tartománya: ahol az űridőjárási folyamatok zajlanak

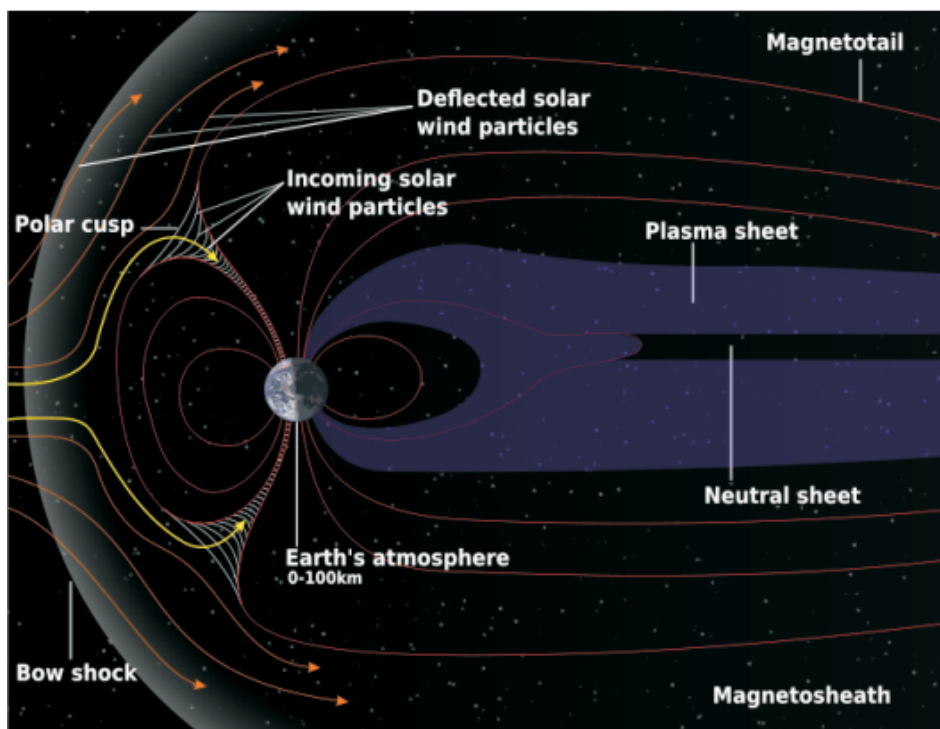
A magnetoszféra egy üreg, amelynek az alakját a napszél és a földi mágneses tér kölcsönhatása alakítja ki: a nappali oldalon egy összenyomott, körülbelül 8–10 földugár széles mágneses teret látunk, míg az éjszakai része több száz földugár távolságra is elnyúlhat. A Föld mágneses terének közel dipól jellegű alakját a napszél módosítja, a Nap felé néző oldalon a magnetoszféra belső mágneses terének nyomása tart egyensúlyt a napszéllel jövő impulzusáram dinamikus nyomásával. Ez a határvonal a magnetopauza (1. ábra). A magnetoszféra azonban nemcsak a mágneses térből áll, hanem elektromosan töltött részecskék, *plazma* népesíti be. Ebből a plazmából több fajta is jelen van ebben a tartományban. A mágneses tér jelenléte olyan részecskemozgásokat és hullámjelenségeket ír elő a plazmában, amelyek semleges anyag esetében nem léteznek. Az űridőjárás ezért

e három „szereplő”, a mágneses tér, a töltött részecskék és az elektromágneses hullámok változásainak, kölcsönhatásainak összessége.

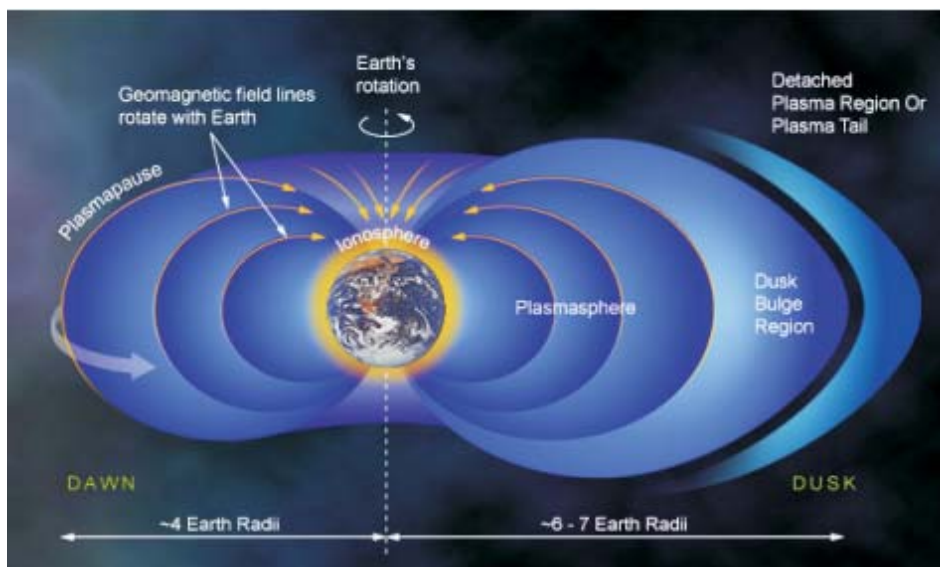
### 2.1. Társbérletek a magnetoszférában: I. a plazmaszféra és a whistlerek

A plazmaszféra a magnetoszféra belső, tórusz alakú tartománya, amelyet hideg, kis energiájú – 1 eV – de relatíve nagy sűrűségű,  $100\text{--}10000/\text{cm}^3$  – plazma tölt ki. Ez a plazma főleg egyszerűen ionizált gázokat (úm. H, He, N, O) tartalmaz. Alsó határa az ionoszféra teteje (~1000 km), felső határa nyugodt mágneses időszakokban 4–5 földugár távolságban helyezkedik el (2. ábra). A plazmaszféra részecskéinek fő forrása az ionoszféra, amellyel a plazmaszféra dinamikus egyensúlyban van. A csatolási fluxusok az ionoszférikus hideg plazmát főleg a mágneses erővonalak mentén továbbítják a plazmaszférába (töltődés), illetve a plazmaszférából az ionoszférába (kisülés). Ezek a fluxuscsovek együtt forognak a Földdel. A plazmaszféra határát az határozza meg, hogy a napszél által keltett konvektív elektromos tér hol válik nagyobbá, mint a forgási elektromos tér. Ez a tartomány a *plazmapauza*, melynek helye és alakja dinamikus változik. A plazmaszférában lévő anyag együtt forog a Földdel. E határfelület pillanatnyi helyzete különös fontossággal bír az űridőjárási folyamatokban.

Mind a plazmaszférát, mind a plazmapauzát közönséges földi villámok által gerjesztett rádiójelek, *whistlerek* segítségével fedték fel (Storey 1953, Carpenter 1963). E rövid,



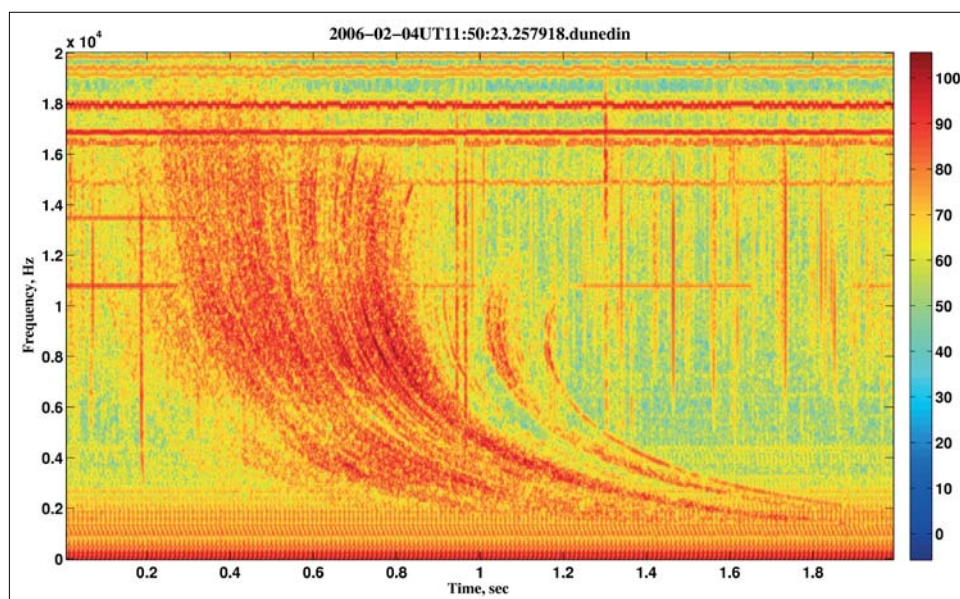
1. ábra | A magnetoszféra szerkezete  
Figure 1 | The magnetosphere



**2. ábra** | A plazmaszféra szerkezete  
**Figure 2** | The plasmasphere

impulzusszerű rádiójelek kijuthatnak a magnetoszférába, és ott az erővonalak mellett terjedve eljutnak a másik féltekére, ahol alakjuk már megváltozik, az impulzusból időben elnyújtott „C” alakú görbe lesz, ha spektrogrammon ábrázoljuk (3. ábra). A felszínen a villám által keltett széles sávú zajnak már csak az egészen alacsony frekvenciás (1–20 kHz) tartománya észlelhető, mivel e tartomány rezgésszáma megegyezik a hallható hangok frekvenciatartományával, a jelet egy hangszóróra kapcsolva mélyülő füttyként halljuk – ezért kapta az angol whistler (fütty) szóból a nevét a jelenség.

Egy villám jele akár több erővonal mellett is képes terjedni, az így keletkezett jelcsomagot többutas terjedésű whistlercsoportnak nevezzük. A whistlerjelnek két jellegzetes paramétere figyelhető meg a spektrogrammon: van egy frekvencia, amelyik a leggyorsabban terjed, ez a „C” orra, azaz az orrfrekvencia, illetve a „C” görbültsége, a diszperzió. Az orrfrekvenciából meghatározható, hogy melyik erővonal mellett terjedt a jel, a diszperzióból pedig kiszámítható, hogy milyen volt a plazma (az elektronok) eloszlása az erővonal mellett. (Ebből az is következik, hogy minden whistler „orrwhistler”, azonban kisebb mágneses szélességű



**3. ábra** | Egy nagyon szép, többutas terjedésű whistlercsoport, amelyet 2006. február 4-én észlelt az AWDANet dunedini (Új-Zéland) állomása  
**Figure 3** | A spectacular multiple-path whistler group recorded at Dunedin, New Zealand

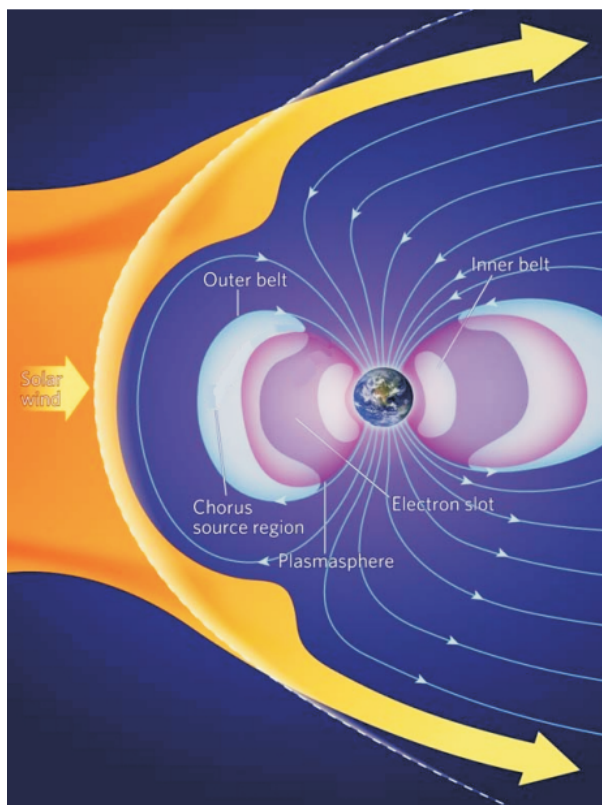
geken – ilyen Magyarország területe is – az orrfrekvencia az észlelési tartományon kívül esik, így csak az alsó, kifli alakú részt láthatjuk. Ilyenek a 3. ábrán a csoport első nyomai is.) Tehát a felszínen észlelt whistlerek elemzésével információt nyerhetünk azon tartomány – a plazmaszféra – állapotáról, amelyben ezek a jelek terjedtek, azaz egy egyszerű és olcsó plazmaszféra-diagnosztikai eszköz van a kezünkben. A whistlerek ugyanis igen gyakoriak, egy adott földrajzi helyen évi több tíz- vagy százezer whistler is észlelhető, de van olyan hely is (antarktiszi félsziget), ahol ez a szám elérheti a 5–10 milliót is (Lichtenberger et al. 2008, Collier et al. 2011).

2.2. Társbérletek a magnetoszférában: II. a sugárzási övek és a hullám-részecske kölcsönhatás

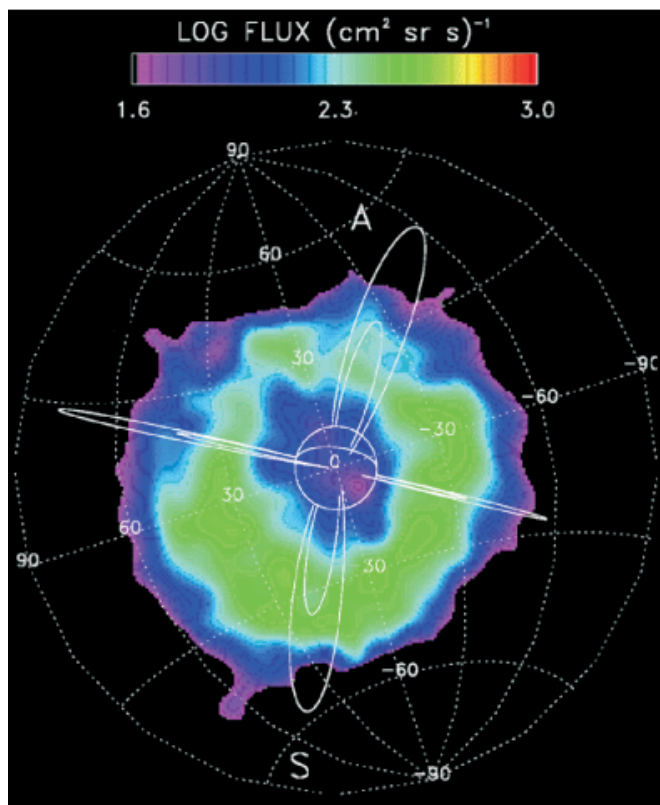
A sugárzási vagy Van Allen-öveket a magnetoszféra erővonalai által csapdába ejtett energikus részecskék alkotják (4. ábra). Két, tórusz alakú tartományból állnak, a belső öv 1,2–3 földugár távolságban helyezkedik el, az itt lévő elektronok energiája néhány 100 keV, a protonoké akár 100 MeV is lehet. A külső sugárzási öv 3–10 földugár távolságban helyezkedik el, a legnagyobb részecskefluxus a 4–5 földugár tartományban van, azaz épp egybeesik a plazmapauzával – ezért fontos ismerni a plazmapauza helyzetét. A külső övet nagyenergiájú elektronok (1–10 MeV) alkotják.

Ezek a gyakran relativisztikus energiájú elektronok azok a részecskék, amelyek képesek a műholdak elektronikai be rendezéseit a felvezetők állapotát időlegesen vagy véglegesen megváltoztatva megrongálni.

A sugárzási övek részecskéinek forrása elsősorban a napszél, a koronakitörések alkalmával a Napból kilökődő nagyenergiájú részecskék a földi magnetoszférával találkozáva a Nappal ellentétes oldalon, a mágneses uszályon – ha úgy tetszik, a „hátsó ajtón” – keresztül jutnak vissza a Föld közeli tartományokba, ahol a mágneses tér csapdába ejti azokat, a Lorentz-erő arra kényszeríti a részecskéket, hogy a mágneses erővonalak körül spirálmozgást végezzenek, a mágneses tér pedig a sarkok felé sűrűsödő erővonalak miatt azokat csapdában tartja. Ekkor a részecskék energiája nagy, de még nem relativisztikus. Nemrégiben derült fény arra, hogyan is jutnak többletenergiához ezek a részecskék: a legújabb kutatások szerint a nagy (relativisztikus) energiájú részecskék hullám-részecske kölcsönhatások során keletkeznek és csapódnak ki a sugárzási övekben (pl. Horne et al. 2005, Bortnik et al. 2008). A műholdak szempontjából különösen fontos a kicsapódás a mágneses csapdából, ugyanis a relativisztikus energiájú részecskék így jutnak el az alsóbb tartományokba is, ahol az alacsonypályás műholdak sokasága kering. A magaspályás és a geoszinkron műholdak esetében pedig már a részecskék keletkezése is „életveszélyes” folyamat, hiszen ez abban a tartományban történik, ahol ezek a holdak keringenek.



4. ábra | A sugárzási övek  
Figure 4 | The Radiation Belts



5. ábra | A gyűrűáram  
Figure 5 | The Ring Current

### 2.3. Társbérletek a magnetoszférában: III. a gyűrűáram és a mágneses viharok

A napból a belső magnetoszférába bejutó részecskék az erővonalak melletti spirálmozgáson kívül a mágneses tér inhomogenitása és a gravitációs tér miatt egy másik fajta driftmozgást is végeznek, amely merőleges mind a gravitációs térre, mind az inhomogenitás gradiensére, és a mozgás iránya töltésfüggő. Ez a mozgásirány kelet–nyugati irányú, és a töltésfüggőség miatt egyfajta áramként interpretálhatjuk. Mivel körülöleli a Földet, ezért gyűrűáramnak nevezük (5. ábra). A gyűrűáram iránya olyan, hogy az általa keltett mágneses tér gyengíti a földmágneses teret. A közismert Dst index voltaképpen a gyűrűáram által keltett mágneses tér mértéke. A mágneses viharok fő fázisában a tér gyengüléséért a gyűrűáram megerősödése a felelős, ekkor kerülnek a napszél részecskéi a belső mágneses térbe.

A gyűrűáram részecskéi közepes energiájúak, az elektronok  $\sim 10$  keV, a protonok  $\sim 200$  keV energiájúak, sűrűségük  $10\text{--}100/\text{cm}^3$ .

### 3. Űridőjárási folyamatok a magnetoszférában

Az Űridőjárási események a magnetoszférában tehát a következőképpen zajlanak:

- 1) A napból érkező nagyenergiájú részecskék bejutnak a belső magnetoszférába, ahol a gyűrűáramot megerősítve a mágneses tér változásait okozzák, aminek hatására az ionoszférában és felszínén is áramok lépnek fel. Ezekkel a hatásokkal itt most nem foglalkozunk (ld. Kovács et al. cikkét ebben a füzetben).
- 2) A nagyenergiájú részecskék hullám–részecske kölcsönhatás révén többletenergiát szereznek és extrém nagy (relativisztikus) energiára tesznek szert.
- 3) A relativisztikus energiájú részecskék – szintén hullám–részecske kölcsönhatás következtében – kiszóródnak a mágneses csapdából, pályájuk során közelebb kerülnek a felszínhez, ahol elnyelődnek a sűrű atmoszférában.
- 4) A relativisztikus részecskék keletkezésük után, illetve a kiszóródás során találkozhatnak műholdakkal, amelyekben időlegesen vagy akár véglegesen is megváltoztathatják a félvezető-átmeneteket. Ha ez normál üzem közben történik, a műhold akár véglegesen is megrongálódhat vagy elveszhet.

Ahhoz, hogy meg tudjuk akadályozni a műholdvesztést vagy -rongálódást, az egyik megoldás a műhold alapállapotba (stand-by) történő kapcsolása. Nyilvánvalóan nem szeretnénk se feleslegesen, se a szükségesnél hosszabb ideig lekapcsolni a műholdat, ezért célunk az, hogy *modellezzük* az Űridőjárási folyamatokat, és ennek alapján előre jelezzük az eseményeket. Mivel a műholdakra a fő veszélyt a relativisztikus energiájú részecskék jelentik, ezek keletkezése és kicsapódása az a folyamat, amelyet modellezni kell. A hullám–részecske kölcsönhatás több para-

méterrel írható le, a hullámterjedés egyik fő paramétere a közeg töltéssűrűségének eloszlása. Ez az a pont, ahol a plazmaszféra és a whistlerek szerepet kapnak, ugyanis a hullámterjedést alapvetően a hideg, nagy sűrűségű plazma irányítja.

Az Űridőjárási kutatások fontosságát világszerte felismerték, az Európai Unió 7-es keretprogramja kiemelten támogatja a kutatásokat e területen (FP7-Space), az Európai Űrügynökség pedig – részben az FP7-Space projektekre alapozva – elindította az űrkörnyezeti figyelőprogramot (Space Situational Awareness, SSA), amelynek célja az űreszközök operatív védelme. Az SSA három pillére az Űridőjárás, az űrszemét és a Föld közeli természetes objektumok megfigyelése. Természetesen a NASA is és az Orosz Űrügynökség is végez hasonló kutatásokat.

Az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék Űrkutató Csoportja európai uniós projektekben és orosz együttműködésben földi és műholdas mérések segítségével kutatja-vizsgálja az Űridőjárási eseményeket, az alábbiakban e kutatásokról lesz szó.

#### 3.1. Űridőjárási vizsgálatok felszíni mérésekkel

A PLASMON FP7-Space projekt (a földi plazmaszféra új, adatasszimilációs, földi méréseken alapuló modellje – kulcsfontosságú hozzájárulás a sugárzási övek Űridőjárási modellezéséhez, ld. <http://plasmon.elte.hu>) fő célja egy új plazmaszféra-modell kidolgozása, melyhez a mérési adatokat két földi hálózat szolgáltatja, az egyik a whistlermérések hálózata (AWDANet), a másik az erővonal-rezonanciákat mérő EMMA hálózat (ez utóbbival részletesen a Kovács et al. cikk foglalkozik e számban).

A projekt négy munkacsomagból áll:

*WP1:* Az egyenlítői elektronsűrűségek és sűrűségprofilok automatikus származtatása az Automatikus Whistler-Detektor és Elemző Hálózat (AWDANet) adataiból.

*WP2:* Az egyenlítői plazmasűrűségek származtatása az Európai kvázi-Meridionális Magnetométer Hálózat (EMMA) adataiból, valamint a whistler és az FLR módszer keresztkalibrációja.

*WP3:* A földi plazmaszféra adatasszimilációs modellezése.

*WP4:* A sugárzási övekből való relativisztikus elektronkicsapódás modellezése az Antarctic–Arctic Radiation-belt (Dynamic) Deposition – VLF Atmospheric Research Konsortia (AARDDVARK) hálózat adatai alapján.

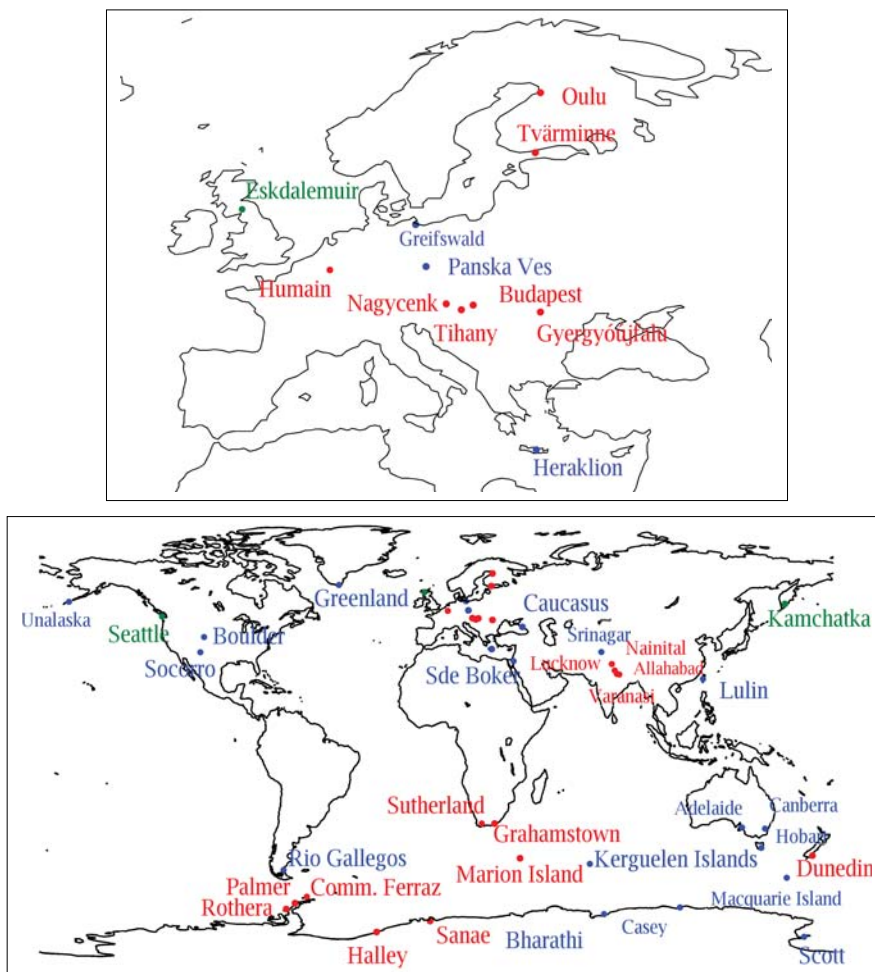
*A plazmaszféra töltéssűrűségének monitorozása whistlerekkel – az Automatikus Whistlerdetektor és Elemző Hálózat (AWDANet, (Lichtenberger et al. 2008))*

A felszínen észlelhető whistlerek a mágneses erővonalakkal párhuzamosan terjednek. A közeg a mágneses térbe ágyazott hideg plazma. A hullámterjedés leírásához szükségünk van három modellre:

- 1) *Mágneses tér modell*: ez lehet a tér dipól leírása vagy az empirikus IGRF/DGRF modell, illetve a kettő kombinációja.
- 2) *A plazma (elektronok) eloszlásmodellje* a terjedési erővonal mentén. Erre régebben a fizikai megfontolásokon alapuló diffúzív egyensúlyi modellt (Angerami, Thomas 1964) használták, ez azon a megfontoláson alapul, hogy a plazma dinamikus és a részecskék hidrosztatikus nyomása egyensúlyban van az erővonal mentén. Jelenleg inkább az újabb műholdas mérések alapján felállított empirikus modelleket használjuk (pl. Denton et al. 2004).
- 3) *Hullámterjedési modell*: régebben az Appleton–Hartree diszperziós reláció egyszerűsített formáját (Helliwell 1965) használták, amely monokromatikus közelítésben írja le a jelterjedést. Nemrégiben született egy teljes hullámalak-megoldás, amely a Maxwell-egyenletek megoldását adja a whistlerekre (Ferencz et al. 2001) és amelyek tetszőleges gerjesztő jelalakra és közegösszetételre érvényes, illetve kiterjeszhető.

E három modell segítségével *invertálhatjuk* a mért jelet, azaz a jeltől származtathatjuk a plazma- és terjedési paramétereket.

A whistlerinverzió régóta ismert eljárás, gyakorlati felhasználását két ok akadályozta eddig: a whistlerek kiválasztása az észlelt adatokból rendkívül időigényes és fárasztó munka, ezért folytonosan lehetetlen végezni. Ezen segít az általunk kidolgozott automatikus detektáló eljárás (Lichtenberger et al. 2008), amelyik képes a nyers adatfolyamból kiválasztani a whistlernyomokat. Mivel a whistlerek előfordulása egy adott helyen függ a forrás, illetve a megfelelő terjedési feltételek meglététől, ami azt jelenti, hogy egy adott helyen általában egy adott évszakban (amikor az ellenkező féltekén nyár van és gyakoriak a zivatarok) és adott napszakban (többnyire az esti-éjszakai órákban) lehet whistlereket észlelni, amelyek adott mágneses erővonal-tartományban terjednek. Mivel célunk a plazmaszféra folyamatos monitorozása, ezért mindkét féltekén, több mágneses szélességen és helyi időben kell észleléseket végezni. A plazmaszféra dinamikáját figyelembe véve ehhez mintegy 24 (vagy több), a Földön egyenletesen



**6. ábra** Az AWDANet európai (felső kép) és globális (alsó kép) állomásai. A pirossal írt állomások működő, a kékek a tervezett, a zöldek pedig a PLASMON projektben telepített állomások

**Figure 6** AWDANet station in Europe (upper panel) in in the world (lower panel). Names in red are operating, names in blue are planned and names in green are stations installed in PLASMON FP7-Space project

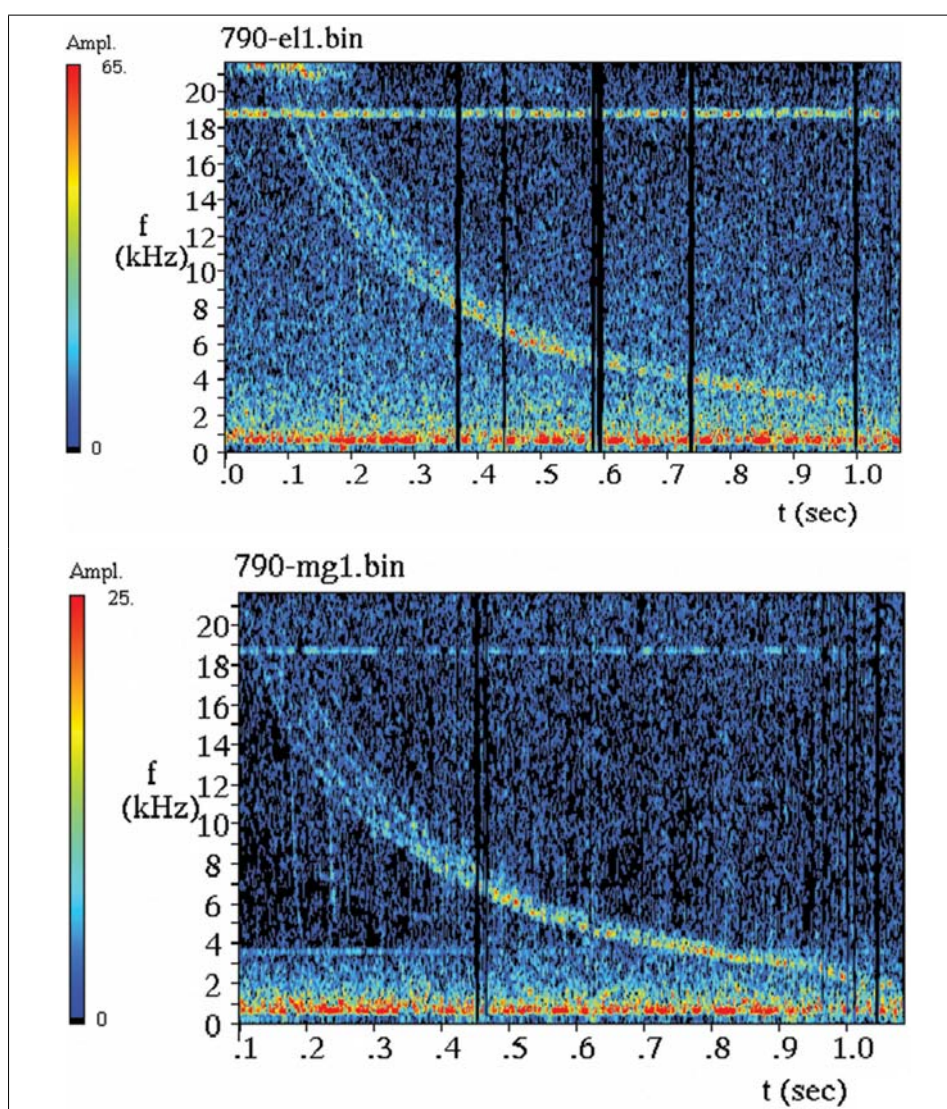
elosztott állomásból álló hálózat szükséges, ami a gyakorlatban a szárazföldre eloszlása miatt kb. 40 állomással kezelhető. E hálózat kiépítése folyamatban van, jelenleg az AWDANet-nek jelenleg 20 működő és 20 tervezet állomása van (6. ábra).

A másik akadályozó ok a kiválasztott whistleryomok skálázásának, azaz a nyom koordinátáinak kiolvasása a megjelenített dinamikus spektrumon szintén fárasztó és időrabló munka. Ennek automatizálására kidolgoztunk egy új inverziós eljárást (Lichtenberger 2009), amely az új sűrűségeloszlási és hullámterjedési modellek mellett a plazmaszféra egyenlítői elektronsűrűségének egyszerűsített modelljét is használja. Ezekkel és egy többutas terjedésű whistlercsoport- (olyan whistleryomok összessége, amelyeket egyetlen villám keltett, de a jelek több mágneses erővonal mellett is terjedtek) modell segítségével együttesen lehetővé vált az inverzió automatizálása is (Lichtenberger et al. 2010).

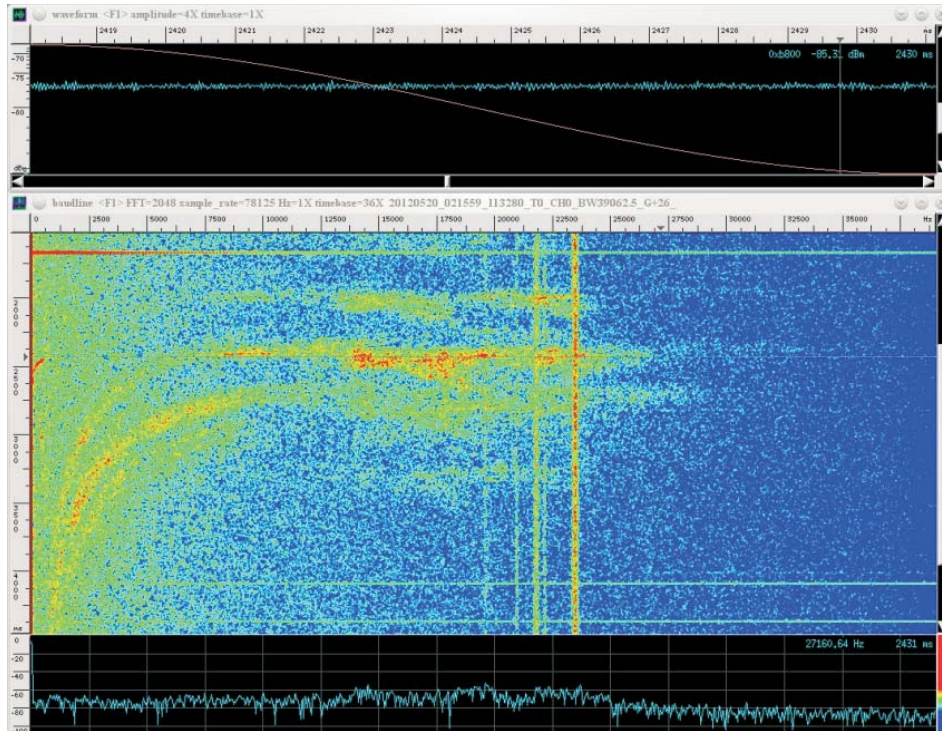
### 3.2. Űridőjárási vizsgálatok műholdas mérésekkel

A műholdak közvetlenül tudják mérni azokat a jellemzőket, amelyekre az űridőjárási modellekhez szükségünk van. E nagy előnyük mellett hátrányuk, hogy jóval drágábbak, mint a földi mérések, és a műholdpályák kötöttsége miatt nem ott és nem akkor mérnek, amikor és ahol esetleg szükség lenne arra. Ezért a műholdas és földi mérések együttes felhasználása adja a legjobb eredményt.

A POPDAT (Ionoszféra-kutatás adatorientált feldolgozással, <http://www.popdat.org>) FP7-Space program a már lezárult és jelenleg is folyó ionoszféra-kutató műholdas kísérletek adatainak egységes szemléletű feldolgozásával, valamint az Ionospheric Wave Service adatbázis létrehozásával teremt meg a későbbi felhasználás egységes adatbázisát, melyben mi elsősorban a hullámkísérletek feldolgozási és osztályozási módszereinek kidolgozásában veszünk részt.



**7. ábra** | A SAS-2 műszer által a COMPAS-2 műholdon észlelt vezetett whistler dinamikus spektruma  
**Figure 7** | Dynamic spectrum of a ducted mode whistler recorded by SAS-2 on board of COMPAS-2 satellite



**8. ábra** A SAS-3 műszer által a CHIBIS-M műholdon észlelt whistlerrek jelalakja (felső ábra), dinamikus spektruma (középső ábra) és telejsítményspektruma (alsó ábra)

**Figure 8** Waveform (top panel), dynamic spectrum (middle panel) and power spectrum (bottom panel) of whistlers recorded by SAS-3 on board of CHIBIS-M satellite



**9. ábra** A Nemzetközi Űrállomás végleges kiépítésben, a számok a SAS-4 kísérlet egységei. Az OBSTANOVKA misszióban az 1. számú mérőpont épül ki

**Figure 9** The final setup of International Space Station. The numbers are the SAS-4 measuring sites, "1" labels the one installed in OBSTANOVKA mission

A COMPAS-2 orosz–magyar–ukrán műholdon repült a magyar SAS-2 hullámkísérlet, amely VLF jeleket mért és dolgozott fel. 2006-os mérései alapján sikerült először igazolni vezetett terjedést műholdas méréseken (7. ábra) (Ferencz et al. 2009).

2012. január 25-én emelte pályára a Nemzetközi Űrállomást elhagyó Progressz teherűrhajó a CHIBIS-M orosz–magyar–ukrán műholdat (Novikov et al. 2009), amelynek fő célja a földi villámok és az azokhoz kapcsolódó röntgen-, gamma- és VLF hullámok vizsgálata. Ez alatt a teljes üzembe állítása óta eltelt pár hónap alatt is rendkívül érdekes jeleket sikerült mérni a SAS-3 műszerrel (8. ábra). E mérések, amellyel hogy további segítséget nyújtanak az űridőjárási vizsgálatokhoz, modellként szolgálnak a BepiColombo ESA–Japán Merkúr űrmisszió hullámkísérletéhez (PWI, Kasaba et al. 2010), amelyben mi az intelligens eseményfelismerő és triggerelő modult készítjük. Ez utóbbi űrmisszió indulása 2014-ben várható.

Az OBSTANOVKA kísérlet, amely orosz–magyar–ukrán–lengyel–svéd–angol együttműködésben készül, célja a Nemzetközi Űrállomás (ISS) plazmakörnyezetének vizsgálata. 2014 tavaszán indul az ISS-re. A két egységből álló berendezést az orosz szervizmodul külső falára fogják felszerelni az űrhajósok. A magyar SAS-4 hullámkísérlet első egysége is ebben kap helyet (9. ábra). A relativisztikus elektronok vizsgálata lesz a magyar részvétellel készülő RELEC orosz műhold célja, amelynek a fedélzetén egy SAS-3 berendezés repül majd. Startja előzetesen a jövő évre várható. E kísérletekben relatíve kis ráfordítással nagy tudományos eredmények elérésére van lehetőség űridőjárási téren.

### Köszönetnyilvánítás

Az itt leírt eredmények eléréséhez az EU FP-7 263218 és 263240 számú szerződése is hozzájárultak.

### A tanulmány szerzői

Lichtenberger János, Ferencz Csaba

### Hivatkozások

Angerami J. J., Thomas J. O., 1964: Studies of planetary atmosphere. 1. the distribution of electrons and ions in the Earth's ionosphere. *J. Geophys. Res.* 69, 4537–4560  
Bortnik J., Thorne R. M., Meredith N. P., 2008: The unexpected origin of plasmaspheric hiss from discrete chorus emissions. *Nature* 452, 62–66

Carpenter D. L., 1963: Whistler evidence of a knee in the magnetospheric ionization density profile. *J. Geophys. Res.* 98, 1676  
Collier A. B., Lichtenberger J., Clilverd M. A., Steinbach P., Rodger C. J., 2011: Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica. *J. Geophys. Res.* 116, A03219, doi: 10.1029/2010JA016197  
Denton R. E., Menietti J. D., Goldstein J., Young S. L., Anderson R. R., 2004: Electron density in the magnetosphere. *J. Geophys. Res.* 109(A09215), 1386, doi: 10.1029/2003JA010254  
Ferencz Cs., Ferencz O. E., Hamar D., Lichtenberger J., 2001: Whistler Phenomena, Short Impulse Propagation. *Astrophysics and Space Science Library* 262. Kluwer Academic Publisher, ISBN 0-7923-6995-5, Dordrecht, Netherlands  
Ferencz O. E., Bodnár L., Ferencz Cs., Hamar D., Lichtenberger J., Steinbach P., Korepanov V., Mikhaylova G., Mikhaylov Yu., Kuznetsov V., 2009: Ducted whistlers propagating in higher order guided mode and recorded on board of Compass-2 satellite by the advanced Signal Analyzer and Sampler SAS2. *J. Geophys. Res.* 114, A03213. doi: 10.1029/2008JA013542  
Helliwell R. A., 1965: Whistlers and related ionospheric phenomena. Stanford University Press, Stanford  
Horne R. B., Thorne R. M., Shprits Y. Y., Meredith N. P., Glauert S. A., Smith A. J., Kanekal Sh. G., Baker D. N., Engebretson M. J., Posch J. L., Spasojevic M., Inan U. S., Pickett J. S., Decreau P. M. E., 2005: Wave acceleration of electrons in the Van Allen radiation belts. *Nature*, 437, 227–230  
Kasaba Y., Bougeret J.-L., Blomberg L. G., Kojima H., Yagitani M., Moncuquet M., Trotignon J.-G., Chanteur G., Kumamoto A., Kasahara Y., Lichtenberger J., Omura Y., Ishisaka K., Matsumoto H., 2010: The Plasma Wave Investigation (PWI) onboard the BepiColombo/MMO: First measurement of electric fields, electromagnetic waves and radio waves around Mercury. *Planet Space Sci.* 58 (BepiColombo special issue, ISS 1–2), 238–278  
Lichtenberger J., Ferencz Cs., Bodnár L., Hamar D., Steinbach P., 2008: Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system. *Automatic Whistler Detector. J. Geophys. Res.* 113, A12201, doi: 10.1029/2008JA013467  
Lichtenberger J., 2009: A new whistler inversion model. *J. Geophys. Res.*, 114 A07222, doi: 10.1029/2008JA013799  
Lichtenberger J., Ferencz C., Hamar D., Steinbach P., Rodger C. J., Clilverd M. A., Collier A. B., 2010: The Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system: Implementation of the Analyzer Algorithm. *J. Geophys. Res.* 115, A12214, doi: 10.1029/2010JA015931  
Novikov D. I., Klimov S. I., Korepanov V. E., Marusenkova A. A., Ferencz Cs., Lichtenberger J., Bodnár L., 2009: Magnitno-volnovoj kompleks mikrosputnika "Tsibis-M" dla izutsenia kozmitseskoj pogodi. In: Missia "Tsibis-M", ed. by Hazirova, R. R., IKI-RAN, Moskva, pp. 78–89  
Storey L. R. O., 1953: An investigation of whistling atmospherics. *Phil. Trans. R. Soc., Series A* 246, 113–141



# Földmágnesség: A Tihanyi Geofizikai Obszervatórium

KOVÁCS P.<sup>1,\*</sup>, CSONTOS A.<sup>1</sup>, HEILIG B.<sup>1</sup>, HEGYMEGI L.<sup>2</sup>, MERÉNYI L.<sup>1</sup>,  
VADÁSZ G.<sup>1</sup>, KOPPÁN A.<sup>1</sup>

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

<sup>2</sup>MinGeo 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

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 térmodellje (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.



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

## 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.

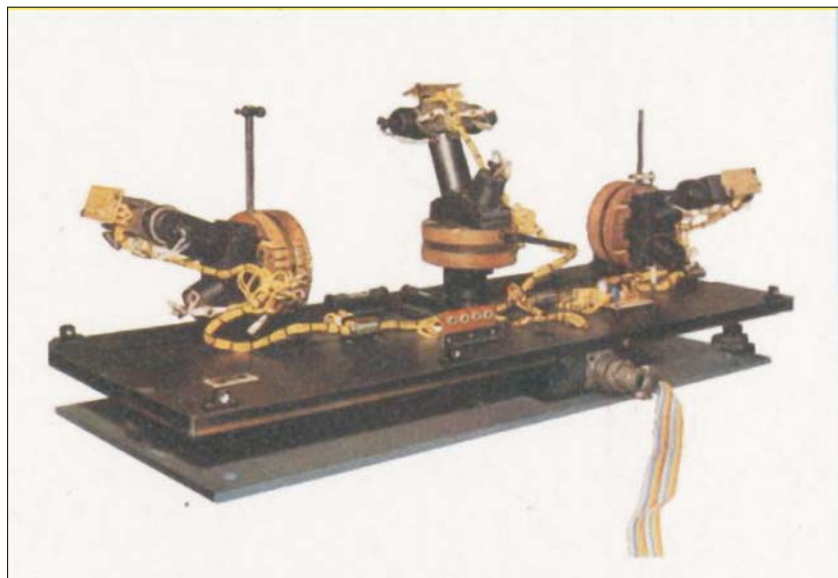
A mágneses tér pontos és hiánymentes monitorozása az anomáliamentes környezeten túl a mérési szempontokat figyelembe vevő anomáliamentes (azaz pl. ferromágneses anyagoktól mentes) épületeket feltételez, és egyedileg készített precíziós műszereket igényel. További követelmény a mérések technikai feltételeinek (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](http://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 óras 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 segítették 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 méréstechnikai 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 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 behatőbb 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.

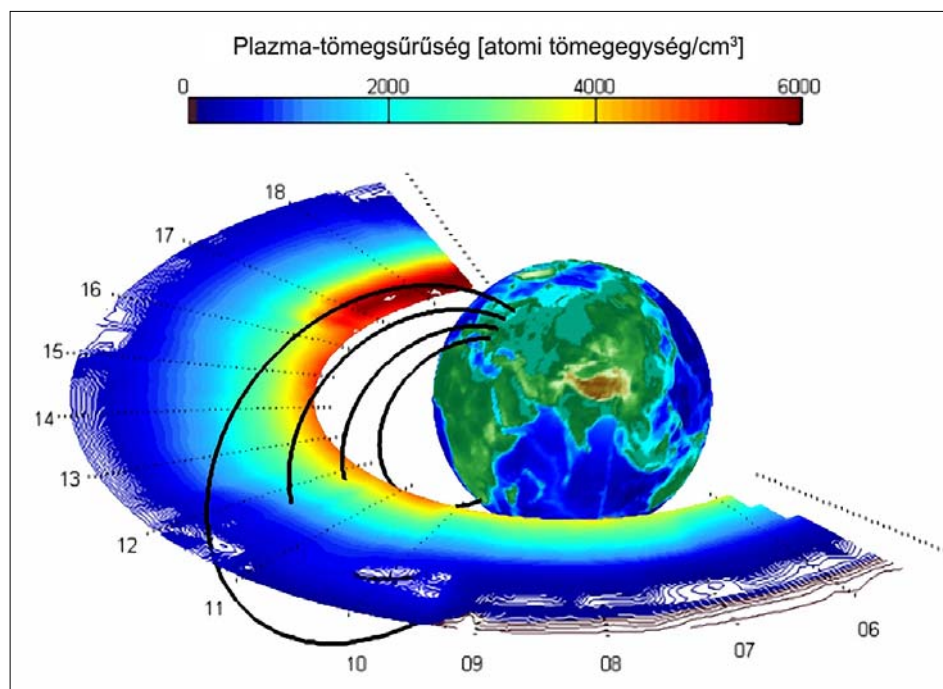
#### 4.1. Földmágneses pulzációk vizsgálata

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 sűrűségképe 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.

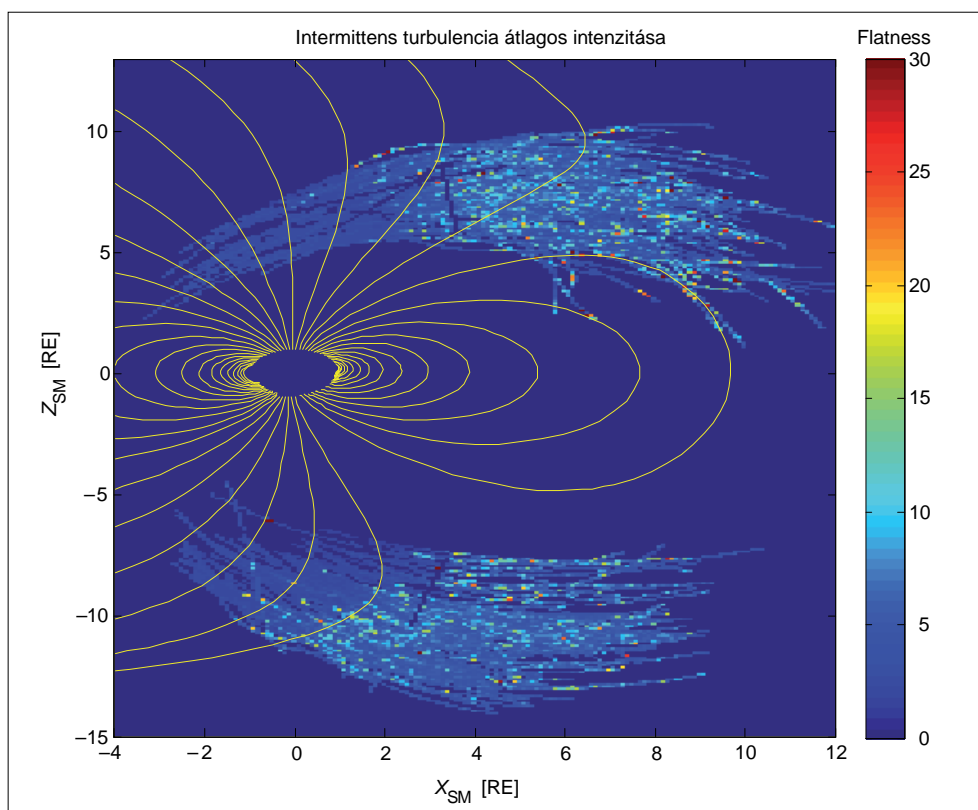
#### 4.2. Mágneses idősorok nemlineáris analízise

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 megfigyeléssel 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  $\tau$  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.

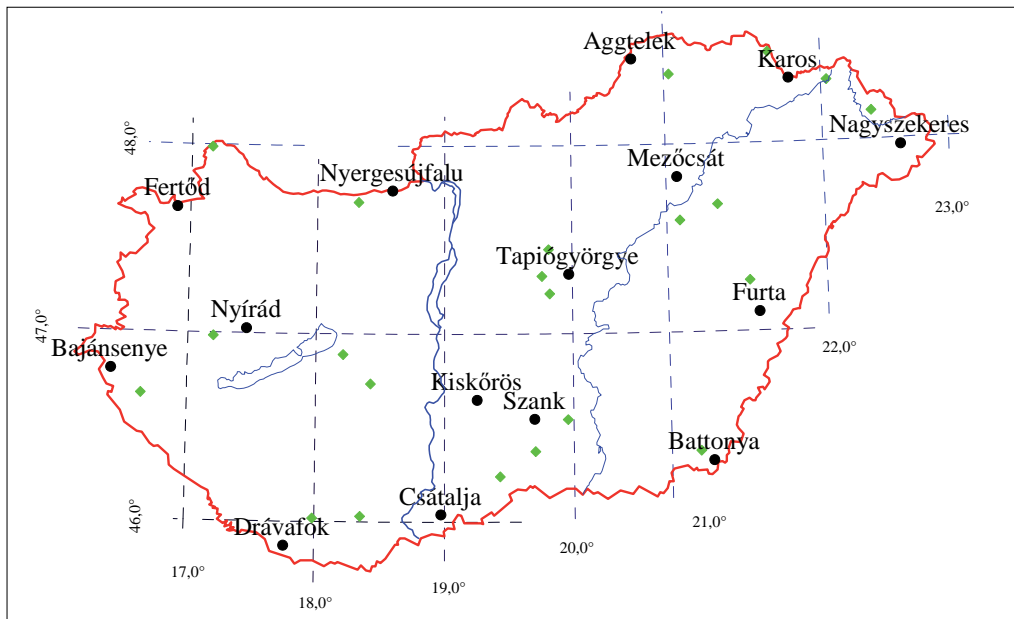
A Cluster műholdak lökéshullámfrontjának előterében észlelt adatai (pulzációk keletkezésének helye), illetve obszervatóriumi idősorok alapján tanulmányozzuk a pulzációk és a nemlineáris folyamatok intenzitása közötti kapcsolatot. Ebben az esetben figyelembe kell vennünk, hogy a szabályos hullámként megjelenő 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

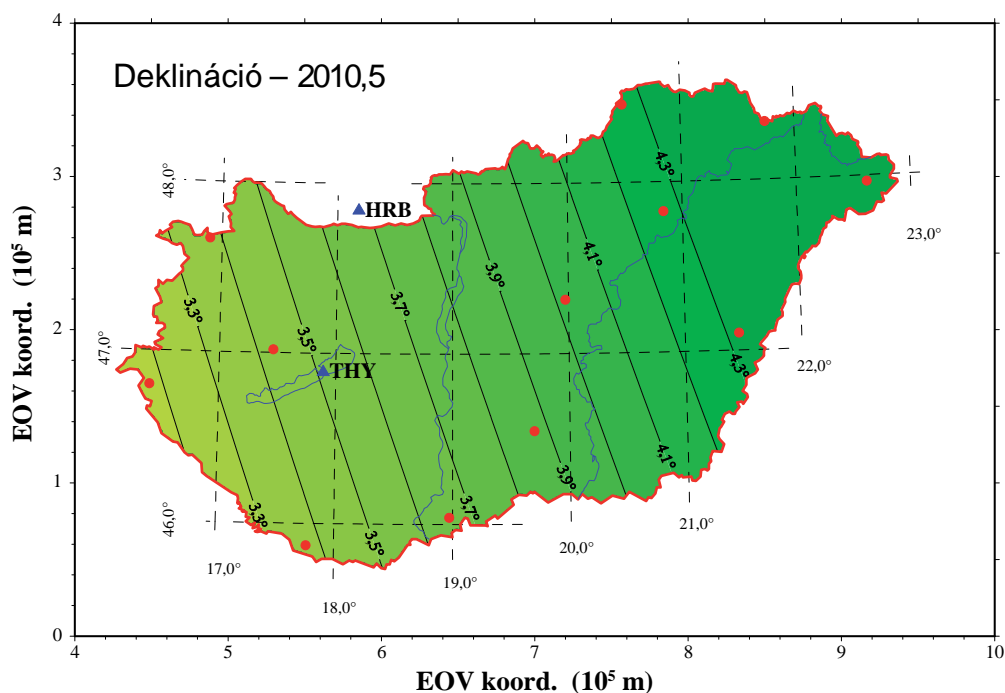
A tér minden komponensére kiterjedő hálózati méréseket Magyarország területén a Monarchia időszakában elsőként Karl Kreil végzett 1847 és 1857 között 52 ponton (Szabó 1983). Később Schenzl Guidó (1867–1879, 117 állomás), majd Kurländer Ignác (1892–1894, 38 állomás) vezetésével indultak újabb kampányok. 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),  $\Theta_0$  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,  $\Theta$  és  $\Lambda$  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:

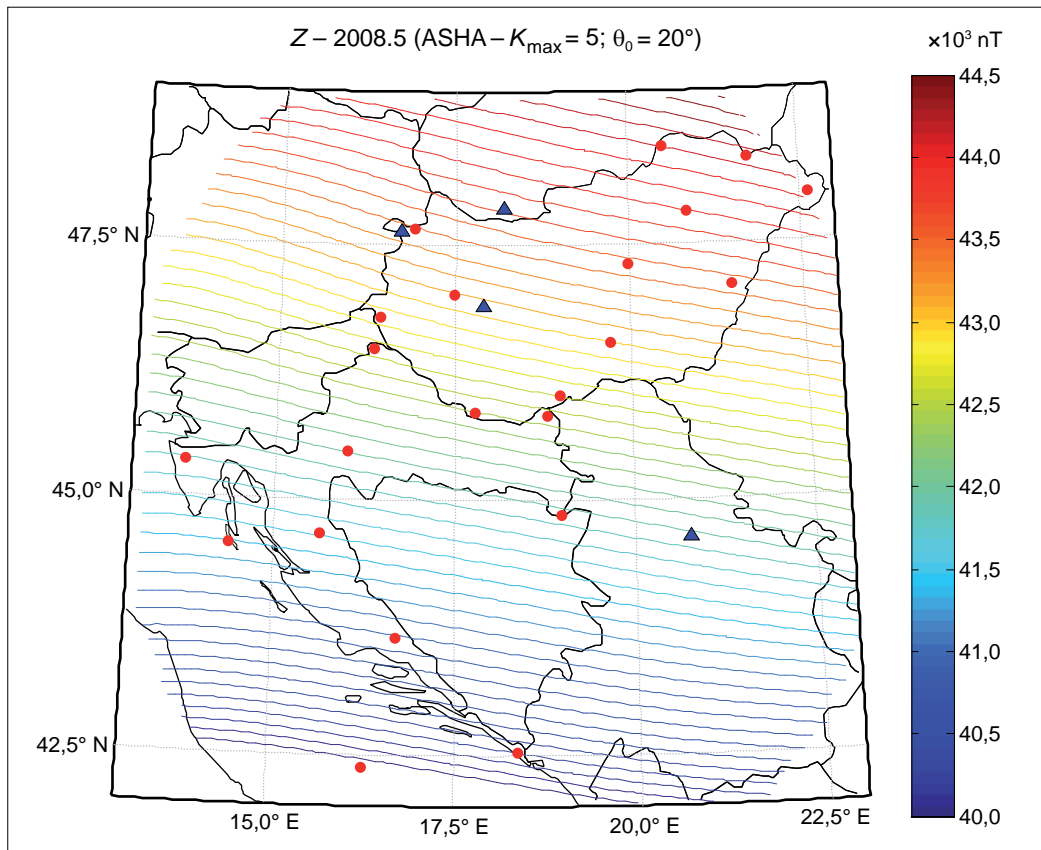
$$q \cong \frac{\pi}{2} \Theta_0 (k + 0,5) - 0,5.$$

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, Hegyemi 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., Hegyemi 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., Hegyemi L., Heilig B., Kovács P., Szabó Z., 2006: Tihanyi Geofizikai Obszervatórium 1955–2005, ELGI
- Csontos A., Hegyemi 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., Hegyemi 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., Hegyemi 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., Bektemirov 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., Hegyemi 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
- Hegyemi 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
- Hegyemi 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

# A Föld–ionoszféra üregrezonátor

SÁTORI G.<sup>@</sup>, BÓR J., BARTA V., NAGY T., KOVÁCS K.

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai u. 6–8.

<sup>@</sup>E-mail: gsatori@ggki.hu

Az elektromosan jól vezető Föld felszíne és a szintén jól vezető, de disszipatív ionoszféra által közrefogott, szigetelőnek tekintett gömbréteg üregrezonátorként viselkedik a Föld kerületével összehasonlítható hullámhosszakon. Ezek a hullámhosszak az ún. ELF (Extremely Low Frequency) frekvenciatartomány (3 Hz – 3 kHz) legalsó sávjába (<100 Hz) esnek. Ezek a hullámok többször is képesek körbeszaladni a Föld körül mielőtt lecsillapodnak, s ezalatt a hullámok fázis-összeadódása és -kioltása következtében rezonancia vonalak jelennek meg a spektrumban ~8, ~14, ~20, ~26 Hz-nél stb. 8 Hz esetében kb. 0,5 s a lecsillapodáshoz szükséges idő. A másodpercenként mintegy 40–50 villámkiülés keltette elektromos impulzus biztosítja a Föld–ionoszféra üregrezonátor állandó gerjesztését. A leírója után Schumann-rezonancia (SR) néven ismertté vált jelenségkör (Schumann 1952) természetes és olcsó eszközként szolgál globális változások vizsgálatára. Integráló képessége robosztus becslést ad a Föld troposzférájában lejátszódó globális időjárási folyamatokról, a világ zivatar-tevékenységének idő- és térbeli változásán keresztül, valamint a Föld–ionoszféra üregrezonátor felső határoló régióját (ionoszférikus D tartomány) érő extraterresztrikus hatásokról, és indikátora lehet a globális zivatar-tevékenység üridőjárással összefüggésbe hozható modulációjának. A whistlerek is villámok keltette elektromágneses hullámok a VLF (Very Low Frequency) frekvenciatartományban (~3–30 kHz), amelyek a Föld–ionoszféra hullámvezetőből kilépve, a földmágneses tér által meghatározott „vezető csatornába” történt befogásuk után speciális, ún. whistler-módusú terjedéssel eljutnak az egyik féltekéről a másikra, ahol a befogás konjugált talppontjában detektálhatók (lásd Lichtenberger és társai cikkét ebben a füzetben). Ez a cikk elsősorban a Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Observatórium SR-mérésein alapuló eredményeket foglalja össze.

## Sátori, G., Bór, J., Barta, V., Nagy, T., Kovács, K.: The Earth–ionosphere cavity resonator

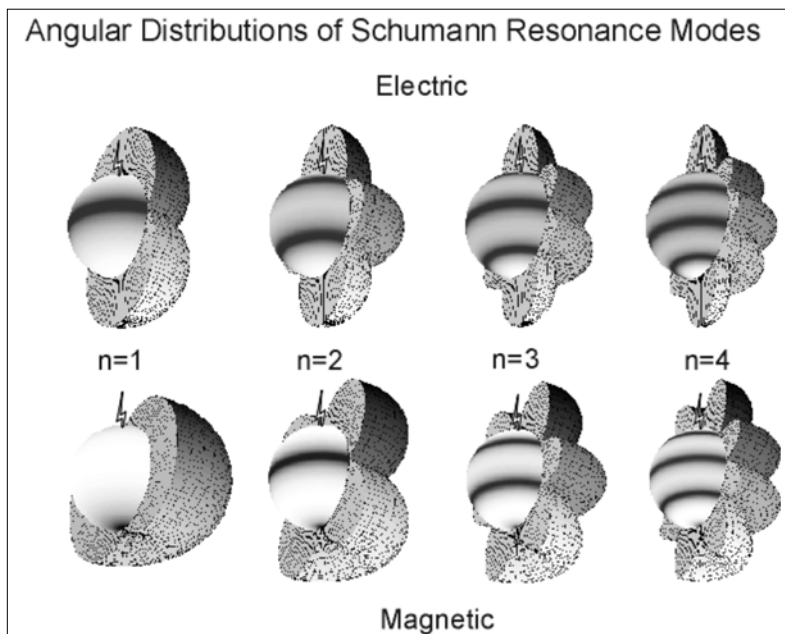
The electrically non-conductive air layer bordered by the highly conductive surface of the Earth and the highly conductive but dissipative ionosphere forms a spherical cavity resonator for the wavelengths comparable with the circumference of the Earth. These wavelengths are in the lowest frequency range (<100 Hz) of the ELF (Extremely Low Frequency) band (3 Hz – 3 kHz). These waves can circumnavigate around the Earth before the attenuation. The phase addition and cancellation can produce resonant line spectrum at ~8, ~14, ~20, ~26 Hz, etc. in the multiple propagation path. The time need for the attenuation is about 0.5 sec in case of 8 Hz. The lightning impulses occurring in 40–50/sec assures the continuous excitation of the Earth–ionosphere cavity. The resonance phenomenon is known as Schumann resonance (SR, cf. Schumann 1952) and can be considered as a natural and cheap investigation tool for studying global changes. Its integrative ability can give robust estimation on the global changes of climate in the troposphere by the space and time variation of global lightning activity and on the extraterrestrial influences in the ionospheric border-wall of the cavity as well as on the modulation of global lightning attributed to the space weather – Earth weather relationships. The whistlers are special electromagnetic waves also produced by lightning strokes in the VLF (Very Low Frequency) frequency band (3–30 kHz) which can escape from the ionosphere. They are trapped in conductive magnetic tubes and propagate from one hemisphere to the other one in the magnetosphere and can be detected at the conjugate point of the trap location (see Lichtenberger et al. in this issue). First of all this paper summarizes the results based on the SR observation in the Széchenyi István Geophysical Observatory at Nagycenk.

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

## Bevezetés

A Föld–ionoszféra üregrezonátor elektromágneses saját-frekvenciáit leírója után nevezzük Schumann-rezonanciáknak (SR, vö. Schumann 1952). A Föld–ionoszféra hullám-vezető legegyszerűbb modellje két koncentrikus, elektro-

mosan vezető felülettel határolt vékony gömbréteg vákuummal a belsejében. Az ELF (Extremely Low Frequency) sávban (3 Hz–3 kHz), annak is az alsó részében (<100 Hz), a Schumann-rezonancia frekvenciatartományában, a hullámvezető magassága jóval kisebb a hullámhossznál, ezért csak a  $TM_0$  (nulladrendű transzverzális mágneses) módus



**1. ábra** | Az első négy  $TM_0$  normál módus elektromos és mágneses térkomponensének amplitúdóeloszlása, a pólusnál elhelyezett vertikális elektromos dipól forrással (Sentman 1995)

**Figure 1** | Angular distributions of amplitudes of the electric and magnetic field components for the first four  $TM_0$  normal modes with vertical electric dipole source at the pole (Sentman 1995)

terjedhet. A felszínen (az észlelőhelyen) az elektromos teret a radiális, a mágneses teret az azimutális komponensével szokás jellemezni (1. ábra), ugyanis a még zérustól különböző  $E_\theta$  elektromos térkomponens elhanyagolható, négy nagyságrenddel kisebb  $E_r$  értékénél (Polk 1982).

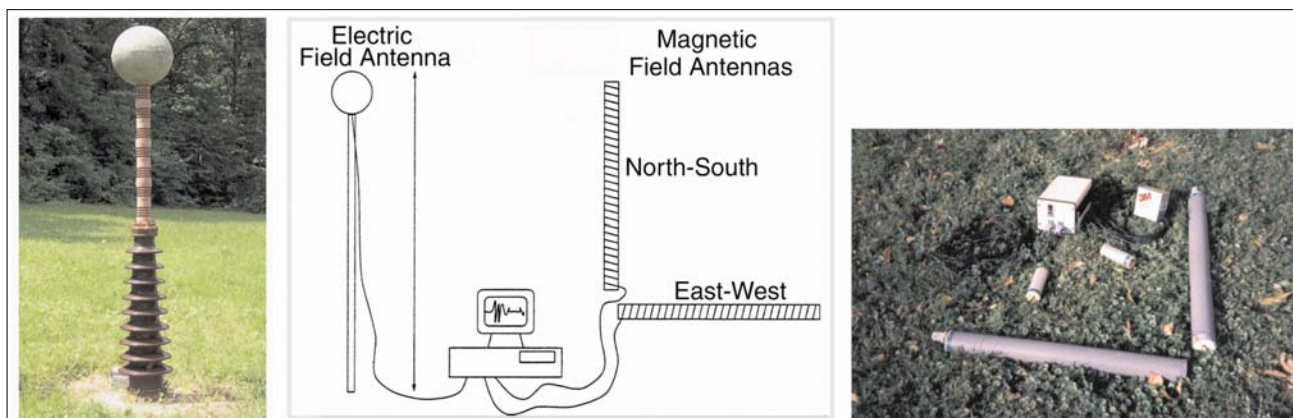
Az SR-jelenség első mért spektrális reprezentációját a rezonanciavonalak bemutatásával Balsler and Wagner (1960) munkája szolgáltatta.

Williams tanulmánya (1992) új lendületet adott az SR-jelenség kutatásához. Az SR-amplitúdót mint „trópusi hőmérőt” mutatta be abból a megfontolásból, hogy az SR-jelenség forrása, azaz a villámok keletkezése erősen hőmérsékletfüggő, különösen a trópusokon. Itt néhány tized °C hőmérséklet-emelkedés nagyságrendi növekedést okozhat a villámszámban.

### SR mérőrendszer a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban

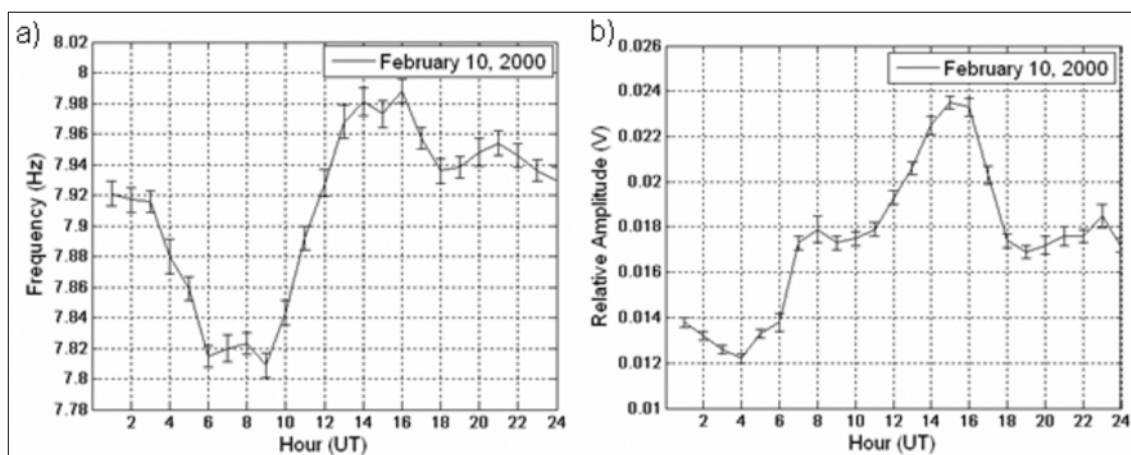
A számítástechnika hatalmas fejlődése is hozzájárult a korszerű digitális technikán alapuló folyamatos SR-mérések beindításához, többek között a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban, Nagycenk közelében, ahol a vertikális elektromos térkomponens mérése 1993-ban, majd a horizontális mágneses térkomponens regisztrálása 1997-ben elindult (Sátori et al. 1996) (2. ábra).

A vertikális elektromos térkomponens ( $E_r$ ) mérése egy kapacitív gömbantenna szolgál, a horizontális mágneses térkomponens ( $H_\theta$ ) mérése két, földrajzi észak–déli és kelet–nyugati irányba tájolt, nagy menetszámú (500 000) indukciós szondával történik. A rendszer frekvenciaátviteli



**2. ábra** | A Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban SR mérőrendszere

**Figure 2** | SR recording system in the Széchenyi István Geophysical Observatory at Nagycenk



3. ábra a) A frekvencia és b) a relatív amplitúdó napi változása 2000. február 10-én a vertikális elektromos térkomponens első módusára

Figure 3 a) Diurnal variation of the frequency and b) the relative amplitude for the 1st mode of the vertical electric field component in February 10, 2000

karakterisztikáját, amely gyakorlatilag 5 Hz és 30 Hz között van, az eredeti elképzeléseknek megfelelően az első három SR-módus (~8, ~14, ~20 Hz) vizsgálatára terveztük. A felerősített analóg jelek egy AD konverter bemenetére kerülnek, s az idősorok egy kvázi valós idejű spektrális analízist követően a spektrális paraméterek kerülnek tárolásra.

A komplex demoduláció nagyon alkalmas idősorok kiválasztott frekvenciáihoz, esetünkben az első három SR-módus pillanatnyi frekvenciájához tartozó amplitúdók és fázisok időbeli változásának vizsgálatára közel valós időben (Verő 1972, Sátori et al. 1996). A komplex hullámvektor paramétereinek (fázis, amplitúdó) meghatározása a kiválasztott frekvenciasávok centrális periódusának megfelelő időintervallumokban történik. A fázisváltozásnak az idő függvényében történő számítása megfelel a frekvencia időbeli változásának (elméletileg egy oktávon belül).

A 3. ábra az alkalmazott spektrális eljárás eredményét, a rezonanciafrekvencia és az amplitúdó napi változását mutatja a szórásértékekkel együtt egy kiválasztott napon, 2000. február 10-én.

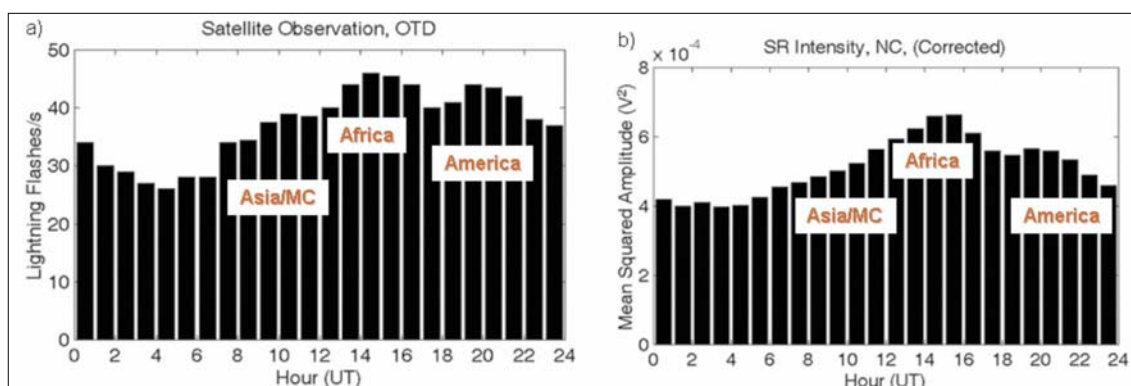
A 4.a ábra az OTD (Optical Transient Detector) műhold által megfigyelt villámszám napi eloszlását és a b) az

SR-intenzitás Nagycenken megfigyelt napi változását mutatja ugyanazon évek (1996–1999) átlagát tekintve. A napi eloszlás alakja nagyfokú hasonlóságot mutat a kétféle megfigyelés esetén, jelezve, hogy az SR-intenzitás elsősorban a globális zivatartevékenység leképezése. Jól kirajzolódik a három nagy trópusi zivatarrégió (Dél-Amerika, Afrika, Délkelet-Ázsia/Indonézia) maximális aktivitásának megfelelő csúcs világdőben (UT), ami helyi időben a kora délutáni óráknak felel meg az említett zivatarrégiókban.

Az átlagos napi frekvenciaalakzatok különbözők mindegyik módusra, és nyilvánvaló évszakos változást is mutatnak évről évre történő ismétlődéssel, ahogyan azt a 5. ábra mutatja (Sátori 1996).

### A féléves trópusi hőmérséklet-változás

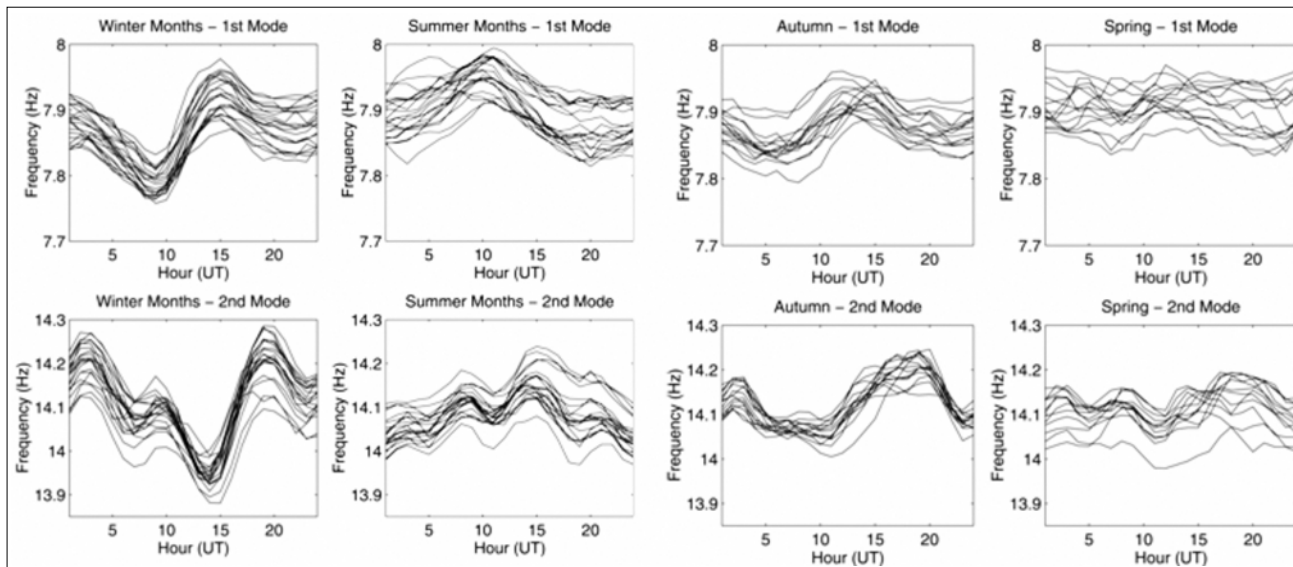
Napj-egyenlőségi hónapokban a trópusi régióban az egysejnyi felületre juttatott többlet napsugárzási energia egy ~1,5 °C-os, féléves hőmérsékleti hullámban jelentkezik áprilisi és októberi maximummal. E hőmérséklet-változás-



4. ábra A globális zivatartevékenység átlagos napi eloszlása világdőben: a) az OTD műhold optikai észlelése és b) a Nagycenken (NC) megfigyelt SR intenzitás alapján

Figure 4 Mean diurnal distribution of global lightning in universal time (UT): a) optical observation by OTD satellite and b) SR intensity recorded at Nagycenk (NC)



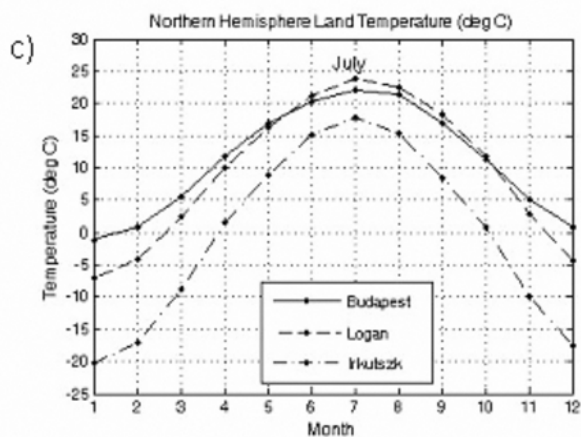
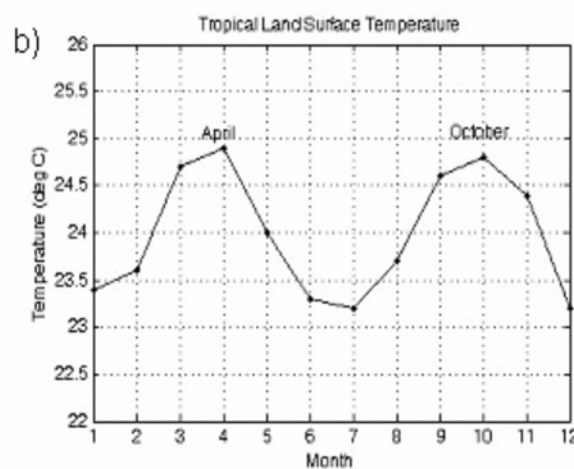
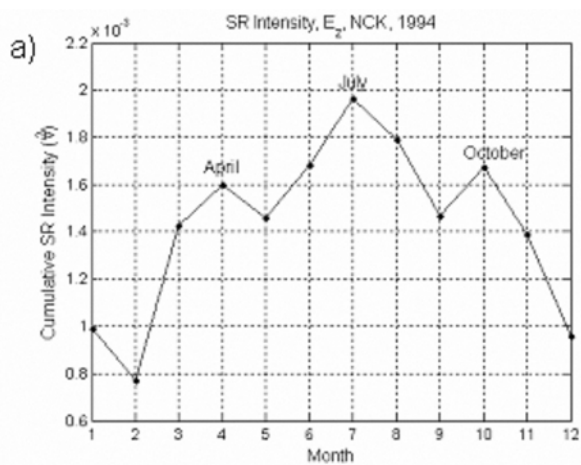


5. ábra Az átlagos napi frekvenciaalakzatok évről évre történő ismétlődése azonos évszakban, azonos rezonanciamódusok esetén (felső sor: 1. módus; alsó sor: 2. módus; tél, nyár, ősz, tavasz)

Figure 3 Mean diurnal frequency patterns repeated in the same seasons for the same resonance modes (upper row of plots: 1st mode; lower row of plots: 2nd mode; winter, summer, autumn, spring)

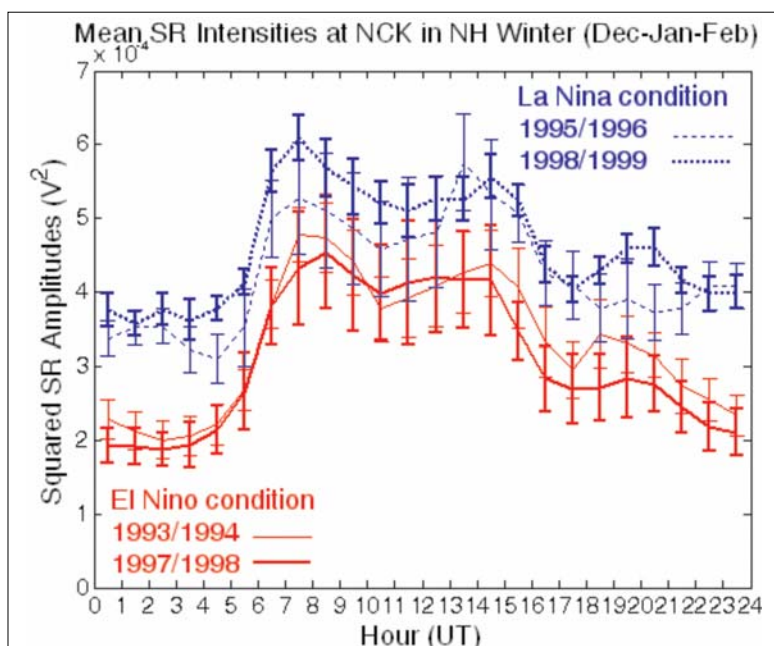
nak a szerepe a megnövekedett villámaktivitáson keresztül a Schumann-rezonanciák intenzitásváltozásában is tükröződik (Sátori and Zieger 1996) (6. ábra).

Az SR intenzitásmaximumok hónapjai összeesnek a trópusokon mért áprilisi és októberi hőmérsékleti maximumokkal, valamint az északi féltekén mért (három közepes széles-



6. ábra a) Nagycenken mért kumulatív SR-intenzitás 1994 hónapjaiban, b) trópusi szárazföldi felszíni hőmérséklet az év hónapjaiban, c) az északi félteke közepes földrajzi szélességén elhelyezkedő három állomásán (Budapest, Logan, Irkutsk) mért átlagos felszíni hőmérséklet az év hónapjaiban

Figure 6 a) Cumulative SR intensity at Nagycenk in the months, 1994, b) mean annual tropical land surface temperature variation, c) mean annual temperature variation in three stations (Budapest, Logan, Irkutsk) in the middle latitudes of the Northern hemisphere



**7. ábra** A vertikális elektromos térkomponens átlagos napi SR intenzitásváltozásai Nagycenkénél, két hideg (La Niña) és két meleg (El Niño) ENSO epizód során, az északi félteke téli hónapjaiban (december, január, február)

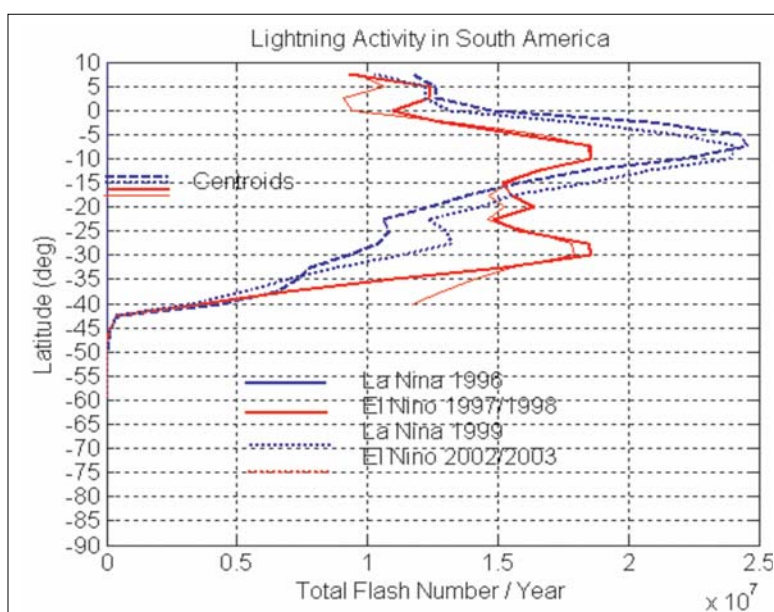
**Figure 7** Mean diurnal SR intensity variations at Nagycenk in two cold (La Niña) és two warm (El Niño) ENSO episodes in Northern hemisphere winter months (December, January, February)

ségi állomáson: Észak-Amerika: Logan, Európa: Budapest, Ázsia: Irkutszk) júliusi hőmérsékleti maximummal.

### Villámaktivitás az ENSO időskálán

Az ENSO (El Niño/La Niña Southern Oscillation) jelenség egy ciklikus éghajlati változás, amely meglehetősen sza-

bálytalanul ismétlődő időtartammal (kb. 2–5 évente) következik be a Csendes-óceán trópusi térségében. Egyik fő ismérve, hogy a meleg, El Niño fázisban a tengerfelszín hőmérséklete 2–4 °C-kal megnő, míg a hideg, La Niña időszakban néhány °C-kal lecsökken az átlaghoz képest a Csendes-óceán keleti medencéjének egyenlítői régiójában. Markáns változás következik be a légkörben is. Meleg időszakban a magas légköri nyomás jellemző a Csendes-óceán



**8. ábra** Zonális villámeloszlás Dél-Amerikában két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakban OTD/LIS mérések alapján valamint az eloszlások súlypontjának a földrajzi szélessége (Sátori et al. 2009b)

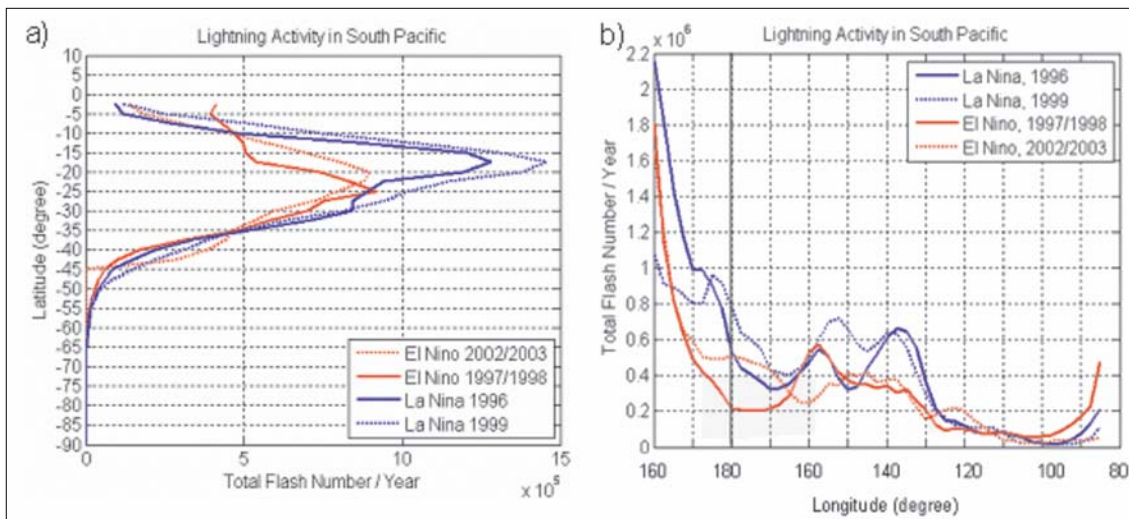
**Figure 8** Zonal distribution of lightning activity in South America in two warm, El Niño and two cold, La Niña periods based on OTD/LIS observations and the geographical latitudes of the centroids of lightning distributions (Sátori et al. 2009b)

nyugati medencéjében, míg a hideg periódusban alacsony a légköri nyomás ebben a régióban. A Csendes-óceán térségében születő ENSO jelenség kihatással van a teljes földi éghajlat alakulására.

A 7. ábrán két hideg és két meleg ENSO periódus során, a téli hónapokban (december–január–február) mért átlagos napi SR intenzitásváltozás látható a vertikális elektromos térkomponensre vonatkozóan. Nem várt módon mindkét meleg, El Niño periódusban alacsonyabb SR intenzitásértékek adódtak, mint a két hideg, La Niña időszakban. Az

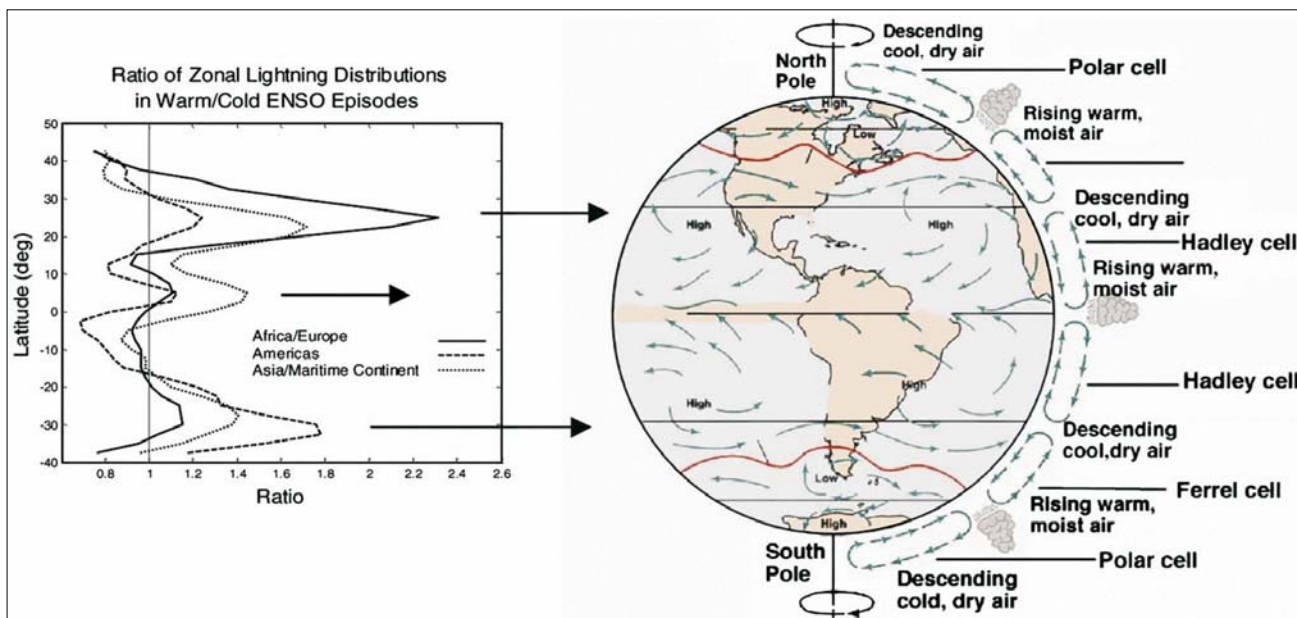
intenzitáscsökkenést egyaránt lehet a villámaktivitás tényleges csökkenésével vagy a forrás–észlelő távolságának a megnövekedésével vagy mindkettő bekövetkezésével magyarázni.

Az ENSO jelenség két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakában mért SR intenzitásváltozás értelmezéséből kiindulva, a globális villámaktivitás OTD/LIS műholdas mérésének széles körű analizálásával független bizonyítékát adtuk a globális villámaktivitás meridionális átrendeződésére az ENSO időskálán. Alátámasztottuk azt az SR-mérések



9. ábra | A villámaktivitás a) zonális és b) meridionális eloszlása a Csendes-óceán déli medencéjében két meleg, El Niño és két hideg, La Niña időszakban

Figure 9 | a) Zonal and b) meridional lightning distribution in the south basin of Pacific in two warm, El Niño and two cold, La Niña periods



10. ábra | a) A villámaktivitás El Niño/La Niña időszakra vett arányainak zonális eloszlása a három nagy trópusi régiót (Dél-Amerika, Afrika, Dél-kelet-Ázsia) is tartalmazó földrajzi hosszúsági intervallumban. b) A globális, meridionális légköri cirkulációk (Hadley-, Ferrel-, Poláris-cirkuláció) sematikus ábrázolása a hideg, száraz levegőt szállító süllyedő és meleg, nedves levegőt szállító emelkedő régiók jelölésével

Figure 10 | a) Ratios of zonal lightning distributions in the three longitudinal ranges containing the three tropical chimney regions: South America, Africa and South-East Asia. b) The global meridional atmospheric circulations (Hadley, Ferrel, Polar cells) indicating the greatest relative changes in the regions of descending cool dry air and rising warm moist air

alapján tett megállapítást, hogy Dél-Amerikában (az Amazonas-medencében) és a Csendes-óceán (óceáni) térségben éppen a hideg, La Niña periódusokban gyakoribbak a villámok, ellentétben a szárazföldek zivatartermékenységével, ahol a villámaktivitás (régiónktól függően) növekvő tendenciát mutat a meleg, El Niño időszakokban, ahogyan azt a 8. és 9. ábra mutatja (Sátori et al. 2009b). Az is látható, hogy a zivatartermékenység súlypontja délebbre tolódik a meleg, El Niño időszakokban, mind Dél-Amerikában (8. ábra), mind a Csendes-óceán térségében (9. ábra).

Az OTD/LIS műholdas mérések analizálásával az ENSO időskálán globális érvényű összefüggés vált nyilvánvalóvá a villámaktivitás változása és a nagy meridionális (Hadley-cirkuláció) és zonális (Walker-cirkuláció) légköri zónák szintoptikus skálán süllyedő régióiban (10. ábra). A Walker-cirkuláció ENSO időskálán történő zonális áthelyeződése arra is ad magyarázatot, hogy miért a hideg, La Niña fázisban van több villám a Csendes-óceán térségében. Ugyancsak összefüggés adódott a globális villámaktivitás változásában hideg/meleg ENSO periódusokban a termális egyenlítőnél (Sátori et al. 2009b).

### A Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriája

A Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali/éjszakai aszimmetriája, amely eltérő hullámvezető magasságot és vezetőképeséget jelent, kimutatható mértékű, frekvenciafüggő (módusszám) SR amplitúdó-, intenzitásváltozást okoz, és megkülönböztethető a forrás-észlelő távolság vagy a forrás-intenzitás változásából eredő amplitúdó-, intenzitásváltozásoktól.

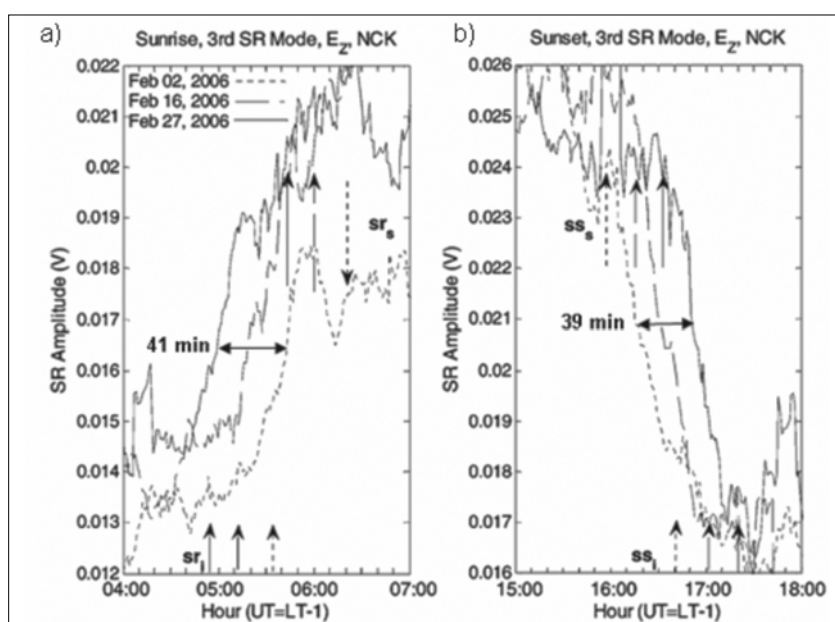
A 11. ábra a vertikális elektromos térkomponens harmadik módusának amplitúdóváltozását mutatja napfelkelte a) és naplemente b) körüli órákban három februári napon,

2006-ban. Az „sr<sub>i</sub>” ionoszférikus napfelkelte, az „sr<sub>s</sub>” felszíni napfelkelte időpontokat jelölik, az „ss<sub>s</sub>” és „ss<sub>i</sub>” jelzésű nyilak pedig a felszíni és ionoszférikus naplementeidőket mutatják. Február 2-án és 27-én 41 perc különbséggel kel fel a nap, és 39 perc különbséggel nyugszik le. Ez az időkülönbség jól beazonosítható mind a hirtelen amplitúdónövekedések idején az ionoszférikus napfelkeltét követően, mind a hirtelen amplitúdócsökkenések során az ionoszférikus naplementét megelőzően. Továbbá az is megállapítható, hogy az ionoszférikus napfelkeltekor bekövetkező hirtelen amplitúdónövekedés már befejeződik a felszíni napfelkelte előtt kb. 15–20 perccel, és a felszíni naplementét követően ugyancsak kb. 15–20 perccel később kezdődik a hirtelen amplitúdócsökkenés, amely az ionoszférikus naplementével fejeződik be. Ez azt jelenti, hogy az SR frekvenciatartományban történő hullámterjedés szempontjából meghatározó ionizációs/semlegesítődési folyamatok 25–30 perc alatt, azaz gyorsabban zajlanak le, mint a felszíni és 100 km magasságban bekövetkező napfelkelte/naplemente közötti időkülönbség.

A 12.a ábra mutatja a vertikális elektromos térkomponens amplitúdójának változását napfelkelte körüli órákban az első rezonanciamódusra. Látható, hogy az ionoszférikus napfelkeltekor (normalizálás időpontja) egymással szinkronban következik be a hirtelen, kb. 10–15%-ra becsülhető amplitúdó-növekedés, míg az ionoszférikus napfelkeltét megelőzően és a felszíni napfelkeltét követően véletlenszerű, zajos amplitúdó változások láthatók.

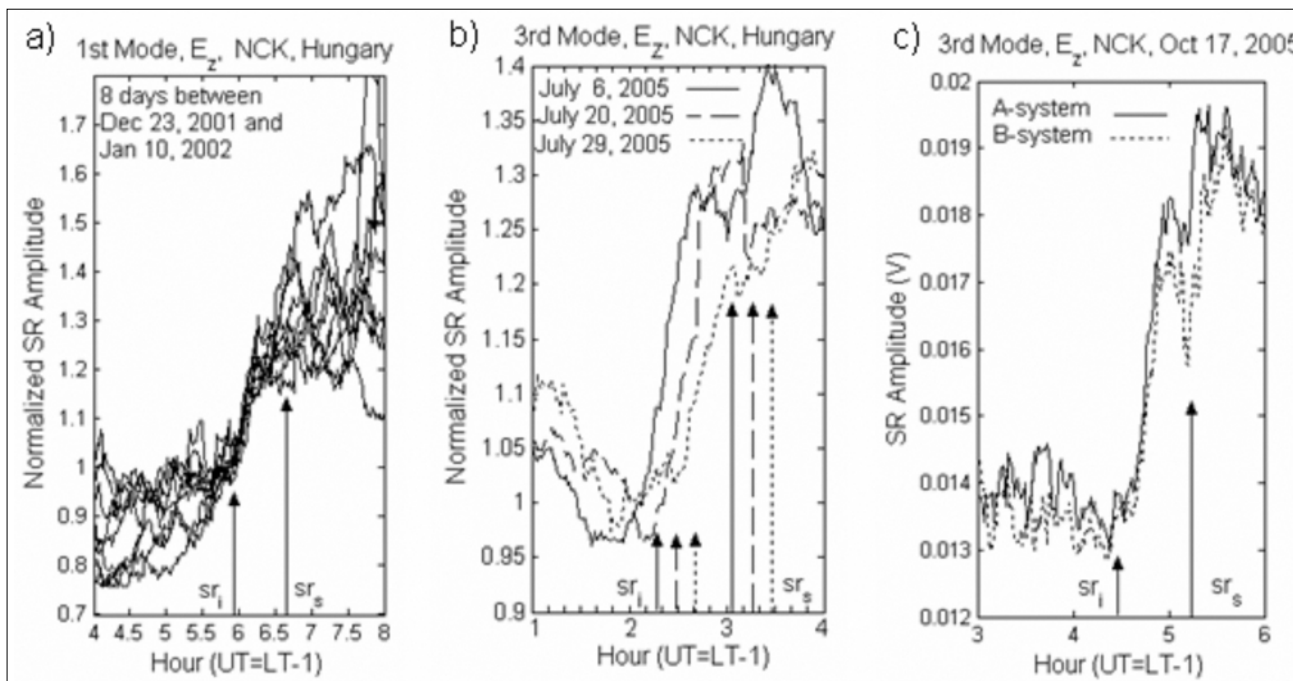
A 12.b ábrán kiválasztott három júliusi napon tapasztalt hirtelen amplitúdónövekedés bemutatása azt érzékelteti, hogy ez az elugrás akkor következik be, amikor a világ zivatartermékenységének minimuma van világidőben (02–03 UT), tehát nem beszélhetünk egyetlen forrásrégió aktivizálásáról sem ezekben az órákban.

A 12.c ábrán bemutatott eredmény jelentősége abban van, hogy két, párhuzamosan működő SR-adatgyűjtő ered-



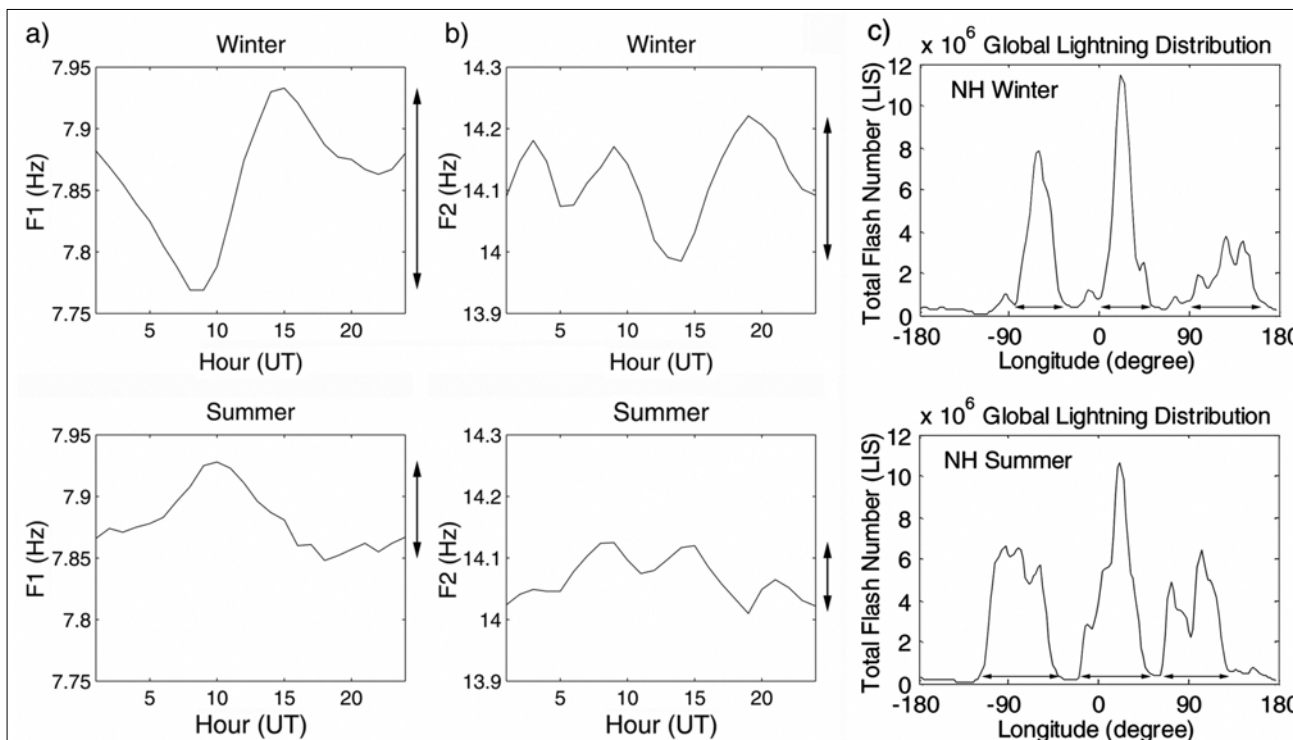
**11. ábra** A vertikális elektromos térkomponens harmadik módusának amplitúdóváltozása a) napfelkelte és b) naplemente) körüli órákban Nagycenk, 2006. február 2-án, 16-án és 27-én

**Figure 11** Amplitude variation of the third mode of the vertical electric field component at around the hours of a) sunrise and b) sunset at Nagycenk in February 2, 16 and 27, 2006



12. ábra A vertikális elektromos tér amplitúdójának változása ionoszférikus ( $sr_i$ ) és felszíni ( $sr_s$ ) napfelkeltekor a) azonos napfelkelte időpontokban, b) amikor világidőben minimuma van a globális zivatartevékenységnek, c) két párhuzamosan futó mérőrendszer esetén részben átfedett időablakkal

Figure 12 Amplitude variations of the vertical electric field component at ionospheric ( $sr_i$ ) and surface ( $sr_s$ ) sunrise a) in the same sunrise time b) at the hours of minimum world lightning activity c) in case of two recording systems running parallel partly overlapped time windows



13. ábra A napi frekvenciaváltozás és ingadozásuk mértéke (függőleges nyilak) az északi félteke telén és nyarán Nagycenken a vertikális elektromos térkomponens: a) első módusában és b) a második módusában, valamint c) a LIS műhold által megfigyelt totális villámszám a három fő villámrégióban a hosszúság függvényében az északi félteke telének, valamint nyarának megfelelő évszakban. A vízszintes nyilacska a zonális kiterjedést jelölik (Sátori et al. 2009a)

Figure 13 Variation of the diurnal frequency range (DFR) for a) the 1st and for b) the 2nd  $E_z$  modes at NCK in NH winter and summer months marked by vertical arrows on the right hand side of each plot, and c) lightning distributions in the three main lightning regions with zonal diameters indicated by horizontal arrows in NH winter and summer months observed by LIS satellite (Sátori et al. 2009a)

ményét mutatja be azonos napfelkelte órákban. Az amplitúdóváltozások finom részleteiben van különbség az ionoszférikus napfelkelte előtti és a felszíni napfelkelte körüli/utáni órákban (ezen az időskálán már mondhatjuk, hogy nem a zivatarok, hanem a villámok, azaz a gerjesztés helyének véletlen volta következtében), de az ionoszférikus napfelkelte követő hirtelen amplitúdónövekedés „óramű” pontossággal szinkronban van egymással, jelezve a változás ionoszférikus eredetét.

### A globális zivartartevékenység területi változása

A napi frekvenciatartomány szélessége (lásd nyilak) összefüggésben van a zivataros területek nagyságával (13.a, b ábra). Minél szélesebb ez a frekvenciasáv, annál kisebb területre korlátozódnak a zivatarok, és minél keskenyebb ez a sáv, annál nagyobb területet foglalnak el a zivatarok, ahogyan azt a LIS (Lightning Imagine Sensor) műholdról megfigyelt földrajzi hosszúság szerinti globális zivartareloszlás mutatja az északi félteke telének, valamint nyarának megfelelő évszakban a 13.c ábrán (Sátori et al. 2009a).

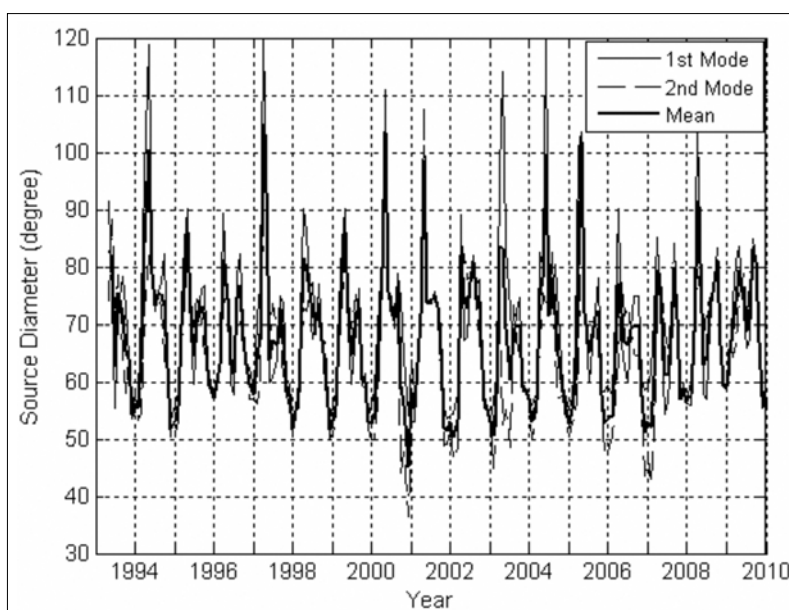
Nickolaenko and Rabinovitz (1995) kidolgozott egy algoritmust, amely a napi frekvenciaingadozás mértékét ( $f_{\max} - f_{\min}$ ) kör alakú területté konvertálja. A nagyecenkai SR frekvenciamérések alapján előállítottuk a „forrás-átmérő” idősort mintegy másfél napeciklusnyi időszakra vonatkozóan is, amely globális zivartartevékenység területi változására ad robusztus becslést ezen az időskálán (14. ábra). A globális zivartartevékenység éves és féléves területi változása napciklussal összefüggő modulációt mutat (Sátori, Zieger 2003, Sátori et al. 2007a). Az éves területi változás a szárazföldek

eltérő arányából adódik az északi és déli féltekén. Az éves területi változás modulációjának a mértéke nő a növekvő naptevékenységgel, míg a trópusi–szubtrópusi eredetű féléves területi változás modulációja a galaktikus kozmikus sugárzás fluxusának ellenkező értelmű változását tükrözi a napciklus során, azaz naptevékenységi minimum éveiben domináns (1996 és 2008/2009). A villámaktivitás a 11 éves napciklusra szélességfüggő területi választ ad:  $\sim 40^\circ$  É-i szélességnél magasabb szélességeken a zivataros területek mérete nő a fokozódó naptevékenységgel, míg a  $\sim 40^\circ$  É-i és  $40^\circ$  D-i szélesség között a zivataros területek nagysága a galaktikus kozmikus sugárzás változását tükrözi. A kapott eredmény feloldást jelenthet a szakirodalomban található számos ellentmondó eredményre, amelyek némelyike a naptevékenység, mások a galaktikus kozmikus sugárzás változása és a villámaktivitás közötti pozitív korrelációról számoltak be vagy nem tapasztaltak napciklussal összefüggő változást.

### Schumann-rezonanciatranziensek és felső légköri elektrooptikai emissziók

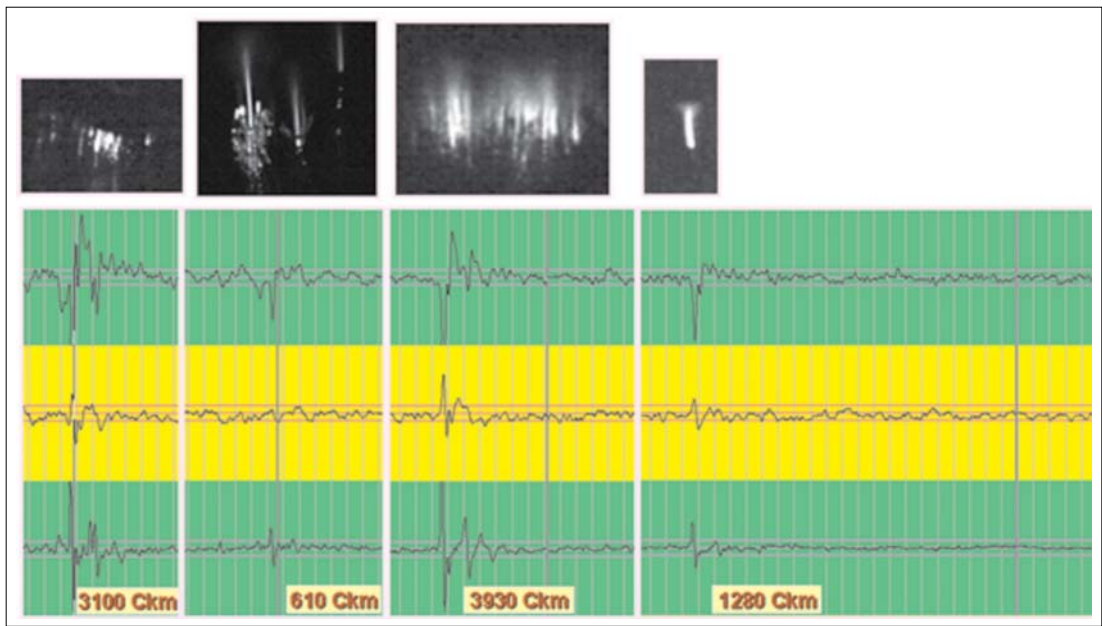
Az SR-tranziensek egyedi, energetikus villámok keltette elektromágneses impulzusok, amelyek koherens jelek formájában szuperponálódnak a vertikális elektromos és a két horizontális mágneses (É–D, K–Ny) térkomponens háttér SR-értékeire, ahogyan azt a 15. ábra mutatja.

Az SR-tranziensekből meghatározható a keltő villám polarizációja, földrajzi helye (beérkezés iránya és távolsága), valamint a töltésmomentum változása (15. ábra, alul). Az energetikus villámokat (néhány msec) számos esetben felső légköri elektrooptikai emissziók (FEOEM) is kísérik



**14. ábra** DFR ( $f_{\max} - f_{\min}$ )-ből levezetett zivatarforrás-átmérők változása 1993 és 2010 között az  $E_z$  térkomponens első két módusának frekvenciaértékei alapján, Nagyecenkén

**Figure 14** Variations of the diameter of the thunder source regions between 1993 and 2010 deduced from DFR ( $f_{\max} - f_{\min}$ ) values based on the frequency observations of the 1st and 2nd modes of the  $E_z$  field component



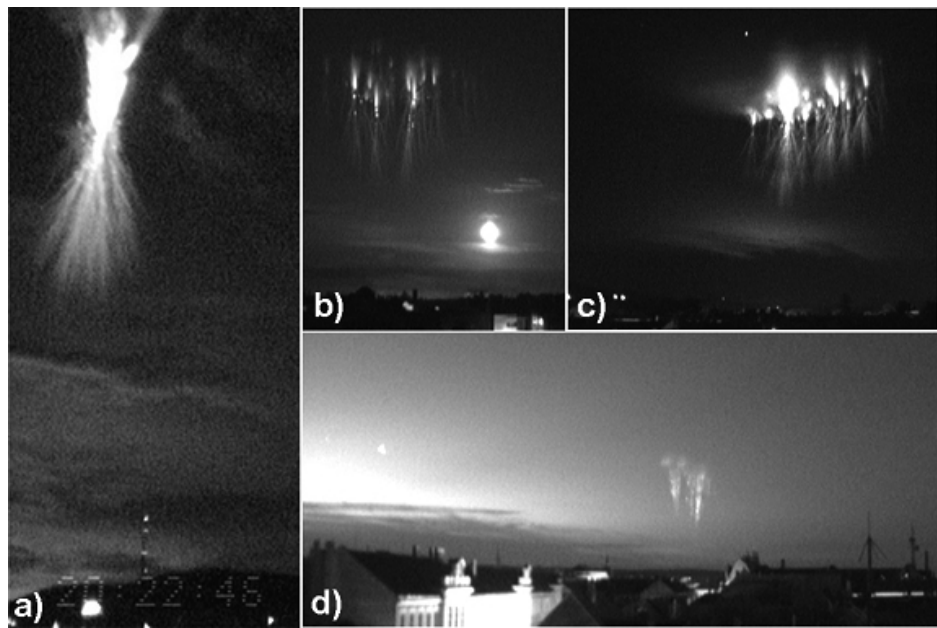
**15. ábra** Nagycenken regisztrált, energetikus villámok keltette SR-tranziensek a vertikális elektromos (legalul) és két horizontális mágneses térkomponensben a hozzájuk tartozó töltésmomentum-változások értékeivel, s e villámok felett megfigyelt felső légköri elektrooptikai emissziók: „vörös lidércek”

**Figure 15** SR transients with charge momentum changes (CMC) excited by individual energetic lightning strokes recorded at Nagycenk in the vertical electric and the two horizontal magnetic field components (below) and „red sprites” in the upper atmosphere related to these lightnings (photos)

(15. ábra, felül). A FEOEM-ek tudományos kutatása csupán a múlt század végén kezdődött el, amikor véletlenszerűen, egy kamera tesztelése során kaptak lencsevégre egy „vörös lidérc”-et (Franz et al. 1990). Ez a látványos felvillanás (~10 msec) óriási térrészt tölt ki, mintegy 40 km-től 90 km magasságig, 10–15 km horizontális kiterjedéssel, külön-

böző alakzatok formájában, s szinte kizárólag pozitív felhő-föld villámkisüléshez kapcsolódnak.

A FEOEM-ek megfigyelése Közép-Európa térsége felett elsőként Sopronban valósult meg az MTA CSFK GGI épületének a tetejéről (Bór 2011). E látványos jelenségből mutat be egy csokrot a 16. ábra.



**16. ábra** Sopronból, az MTA CSFK, GGI épületének tetejéről megfigyelt felső légköri elektrooptikai emissziók: „vörös lidércek”. A felvételeket Bór József és Barta Veronika készítette

**Figure 16** TLE-s (Transient Luminous Events): “red sprites” observed from the top of the building of the Geodetic and Geophysical Institute, Astronomical and Earth Science Research Centre, Hung. Acad. Sci. Picked up by József Bór and Veronika Barta

**Köszönetnyilvánítás**

A Schumann-rezonancia-mérőrendszer megépítése, fejlesztése, s az SR-adatokra épülő kutatások, valamint a felső légköri elektro-optikai észlelése a hazai (OTKA T4395, T023111, T034309, K72474; MŰI TP201, TP224) és nemzetközi (MAKA, NATO) kutatási alapok anyagi támogatásával valósult meg az elmúlt 20 év során.

**A tanulmány szerzői**

Sátori Gabriella, Bór József, Barta Veronika, Nagy Tamás, Kovács Károly

**Hivatkozások**

- Balser M., Wagner C. A., 1960: Observations of the Earth-ionosphere cavity resonances. *Nature (London)* 188, 638–641
- Bór J., 2011: Villámkisülésekhez társuló felsőlégköri elektro-optikai emissziók és Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálata, PhD-értekezés, NyME, Kitaibel Pál Doktori Iskola
- Christian H. J., Blakeslee R. J., Boccippio D. J., Boeck W. L., Buechler D. E., Driscoll K. T., Goodman S. J., Hall J. M., Koshak W. J., Mach D. M., Stewart M. F., 2003: Global frequency and distribution of lightning as observed from space by the Optical Transient Detector. *Journal of Geophysical Research* 108 (D1), 4005, doi: 10.1029/2002JD002347
- Franz R. C., Nemzek R. J., Winckler J. R., 1990: Television Image of a Large Upward Electrical Discharge Above a Thunderstorm System. *Science* 249, 48–51
- Melnikov A., Price C., Sátori G., Füllekrug M., 2004: Influence of solar terminator passages on Schumann resonance parameters. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* 66, 1187–1194
- Nickolaenko A. P., Rabinowicz L. M., 1995: Study of the annual changes of global lightning distribution and frequency variations of the first Schumann resonance mode. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 57, 1345–1348
- Polk C., 1982: Schumann Resonances. In: Hans Volland, Editor, *Handbook of Atmospherics*, Vol. I, CRC Press, Boca Raton Inc., FL, 111–179

- Sátori G., Szendrői J., Verő J., 1996: Monitoring Schumann resonances – I. Methodology. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 1475–1481
- Sátori G., 1996: Monitoring Schumann resonances – II. Daily and seasonal frequency variations. *Journal of Atmospheric and Terrestrial Physics* 58, 1483–1488
- Sátori G., Zieger B., 1996: Spectral characteristics of Schumann resonances observed in central Europe. *Journal of Geophysical Research* 101, 29663–29669
- Sátori G., Zieger B., 1999: El Niño-related meridional oscillation of global lightning activity. *Geophysical Research Letters* 26, 1365–1368
- Sátori G., Neska M., Williams E., Szendrői J., 2007b: Signatures of the non-uniform Earth-ionosphere cavity in high-time resolution Schumann resonance records. *Radio Science* 42/2, RS2S10, doi: 10.1029/2006RS003483
- Sátori G., Mushtak V., Williams E., 2009a: Schumann Resonance Signature of Global Lightning Activity. In: Betz H. D., Schumann U., Laroche P. (szerk.) *Lightning: Principles, Instruments and Applications: Review of Modern Lightning Research*. Berlin: Springer – Business Media B. V. (ISBN:9781402090783), 347–386
- Sátori G., Williams E., Lemperger I., 2009b: Variability of global lightning activity on the ENSO time scale. *Atmospheric Research* 91, 500–507
- Schumann W. O., 1952: Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. *Zeitschrift für Naturforschung, A*, 7, 6627–6628
- Sentman D. D., 1995: Schumann Resonances. In: *Handbook of Atmospheric Electrodynamics*, Vol. 1, Volland H. (szerk.), CRC Press, London, p. 276
- Verő J., 1972: On the determination of the magneto-telluric impedance tensor. *Acta Geodaetica, Geophysica et Montanistica Hungarica* 7, 333–351
- Williams E. R., 1992: The Schumann resonance: A global tropical thermometer. *Science* 256, 1184–1187



# Geomágneses indukció

ÁDÁM A., KIS Á., LEMPERGER I., NOVÁK A., PRÁCSER E.,  
SZARKA L., WESZTERGOM V.<sup>@</sup>

MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Geodéziai és Geofizikai Intézet, 9400 Sopron, Csatkai u. 6–8.  
<sup>@</sup>E-mail: wv@ggki.hu

A geomágneses tér napfizikai jelenségekkel összefüggő, rövid periódusú változásait összefoglalóan geomágneses aktivitásnak hívjuk. A Faraday-féle indukció törvénye alapján az időben változó geomágneses tér az elektromos vezetőnek tekinthető Földben áramokat indukál. Nagy geomágneses aktivitás, geomágneses viharok során az indukált elektromos tér olyan nagy lehet, hogy vezetékes információs és energiaátviteli rendszerek működését veszélyeztetheti. Az európai kritikus infrastruktúra geomágneses indukcióval kapcsolatos veszélyeztetettségének vizsgálata az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban egy átfogó európai kutatási projekt keretében folyik. A jelen tanulmány a geomágneses aktivitás statisztikai elemzésének eredményeit és az intézetben készült európai geomágneses indukciós modellt mutatja be.

## Ádám, A., Kis, Á., Lemperger, I., Novák, A., Prácser, E., Szarka, L., Wesztergom, V.: Geomagnetic induction

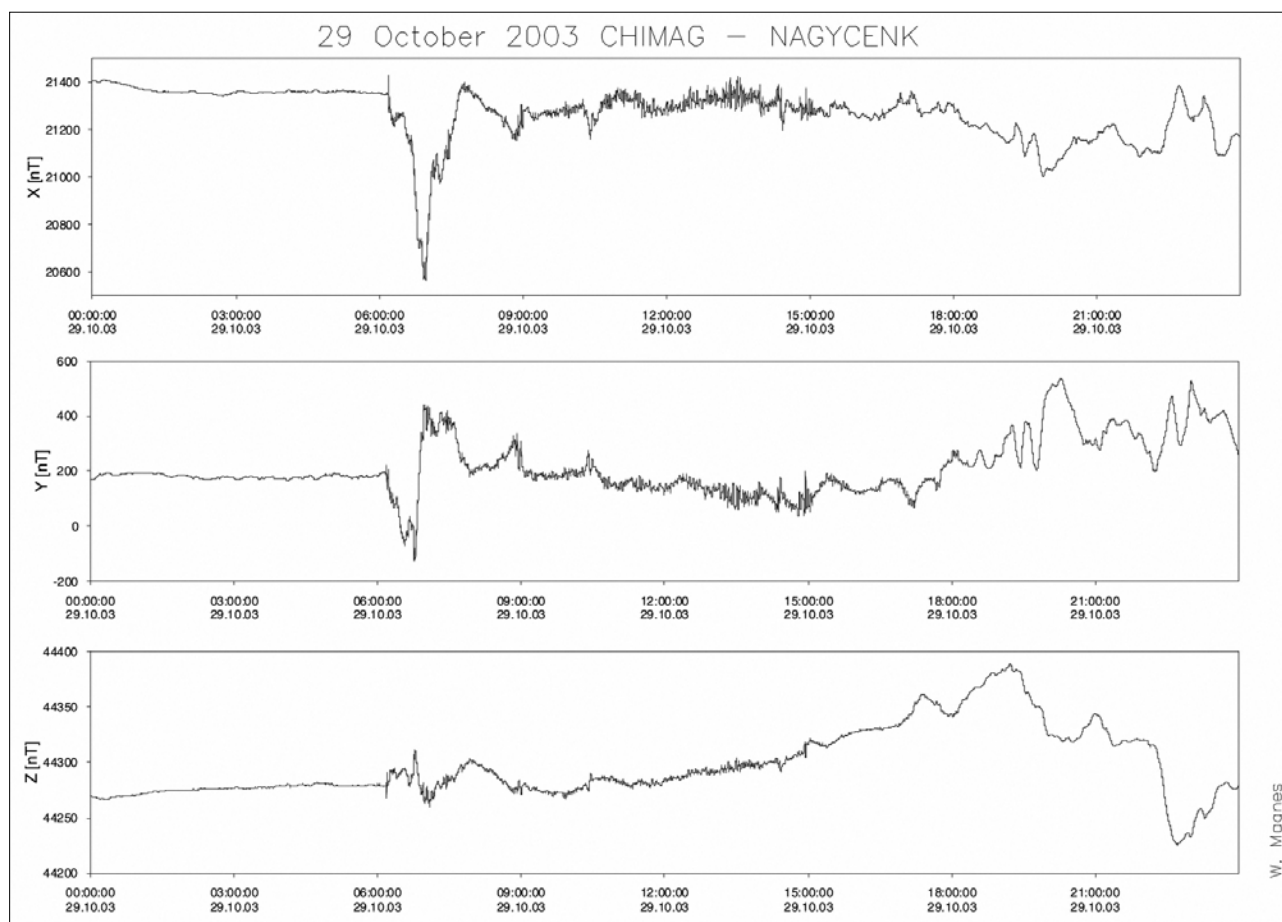
The term “geomagnetic activity” covers occurrence of short term variations of the geomagnetic field mainly due to solar wind – magnetosphere coupling. According to Faraday’s law of induction the time variation of geomagnetic field is associated with electric field of related amplitude and phase. Electric fields induced in the conductive Earth during intervals of high geomagnetic activity may cause harmful processes in the long conductors such as power transmission lines and telecommunication systems. Vulnerability of the so called critical infrastructure has been studied in the Research Centre for Astronomy and Earth Sciences, Hungarian Academy of Sciences, in the frame of a European research project. In this paper the results of statistical analysis of long term variation of geomagnetic activity and the geomagnetic induction model of the continental Europe are presented.

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

## Bevezetés

Az, hogy a napviharok, a geomágneses viharok, a sarki fény lenyűgöző optikai jelensége és a földfelszín távoli pontjai között fellépő nagy elektromos potenciálkülönbségek között kapcsolat van, már a Carrington-eseményként ismert rendkívüli napkitörést követően bizonyossággá vált. Az 1859. szeptember 1-én bekövetkezett flert követően a geomágnesség történetének legnagyobb mágneses viharával és a közepes geomágneses szélességeket is betöltő sarki fényvel egyidejűleg az akkorra már elég kiterjedt táviróhálózatban súlyos működési zavarok léptek fel. A technika történetének talán legnagyobb hatású napfizikai eredetű „balesete” 1989. március 13–14-én történt, amikor is egy geomágneses vihar során a kanadai Montrealban a Hydro Quebec erőmű meghibásodása következtében 9 órás teljes áramki maradás volt, ami legalább 6 millió embert érintett. Svéd-

országban ugyanakkor 6 különböző, 130 kV-os rendszerben lépett fel jelentős feszültségesés. Csővezetékek katódpotenciálja ugyancsak a fenti időszakban gyakran a kritikus érték fölé emelkedett jelentősen megnövelve a korróziós folyamatok kockázatát. Az előző napciklus maximumára (2003) esett az ún. Halloween-esemény (*1. ábra*), amikor Skandinávia egy része borult sötétségbe. Annak hátterében, hogy egy-egy nagyobb napvihar és az azt követő geomágneses aktivitás nemcsak érzékelhetővé, hanem egyfajta kockázati tényezővé is vált, a geomágneses indukció jelensége áll. Az időben változó geomágneses térhez az indukció törvénye alapján elektromos tér kapcsolódik, a véges vezetőképességű altalajban Ohm törvényének megfelelően az elektromos tér hatására földi áramok vagy más néven tellurikus áramok alakulnak ki. Ezek az indukált áramok kis elektromos ellenállású, információ- vagy energiaátviteli távvezetékbe, csővezetékekbe azok földelési pontjain keresztül jutnak be.



1. ábra Halloween-esemény (SSC kezdetű vihar, MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium, 2003. 10. 29.)

Figure 1 Halloween-event (magnetic storm with SSC, Széchenyi István Geophysical Observatory of the Hungarian Academy of Sciences, 29. 10. 2003.)

A geomágneses viharok persze nemcsak a vezetékes rendszerekre jelentenek kockázatot, hanem – a Föld plazmakörnyezetében fellépő zavart viszonyok miatt – a vezeték nélküli távközlésre, navigációs rendszerekre és más műholdas technológiákra is. A katasztrofális következményekkel járó eseményeket követően világszerte megnőtt az igény a geomágneses viharokkal szembeni kiszolgáltatottság mérséklésére. Az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpontban 2011-ben az európai kritikus infrastruktúra védelmét szolgáló EURISGIC (EUropean RISK on Geomagnetically Induced Currents) program keretében elkezdődött az európai litoszféralemez indukciós modelljének megalkotása és az obszervatóriumi tellurikus adatok átfogó elemzése.

### A geomágneses tér

Míg nehézségi erőtere minden tömeggel rendelkező testnek van, a mágneses tér kialakulásának, fennmaradásának speciális feltételei vannak. Mágneses terület tekintve még az ún. Föld típusú bolygók is elég nagy eltéréseket mutatnak. A Vénusznak egyáltalán nincs mágneses tere. Ennek oka az lehet, hogy forgása rendkívül lassú. Másik szomszéd-

dunknak, a Marsnak ugyan van, de az a Földéhez viszonyítva csekély, a mai mágneses tere vélhetően már csak a szilárd kőzetek maradék mágnesezettségéből ered, a gyenge mágneses terét a napszél egészen a bolygó felszínéig nyomja össze.

A Föld légkörének külső határfelülete ott van, ahol a földi mágneses tér nyomása egyensúlyt tart a napszél aktuális dinamikai nyomásával. Ezt az egyensúlyi felületet hívjuk magnetopauzának. A magnetopauza olyan felület, melyen töltött részecskék csak különleges folyamatok révén juthatnak át, így egyfajta „buborékba” zárja a Föld légkörét olyan magasságban, ahol azt már a gravitáció képtelen lenne megtartani. Az ionizált felső légkörnek ezt a tartományát hívjuk magnetoszférának.

Eredetét tekintve a Föld mágneses terét három összetevőre bonthatjuk:

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_f + \mathbf{B}_a + \mathbf{B}_v . \tag{1}$$

$\mathbf{B}_f$  az ún. fő tér. Átlagos értéke a felszínen 50 000 nT, az egyenlítőn ~25 000 nT, míg a pólusok környékén ~70 000 nT erősségű. Eredetének magyarázatai közül a földmagbéli öngerjesztő MHD dinamómodellek vannak leginkább összhangban a megfigyelésekkel.  $\mathbf{B}_f$  maga sem állandó, lassú változásai az évszázados vagy szekuláris vál-

tozások. A jelenlegi geomágneses tér legjelentősebb jelenkori változásait a tér nyugati driftje, a dipólmomentum csökkenése, a dipóltér  $E$ -i irányú eltolódása jellemzik. A földkéreg kőzeteibe befagyott paleomágneses tér vizsgálatából tudjuk, hogy a geomágneses tér polaritása rendszeresen időközönként (néhány százezer évente) átfordul.

A hidromágneses dinamo első közelítésben, mintegy 90%-ban egy  $8 \cdot 10^{22}$  A/m<sup>2</sup>-es mágneses dipóllal helyettesíthető, amelynek tengelye  $11,5^\circ$ -os szöget zár be a Föld forgástengelyével. A dipóltér meghatározásának hibája 0,1%, a nem dipól összetevőé 2% körül van. A dipól térerősség az Egyenlítőnél megközelítőleg 24 000 nT, a mágneses pólusoknál 66 000 nT.

**$B_a$ :** anomális tér. Kialakításában elsődleges szerepe van a ferromágneses anyagoknak és a velük összefüggő remanens mágnesezettségnek. Tekintve, hogy a földköpeny hőmérséklete a Curie-pont felett van, az anomáliák forrásai csak a kéreg, esetleg a felső köpeny lokális inhomogenitásai lehetnek.  $B_a$  maximálisan a  $B_f$  néhány százalékát teszi ki.

**$B_s$ :** a fő térre szuperponálódó külső eredetű változások tartoznak ide. A mágneses tér külső eredetű változásainak legfőbb energiaforrása a napszél kinetikus energiája. A napszél kinetikus energiája a magnetopauzánál felületegységre vetítve hozzávetőlegesen egymilliomod része az elektromágneses sugárzás révén érkező energiának (Walker 1998). Az a felület, amelyen át a napszél és a földi mágneses tér közötti energiaátadás történik, pontosan nem ismert, de bizonyosan sok nagyságrenddel nagyobb, mint az elektromágneses sugárzás révén történő energiaátadásnál számba vehető felület. A bejutó energia jelentős része Joule-hő formájában disszipálódik. A fennmaradó energia ionoszférikus áramrendszerek, valamint magnetohidrodinamikus (MHD) hullámok közvetítésével jut el a Föld felszínére, ennek következtében a felszíni eloszlása egyenetlen. Magasabb geomágneses szélességeken az energiasűrűség több nagyságrenddel meghaladja a közepes szélességeken tapasztalható.

A geomágneses tér kis amplitúdójú, közel harmonikus változásait pulzációknak nevezzük, a megerősödött napszéllel összefüggő igen intenzív változásokat pedig geomágneses viharoknak. (Ezeket kívül természetesen még számos más jelenséget – tranzienszt és harmonikust egyaránt – lehet elkülöníteni, de ezek a napszél és a mágneses tér közötti energiacsatolás szempontjából kevésbé érdekesek.)

A geomágneses viharok jellemző időtartama néhány óra, de előfordulnak több napig tartó viharok is. A Nap nyitott mágneses erővonalai mentén szinte fékeződés nélkül kiáramló gyors napszélnyalábok vagy napkitörés során kilökődő plazmafelhő és a magnetoszféra közötti energiaátadás eredményezi ezt az erőteljes háborgást. Ha a Földet plazmafelhő találja el, akkor a viharok jellegzetes impulzusszerű kezdete van (SSC) (*I. ábra*). A viharok intenzitását a napszél sebessége és az interplanetáris mágneses tér együttesen határozza meg. Amplitúdójuk közepes szélességeken néhány száz, a sarkifény-övezetben néhány ezer nT is lehet. Az egész Földön hasonló morfológiájú viharok ekvivalens áramrendszeréhez tartozik az Egyenlítő fölött a magnetoszférában kialakuló ún. gyűrűáram.

A Naptól érkező részecskeáramlásból a mágneses térbe történő energiabetáplálási folyamat az erővonal-összekapcsolódás. A napszél energiájának egy része (alig néhány százalék) a bolygóközi mágneses tér és a magnetoszféra erővonalainak összekapcsolódása révén részecskegyorsítással kerül be a magnetoszférába. Erővonal-összekapcsolódás csak akkor jöhet létre, ha a bolygóközi mágneses térnek van Dél felé mutató komponense. Ez az energiabetáplálás határozza meg a mágneses tér háborgatottságának mértékét, azaz az általános geomágneses aktivitást.

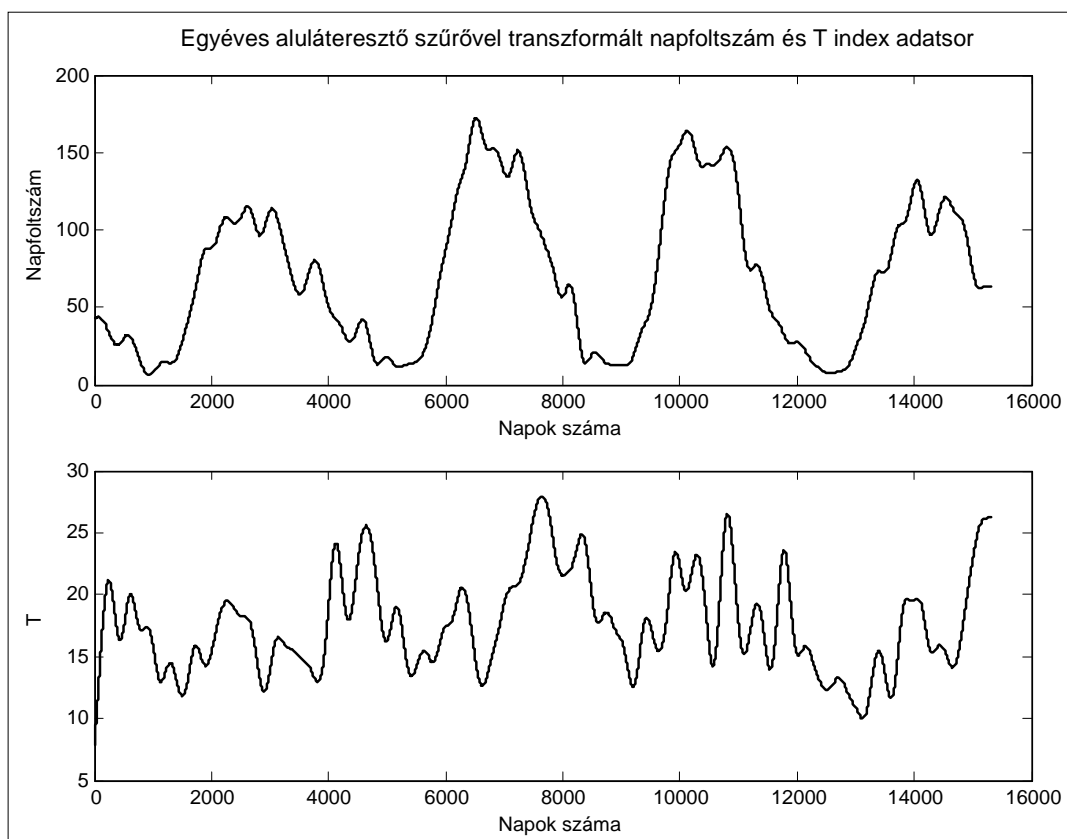
Ettől teljesen eltérő a pulzációk keletkezéséhez vezető energiabetáplálási folyamat. A geomágneses pulzációk meglehetősen széles spektrumú (1–0,001 Hz), ugyanakkor egymástól nagyon eltérő eredetű, többé-kevésbé szabályos, periodikus jelek. Szabályos szinuszos megjelenésük arra utal, hogy keletkezésük hátterében valamilyen rezonanciafolyamat áll. Közepes geomágneses szélességeken 20–30 s periódusú hullámok a leggyakoribbak. A változó amplitúdóval akár több órán keresztül is megfigyelhető folyamatos pulzációkat Pc-nek, az éjszaka jelentkező, 2–5 hullám alatt csillapodó, 1–150 s periódusú impulzív jeleket Pi-nek nevezzük.

A geomágneses tér változásait aktivitási indexekkel jellemezzük. Az aktivitási indexek közül a legismertebb az ún. K index (Bartels et al. 1939). Az MTA Széchenyi István Geofizikai Observatórium speciális aktivitási indexe a tellurikus regisztrátumból meghatározott T index. A geoelektromos vagy más néven tellurikus tér lényegében a geomágneses tér időderiváltja (Faraday-féle indukciós törvény alapján:  $\text{rot } \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B} / \partial t$ ), ezért a T index a geomágneses indexekhez képest inkább a nagyobb frekvenciás változásokra érzékeny. Itt a nagyobb frekvencia alatt az ULF tartományba eső pulzációkat kell érteni.

A földi áramok nagy időbeli felbontású mérése 1957-ben kezdődött az observatóriumban. A T indexet egy 0-tól 9-ig terjedő skálán 3 órás intervallumokban a legnagyobb és legkisebb elektromos térerősség különbsége alapján számítjuk. A skála lineáris, a lépésköz 1,8 mV/km. A T index értékeit 1957-től egészen a 90-es évek elejéig analóg regisztrátum alapján határozták meg (a regisztrálás sebessége 25 mm/óra), jelenleg ennek az egyedülállóan hosszú regisztrátumnak a digitalizálása folyik.

A háromórás intervallum megfelelő időbeli felbontást biztosít a geomágneses jelenségek teljes körének vizsgálatához.

A naptevékenység jól meghatározott, átlagosan 11 éves periódusa jellemző a geomágneses tér és ezzel együtt a Föld plazmakörnyezete háborgatottságára is, de a geomágneses aktivitás szélsőértékei más források, valamint az energiacsatolás feltételeinek változása miatt jelentősen eltérhetnek a naptevékenység alapján várhatótól. A geomágneses indexek a geomágneses aktivitás többlépcsős növekedését jelzik az utolsó száz évben. Ezen belül is kiemelten aktív időszaknak bizonyult a jelenlegi napciklusban az elmúlt három-négy év. Történeti adatokból tudjuk, hogy a naptevékenység és vele együtt a geomágneses aktivitás nemcsak a napcikluson belül, hanem hosszabb időtávon vizsgálva is jelentősen változott.



**2. ábra** | 1 éves aluláteresztő szűrővel transzformált napfoltszám és T index adatsor az 1957–2008 időszakra  
**Figure 2** | Transformed sunspot number and T index data series for 1957–2008 time period, using one year low pass filter

A geomágneses aktivitás több jellegzetességére derült fény már eddig is az indexek spektrális és statisztikai analízise során (2. ábra). A napszél és a magnetoszféra kölcsönhatását jellemző geomágneses aktivitás követi a napciklust, de befolyásolja azt a Föld Nap körüli pályája és a Nap tengely körüli forgása is. A jól ismert – koronalyukak visszatéréséből adódó –, ~27 napos periódus mellett egy 13,5 napos periódus is megfigyelhető. Az éves periódus a Föld pályájának a Nap forgástengelyéhez viszonyított szögeltéréséből adódik. A geomágneses aktivitás 11 éves periódusa a naptevékenységi ciklussal korrelál, de az aktivitásban 3 csúcs jelenik meg. Ezek közül a legnagyobb a naptevékenységmaximumot követő 2-3. évben tapasztalható.

### Az indukált áramok közelítő számítása

A gyakorlati magnetotellurikus (MT) kutatások során azzal a feltevéssel élünk, hogy a felszín elért EM hullámok (azaz a primer, ionoszférikus-magnetoszférikus eredetű ULF hullámok) síkhullámnak tekinthetők. Ez az egyszerűsítés abban az esetben fogadható el, ha a vizsgált térrész elég kicsi ahhoz, hogy a földfelszín görbületét elhanyagolhassuk, továbbá a primer források karakterisztikus mérete jóval meghaladja a vizsgált frekvenciatartományban adódó legnagyobb behatolási mélységet, illetőleg az azt jellemző ún. skinmélységet.

Egy tetszőleges féltér felszínén elektromos (**E**) és geomágneses (**H**) térerősségvektorok viszonyát a periódusfüggő, komplex impedanciatenzor (**Z**) írja le:

$$E_x(T) = Z_{xx}(T)H_x(T) + Z_{xy}(T)H_y(T), \quad (2)$$

$$E_y(T) = Z_{yx}(T)H_x(T) + Z_{yy}(T)H_y(T), \quad (3)$$

ahol  $T$  a periódusidő,  $Z_{ij}$  az impedanciatenzor komplex eleme.

Véges vezetőképességű homogén vagy a felszínnel párhuzamosan rétegzett féltér (1D szerkezet) esetén  $Z_{xy} = -Z_{yx}$ ,  $Z_{xx} = Z_{yy} = 0$ , így:

$$E_x(T) = Z_{xy}(T)H_y(T), \quad (4)$$

$$E_y(T) = Z_{yx}(T)H_x(T). \quad (5)$$

A **Z** impedanciatenzor lényegében a közeg válaszfüggvénye, amely az alábbi összefüggésben van a homogén féltérben értelmezett  $\rho_a$  látszólagos fajlagos ellenállással:

$$\rho_{xy} = 0,2 T (E_x/H_y)^2 = 0,2 T |Z_{xy}|^2, \quad (6)$$

$$\mathbf{E} \text{ [mV/km], } \mathbf{H} \text{ [nT], } T \text{ [s],}$$

a fázis pedig:

$$\varphi = \tan^{-1}(\text{Im } Z_{xy} / \text{Re } Z_{xy}). \quad (7)$$

2D szerkezetek kutatására jól alkalmazhatók a geomágneses mélyszondázásokból kapott indukciós vektorok, amennyiben ugyanis a felszín alatt kitüntetett iránnyal egy áramvonal jön létre, annak a felszínen vertikális mágneses tere jelenik meg. Ilyenkor a feltételezett síkhullám horizontális mágneses komponensei részben a vertikális komponensbe transzformálódnak:

$$H_z(T) = X_{zx}(T)H_x(T) + X_{zy}(T)H_y(T). \quad (8)$$

$X_{zx}$  és  $X_{zy}$  a periódusidőtől függő komplex mennyiségek, az ún. indukciós vektort pedig a

$$\mathbf{K} = (X_{zx}, X_{zy}) \quad (9)$$

összefüggéssel definiáljuk.

Amint ismert, két tetszőleges felszíni pont ( $A$  és  $B$ ) közötti elektromos potenciálkülönbséget az alábbi vonalintegrál adja:

$$U = \int_A^B E(s)ds. \quad (10)$$

A két végpontjában földelt áramvezetőben (amely lehet, pl. egy csővezeték vagy egy nagyfeszültségű távvezeték elektromos modellje) a potenciálkülönbség hatására áram folyik. Numerikus számítások és hosszú obszervatóriumi tellurikus adatsorok azt mutatják, hogy nyugodt és közepes tevékenység esetén a felszíni elektromos tér nagyságrendje általában  $10^{-3}$ – $10^{-2}$  V/km körül van. Az 1 V/km-t meghaladó amplitúdó nagy mágneses viharok során a sarkifény-régióban gyakori, de közepes geomágneses szélességeken nagyon ritka. Az 50 V/km amplitúdó a sarkifény-régióban is szélsőségesen nagynak tekinthető.

Az elektromos távvezetékek és az acélfalú csővezetékek jellemzően több száz km-es hosszával és 1  $\Omega$  körüli ellenállásával számolva a geomágneses indukció révén a vezetékben folyó indukált áram nagyobb viharok során a több száz A nagyságrendet is elérheti.

Csővezetékknél a földi áramok pedig csak ott tudnak a rendszerbe belépni, ahol a szigetelés megrongálódott, vagy mesterséges földelési helyek vannak, mint pl. szivattyúállomások esetében. A földelési helyeken – a váltakozó áramnak megfelelően – az áram hol a csővezetékbe a földbe, hol fordítva folyik, miközben az egyik félperiódusban a talajvízben disszociálódott  $H^+$ - és  $OH^-$  ionokból és a csővezeték anyagából (Fe) az anódon  $Fe(OH)_2$  és  $Fe(OH)_3$  (közönséges rozsda) képződik. A korróziós folyamat jelentősége a frekvencia növekedésével csökken, egyenáramoknál a legnagyobb. Kritikussá akkor válik, ha a periódusidő elég nagy ahhoz, hogy a fémionok migráció révén az anódtól úgy eltávolodjanak, hogy az áramirány megfordulásakor (következő félperiódusban) oda nem jutnak vissza. Átlagos talajvízzel, mint elektrolittal számolva 1 A egyenáram egy év alatt mintegy 10 kg vasat képes a csővezeték falából a földbe szállítani.

Az ULF tartományba ( $10^{-4}$  Hz  $< f < 10^{-1}$  Hz) eső indukált áramokat a villamosenergia-átvitelben alkalmazott 50–60 Hz-hez képest kvázi egyenáramoknak tekinthetjük. Az indukált áramok a háromfázisú transzformátorok földelési

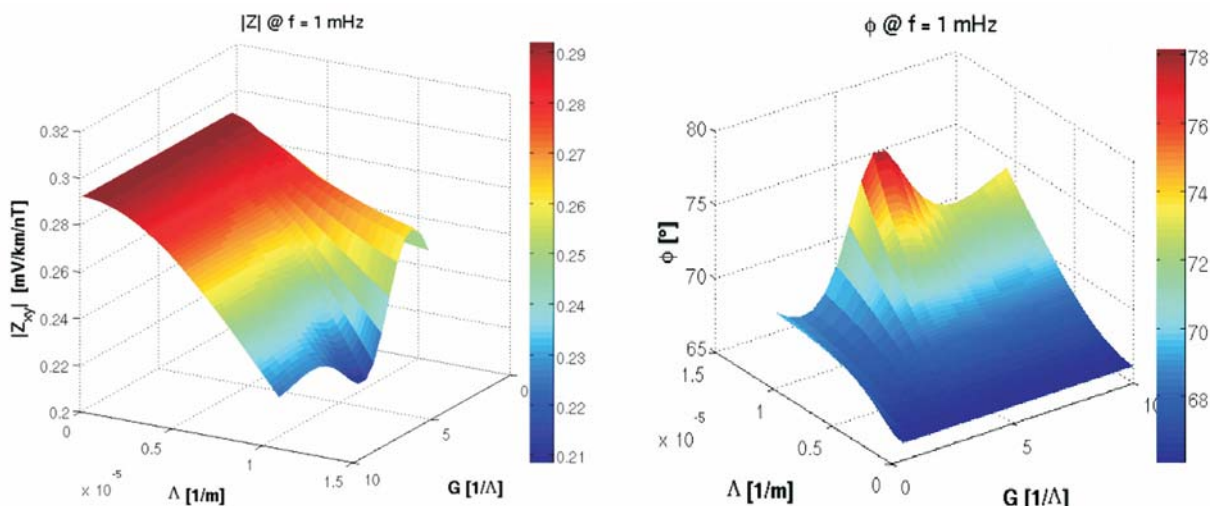
pontjain jutnak a rendszerbe és a transzformátorok részleges vagy teljes szaturációjához vezetnek. A részleges szaturáció miatt irányítástechnikai problémákat okozó felharmonikusok jelennek meg, szélsőséges esetben pedig a transzformátor túlfűtése annak teljes tönkremenetelét okozza. A felharmonikusok megjelenése elég gyakran megfigyelt jelenség, a transzformátorok leégése – mint pl. az 1989 évi kanadai eset – ritka, de rendkívül súlyos következményekkel járó esemény.

A magnetotellurikus 1D közelítés alapján végzett számítás kvalitatív becslést ad a geomágneses viharok által indukált áramok hatásának vizsgálatához, de a megfelelő műszaki védelem kialakításához, a tényleges veszélyhelyzetek előrejelzéséhez azonban egy komplex modellre van szükség. Az európai villamosenergia-hálózat magas integrált-ságú, sok pontban földelt rendszer, amely inkább hasonlít egy sűrű pókhálóra, mint lineáris áramvezetőre. Kiterjedése olyan nagy, hogy a Föld felszínének görbülete sem hanyagolható el. A geomágneses tér primer forrásainak sokfélesége (a sarkifény-elektrojtól a gyűrűáramig) elengedhetlenné teszi a primer források tényleges fizikai paramétereinek vizsgálatát. A magnetotellurikus tapasztalatok pedig azt mutatják, hogy az általaj elektromos paramétereinek horizontális és vertikális tagoltsága a helyi elektromos tereket olyan mértékben megváltoztatja, hogy számításokat csak az egész európai litoszféralemezre kiterjedő vezetőképesség modellen lehet végezni.

## A geomágneses tér (ULF tartomány) primer forrásainak vizsgálata

A felszín alatti rétegekben kialakuló indukált áramok intenzitását és fázisát (azaz a mágneses változásokhoz viszonyított időbeli eltolódását) – adott elektromágneses (EM) forrás esetén – elsősorban a közegelemek fajlagos elektromos ellenállása és azok mélység szerinti eloszlása határozza meg. A magnetotellurikus módszer esetében a felszíni térváltozásokat síkhullámnak tekintjük, és a regisztrátumok feldolgozását, illetve a közegmodell számítását ennek megfelelően végezzük (Tikhonov 1950, Cagniard 1953). Köztudott azonban, hogy az említett egyszerűsítő feltevés nem tekinthető általános érvényűnek, hiszen az egyenlítő környékén és a sarkifény-régiókban az egyenlítői és a sarki elektrojetek felszíni mágneses terei közelítőleg sem írhatóak le síkhullámként.

Az ULF tartományban, a felszíni mágneses térváltozások elsődleges forrásai az ionoszférában kialakuló áramrendszerek. Általános ionoszférikus forrás áramterekre meghatároztuk a felszíni indukáló és indukált tér, valamint az indukáló és a tellurikus tér viszonyát a forrás geometriai sajátosságait leíró paraméterek függvényében. A legfontosabb geometriai jellegű forrás paraméterek a következők: a kiterjedés (azimutális és meridionális), valamint az áram iránya és az áramtér horizontális változását meghatározó ún. forráshullámhossz. Fizikailag realiztikus forrásparaméter-tartományokban numerikus számításokkal meghatá-



**3. ábra** A felszíni totális mágneses térváltozás és tellurikus variáció viszonyát reprezentáló impedancia függvény modulusának és fázisának függvénye a forrás jellemző hullámhosszának reciproka ( $\Lambda$  a forrás hullámszámot jelöli) és a forrás kiterjedésének ( $G$ ) függvényében, 1 mHz-es frekvencián

**Figure 3** The function of the modulus and phase of the impedance tensor function represents the relation of the subsurface total magnetic field and the telluric variation in function of the characteristic wavelength ( $\Lambda$  is the source wavenumber) and the extension ( $G$ ) of the source at 1 mHz frequency

roztuk, hogy a felszíni mágneses és tellurikus változások viszonya hogyan változik rögzített felszín alatti fajlagos elektromos ellenállás-eloszlás mellett. A vizsgálat során a nagyeceni obszervatórium környezetében érvényes, korábbi publikációkból ismert (Ádám 1970) közegmodellt használtuk fel. Legfontosabb eredményeinket a 3. ábrán foglaljuk össze. A bemeneti EM impedanciát mint a felszíni mágneses és tellurikus variációk viszonyát a forrásparaméterek függvényében megjelenítve a következő megállapításokat tehetjük:

- Nagy forráshullámhossz esetén – ez a kvázisíkhullám feltevésnek felel meg – a felszíni mágneses és tellurikus változások amplitúdójának viszonya a forrás kiterjedésétől gyakorlatilag független, míg fáziskülönbségük szempontjából a forrás mérete meghatározó.
- A forrás hullámhosszának csökkenésével ( $\Lambda$  növekedésével) mind az amplitúdók viszonya, mind a felszíni mágneses és elektromos terek változásának fáziskülönbsége monoton csökken.
- Megállapítható továbbá, hogy kis forráshullámhosszak (nagy  $\Lambda$ ) esetén a forrás kiterjedése a térváltozások amplitúdójának arányát erősen befolyásolja.

A felszíni kváziszinuszos EM variációk ULF tartománybeli összetevőit eredményező ionoszférikus áramrendszerek, magnetoszférikus folyamatok révén alakulnak ki. E magnetohidrodinamikai jelenségek a magnetosféra és a napszél sokrétű energiacsatolásának eredményeként írhatók le, melyek a geomágneses erővonalak révén az ionoszférára vetülnek.

A Pc1–2 típusú pulzációk (periódus 1–15 s) mágneses erővonalak mentén terjedő – nem álló – MHD hullámok, ebben alapvetően különböznek hosszabb periódusú tár-

saiktól. A Pc3 típusú pulzációkon belül megkülönböztünk kompressziós és transzverzális eredetűeket. A kompressziós Pc3 hullám (15–45 s) az ún. upstream térségben lejátszódó hullám–részecske kölcsönhatás eredménye. A transzverzálisak keletkezésére kézenfekvő magyarázat az erővonal-rezonancia, ám gyakran mutatnak upstream sajátosságokat. Emiatt valószínűsíthető, hogy a két pulzációs módus esetenként ugyanannak az energiának két különböző úton való becsatolódása (Verő, Zieger 1994, Anderson 1994).

A tipikus Pc4 pulzáció (45–150 s) radiális irányban polarizált (poloidális) ULF hullám az egyenlítő szűk környezetében. Eredetüket tekintve valószínűleg 150 keV körüli protonok ún. ide-oda pattogó (bouncing) rezonanciája révén keletkeznek. Pc5-ös pulzációk (150–600 s) több különböző mechanizmus révén alakulhatnak ki: a magnetopauzán kialakuló ún. Kelvin–Helmholtz-instabilitás erővonalmenti becsatolódásaként, a magnetosféra mint üregrezonátor sajátrezgéseiként (Kivelson, Southwood 1986), vagy akár annak hullámvezető tulajdonságai révén (Walker 1998).

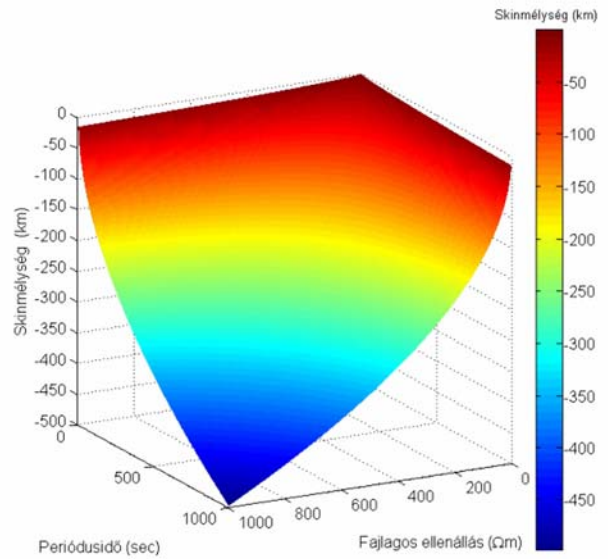
A pulzációk keletkezési mechanizmusairól, illetve azok napszélparaméterekkel és mágneses háborgatottsággal kimutatható kapcsolatáról McPherron (2005) adott részletes áttekintést.

Az említett MHD hullámforrások eredményeként terjedő perturbációk hatásai az erővonalak sajátos geometriája révén az ionoszférában áramokat keltenek, és kiterjedt – akár globális – áramrendszereket okoznak. Az indukciós vizsgálatok során az említett MHD folyamatok eredményeként kialakult ionoszférikus áramrendszerek mágneses térváltozásainak, illetve az általuk indukált tellurikus áramok tereinek eredőjét regisztráljuk.

### Az európai litoszféralemez geoelektromos modellje – EURHOM (European RHO Model)

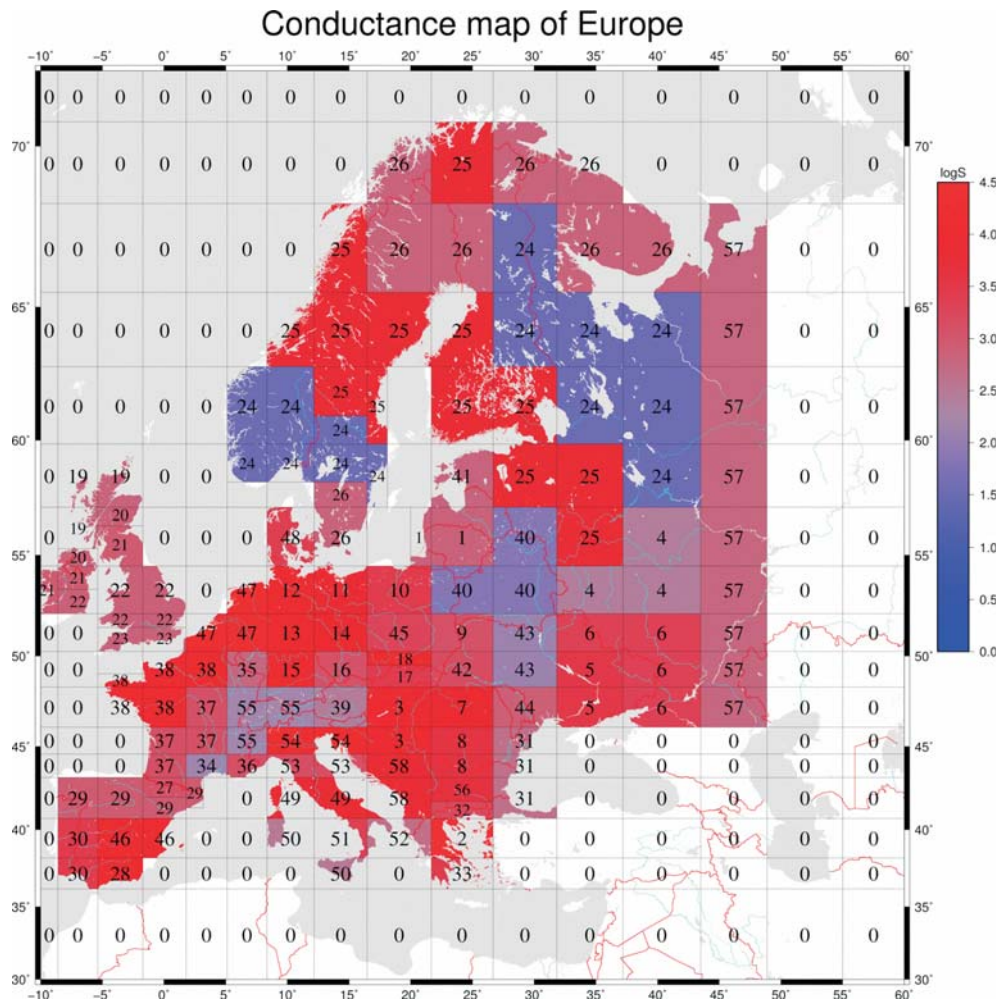
Az EURHOM lényegében egy olyan kvázi-háromdimenziós modell, amely különféle méretű cellákból épül fel, a cellákon belül pedig 1D struktúrát feltételez (Ádám et al. 2012).

A magnetotellurika alapösszefüggése szerint a helyi felszíni  $E$ -t a fajlagos elektromos ellenállás mélybeli eloszlása határozza meg. A kőzetek fajlagos elektromos ellenállása igen változó, azt leginkább a pórustérfogatot kitöltő elektrolit és a kőzet hőmérséklete határozza meg. A fajlagos elektromos ellenállás helyi változásai a potenciálkülönbség számításakor kiátlagolódnak, jelentős áramcsatornázást okoznak viszont a kétdimenziós (2D) felszín alatti elektromos vezetőképesség-inhomogenitások. A legjelentősebb jól vezető 2D vezetőképesség-anomáliák tektonikai zónákhoz kötődnek, de a modell horizontális felbontásának (grid) figyelemmel kell lennie a nagyobb hegyvonulatokra, kiterjedt üledékes medencékre, a domborzatra és természetesen a



4. ábra | Skinmélység (behatolási mélység) a periódusidő és a fajlagos elektromos ellenállás függvényében

Figure 4 | Skin-depth in function of the period and the apparent electrical resistivity



5. ábra | EURHOM – az európai litoszféralemez összegzett elektromos vezetőképessége (S-térképe) a felszíntől 160 km mélységig

Figure 5 | EURHOM – electric conductance [S] map of the European lithospheric plate for the upper 160 km

távvezeték-hálózat topológiájára is. A mélybeli vezetőképesség-anomáliák magnetotellurikus és geomágneses szondázásokból csak részben ismertek, ami további korlátot jelent a modell horizontális felbontására. A modell eltérő méretű celláit hosszúsági és szélességi körök választják el.

Arra vonatkozóan, hogy az egyes cellákon belül milyen mélységtartományt kell alkalmazni, támpontot ad az elektromágneses tér abszorpciójával (behatolási mélységgel) kapcsolatban álló skinmélység, amely annak a mélységnek felel meg, ahol az amplitúdó a felszíni érték e-ad részére csökken (4. ábra):

$$\delta = \sqrt{\rho T / \mu_0 \pi}, \quad (11)$$

ahol  $\mu_0$  a mágneses permeabilitás (közelítőleg  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Vs/Am).

Az 50–200 km mélységtartományban változó litoszférasztenoszféra határfelületen a fajlagos ellenállás 1  $\Omega$ m-re vagy az alá csökken (Ádám, Wesztergom 2001). Az ULF tartományban ez olyan jelentős abszorpciót jelent, amely a nagyobb mélységben feltételezett elektromos ellenállás-változásokat a modellben érdektelenné teszi. A litoszférán belül legalább az üledéket és a kristályos aljzatot el kell választani, így az egyes cellákat minimum háromréteges, 1D-s szerkezet tölti ki.

Az EURHOM cellái is láthatók a modell alapján számított összegzett elektromos vezetőképesség-térképen (5. ábra). A modell digitális formában az alábbi helyről letölthető: <http://real.mtak.hu/2957>.

### Köszönetnyilvánítás

A kutatások az Európai Közösség FP7-es keretprogram (FP7/2007-2013) 260330 számú projektje (EURISGIC) támogatásával valósultak meg.



### A tanulmány szerzői

Ádám Antal, Kis Árpád, Lemperger István, Novák Attila, Prácsér Ernő, Szarka László, Wesztergom Viktor

### Hivatkozások

- Ádám A., 1970: A földi elektromágneses tér szerepe a Föld belső szerkezetének kutatásában. MTA X. Osztályának Közleményei 4, 385–416
- Ádám A., Wesztergom V., 2001: An attempt to map the depth of the electrical asthenosphere by deep magnetotelluric measurements in the Pannonian Basin (Hungary). Acta Geol. Hung. 44, 167–192
- Ádám A., Prácsér E., Wesztergom V., 2012: Estimation of the electric resistivity distribution (EURHOM) in the European lithosphere in the frame of the EURISGIC WP2 project. Acta Geod., Geoph. Hung. 47/4, 377–387
- Anderson B. J., 1994: An overview of spacecraft observations of 10 s to 600 s period magnetic pulsations in the Earth's magnetosphere. AGU Monograph 81, 25–43
- Bartels J., Heck N. H., Johnston H. F., 1939: The three-hour-range index measuring geomagnetic activity. Terrestrial magnetism and atmospheric electricity 44, 411–454
- Cagniard L., 1953: Basic theory of the magnetotelluric method of geophysical prospecting. Geophysics 18, 605–635
- Kivelson M. G., Southwood D. J., 1986: Coupling of global magnetospheric MHD eigenmodes to field line resonances. JGR 91, 4345–4351
- McPherron R. L., 2005: Magnetic pulsations: Their sources and relation to solar wind and geomagnetic activity. Survey in Geophys. 26, 545–592
- Tikhonov A. N., 1950: Determination of electrical characteristics of the deep strata of the Earth's crust. Dokl. Akad. Nauk. USSR 73, 293–297
- Verő J., Zieger B., 1994: Upstream waves and field line resonances – pulsation research at the Nagycenk Observatory during three solar cycles. AGU Monograph 81, 55–66
- Walker A. D. M., 1998: Excitation of magnetohydrodynamic cavities in the magnetosphere. Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics 60, 1279–1293



# Kövesligethy Radó (1862–1934)

HÁGEN A.<sup>1</sup>, JALOVECZKI J.<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Újvárosi Általános Iskola, Baja, E-mail: hagen13@freemail.hu

<sup>2</sup>Szent László ÁMK, Baja, E-mail: jalo@freemail.hu

*Beérkezett:* 2012. július 25.; *elfogadva:* 2012. november 20.

Százötven évvel ezelőtt, 1862. szeptember 1-én az itáliai Veronában – amely ekkor még a Habsburg Birodalomhoz tartozott – született a magyar tudomány egyik jeles képviselője, Kövesligethy Radó, Konek Józsefnek, a monarchia katonatisztjének és Renz Josephine-nek gyermekeként Konek Rudolf néven (Balázs L. et al. 2008, Szabados L. 2011). A kis Rudolf mindössze 4 éves volt, amikor apját hazavezényelték Magyarországra. Miután apja elhagyta őket, Radó és édesanyja 1866-ban Veronából Altenstadba, majd hat év múlva már Pozsonyba költözött, ahol édesanya házasságot kötött Kövesligethy Károly ügyvéddel. Rudolf a gimnáziumot már Pozsonyban végezte el a mostohaapjától kapott Kövesligethy néven. Fiatalon több nyelvet is elsajátított: gyermekként német anyanyelvén kívül olaszul és magyarul beszélt, az iskolában a latint, görögöt, franciát, az egyetemen az angolt tanult, majd idős korában oroszul is megtanult.

A Kövesligethy család egyszer meglátogatta a Konkoly-Thege Miklós vezette ógyallai csillagvizsgálót, ezt követően az érdeklődő ifjú Konkoly-Tege mellett dolgozott szünidőben.

A bécsi Tudományegyetemen (1881–1884) az első három évben a korabeli tudományos élet kiválóságai tanították, többek között a matematikus Leo Königsberger, a geometria professzora, Emil Weyr, az elméleti fizika professzora, Josef Stefan. A klasszikus csillagászatot Theodor Oppolzer-nél, az egyetemi csillagvizsgálóban asztrofizikát pedig Edmund Weissnél tanult. Ebben a környezetben Kövesligethy elméleti tudása gyorsan gyarapodott. A modern csil-

lagászatot és az égi mechanikát egyaránt kitűnően megismerte. Doktori disszertációjának címe: „Egy matematikai spektrálanalízisre alapozott elméleti asztrofizika alapjai”.

Értekezésében azt a célt tűzte maga elé, hogy elméleti úton levezesse a sugárzó testek színképeinek jellegzetességeit, az általa levezetett képlet magában foglalja a Wien-féle eltolódási törvényt is. Ezzel a kérdéssel később több mint 15 éven át foglalkozott. Utóbb ezt az elméletét továbbfejlesztve megkísérelte a csillagok hőmérsékletének meghatározását (1890) és a világon először kapott reális értékeket az alacsony hőfokú csillagok felszíni hőmérsékletére.

1883 őszén Konkoly-Thege az ógyallai magánobszervatóriumában alkalmazta fizetett obszervátorként. Itt egy spektrálfotométert is szerkesztett, és elsőként használta fel a csillagok radiális sebességének mérését a Nap térbeli mozgásának meghatározására.

1885-ben részt vett a Podmanicz-

ky Géza báró (1839–1923) által Kiskartalon létesített magán csillagvizsgáló berendezésében. A fiatal Kövesligethy a bárónak és feleségének előadásokat tartott csillagászatból, mígnem „... a grófnő már augusztus 23-dikán észlelte a ködön azt a változást egy 90 milliméter nyílású üstökös-kere-sővel, s azt vette észre, hogy a köd közepén fényes sárgás-vörös csillag támadt...”. Ez később az Andromeda extragalaxis szupernóvájának bizonyult, de felfedezését a tudományos világ Erst Hartwignak tulajdonítja (Zsoldos E. 2001).

1889-ben 28 évesen a Budapesti Tudományegyetemen (az ELTE elődje) lett magántanár. 1894-ben a kozmográfia vezető tanára, 1897-től a Kozmográfia Tanszéken már nyil-



**Kövesligethy Radó (1862–1934)**

vános rendkívüli tanár, majd 1904-től nyilvános rendes tanár egészen nyugdíjba vonulásáig, közel harminc éven át (Balázs L. 1998). 1906-ben saját igazgatásával megalakította az egyetem Földrenghési Számoló Intézetét és a Földrenghési Obszervatóriumot (Balázs L. 1998), 1911-ben pedig az egyetem Kozmográfiai Intézetét.

1895-ben a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagjává választották, 1909-ben pedig rendes tagjává. Ebben az időben már földrenghéskutatással foglalkozott, akadémiai székhelye is e témakörben íródott. Élete végéig a földrenghések előrejelzésének lehetőségeit kutatta. Munkája elismerésül a Nemzetközi Szeizmológiai Társaság (AIS) titkárává választotta.

Az első világháború után 1919. augusztus 23-án az Akadémia közgyűlésén Pekár Gyula indítványozta, hogy az összes osztály állítson fel egy bizottságot, amelyek kivizsgálják az Akadémiai tagjainak viselkedését a Tanácsköztársaság idején. Az ülés jegyzőkönyvében Kövesligethy terhére azt rótták fel, hogy a Tanácsköztársaság idején elfogadta a középiskolai tanárképző intézet vezetését (Vargha D.-né, Balázs L. 2006). A gyűlést követően Kövesligethy Radót törölték az akadémikusok sorából.

Az akadémiai elmarasztalás mellett a Budapesti Tudományegyetem is foglalkozott Kövesligethy Tanácsköztársaság idején folytatott tevékenységével. Az egyetem vádjai nagyjából azonosak voltak az Akadémia vádjával, vagyis a tanítóképzői igazgatói állás, továbbá Kármán Tódor ajánlása az elhunyt Eötvös Lóránd helyére. Hosszú bürokratikus huzavona után végül 1924-ig nem taníthatott.

Különösen súlyosan érintette, hogy egyetemi Földrenghési Obszervatórium hálózatának egy része elveszett (akárcsak Eötvös terepi ingái), anyagi keretei pedig ugyancsak összezsugorodtak. Csak az 1930-as évek elején sikerült komolyabban újjászervezni az Intézetet.

Wodetzky József nekrológia szerint Kövesligethy 1932-ben vonult nyugállományba. A halál 1934. október 11-én 72 évesen érte utol Budapesten.

A Szent István Akadémia matematikai osztályának elnöke, a Magyar Filozófiai Társulatnak, Természettudományi Társulatnak élete végéig választmányi tagja, a Matematikai és Fizikai Társulat főtitkára volt.

## A geofizikus – a földrenghéskutató

Kövesligethy 1887-ben Eötvös Lóránd (1848–1919) javaslatára kinevezték a Királyi Tudomány Egyetem Kísérleti Fizika Tanszékének tanársegédjévé. Ekkoriban kezdett Eötvös kísérletezni a gravitációs mérésekkel, amelyek eredményeként 1890-ben megalkotta a róla elnevezett, nagy érzékenyséű torziómérleget (Eötvös-ingát). E munkájában nagy segítséget jelentett számára a fáradhatatlan szorgalmú és kitűnő matematikai felkészültségű Kövesligethy Radó. Szinte kezdettől fogva részt vett az Eötvös-inga próbáin és annak első, nagyszabású terepi alkalmazásán, a Vas megyei Ság-hegyi mérésekben. Ez utóbbi gyakorlati kivitelezése szinte teljesen Kövesligethy feladata volt.

A gravitációs mérések alapján dolgozta ki Kövesligethy az „oroid” fogalmát, amely alatt a hegytömegek befolyását értette a gravitációs nívófelületre. Foglalkozott a Hold ár-ápolhatásával a Föld szilárd kérgére. Kimutatta, hogy a nagy földrenghések hatással vannak a Föld pólusingadozásaira. Ezt a kapcsolatot a kéreg tömegátrendeződésével magyarázta.

Az 1890-es évek közepétől Kövesligethy Radó figyelme a szeizmológia elmélete és gyakorlata felé fordult. 1895-ben olaszországi tanulmányútja idején alaposan megismerte a szeizmológia műszereit és módszereit, az akkori elméleti kutatások eredményeit.

A földrenghések vizsgálata a XIX. sz. végéig tapasztalati alapon történt. Magyarországon 1881-től a Magyar Földrajzi Társulat, illetve a Magyar Királyi Földtani Intézet keretében foglalkoztak rendszeresen a földrenghések adatainak gyűjtésével és feldolgozásával. Kövesligethy megpróbálta a földrenghési adatokat – amelyeket tapasztalati alapon dolgoztak fel – egzakt fizikai alapokon, matematikailag leírható formában kifejezni.

Már 1895-ben elméletileg kidolgozta a földrenghéshullámok terjedését a Föld belsejében. A hosszú és részletes matematikai apparátus a gyakorlatban nehezen volt kezelhető, ezért később egyszerűsítette a számolás menetét. („Neue geometrische Theorie der seismischen Erscheinungen”, Mathematische und Naturwissenschaftliche Berichte aus Ungarn, Vol. 12, 1895.) Az elmélet lehetővé tette, hogy a műszeres adatok alapján a földrenghések kipattanásának helyét és mélységét (epi- és hypocentrumát) számításokkal meghatározzák. Kövesligethy volt az első, aki elméleti matematikai alapokra helyezte a földrenghésekkel kapcsolatos számításokat.

A számítások céljaira fontos volt a szubjektív, érzékelésen alapuló, 10 vagy 12 fokozatú földrenghés-erősségi skála (a Mercalli-skála) átalakítása olyan objektívebb értékekre (a lökés okozta gyorsulásra) épülő skálára, amely mérhető fizikai jelenségen alapszik. Az olasz Adolfo Cancani (1856–1904) már észrevette, hogy az egyes skálafokokhoz rendelhető gyorsulásértékek mértani haladványt alkotnak. Kövesligethy alapos elemzéssel egy egyenletet állított fel, amellyel a Mercalli-fokok átszámíthatók voltak gyorsulási értékekre. Ezt a fontos képletet szerényen „Cancani-formulá”-nak nevezte el, bár helyesebb lenne „Kövesligethy-féle összefüggés”-nek nevezni. (Seismischen Stärkgrade und Intensität der Beben, Gerland's Beiträge zur Geophysik, Ergänzungsband Vol. 1, 1902.)

A szeizmológia elméleti megalapozását Kövesligethy két gyakorlati probléma megoldására kívánta felhasználni. Egyrészt élete végéig foglalkozott a földrenghések előrejelzésének kérdésével. Sok földrenghési adat analíziséből módszert keresett a földrenghések bekövetkeztének jóslására. Amikor 1909-ben a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagjává választották, erről a kérdéstről tartotta székhelyét. A probléma megoldásának lehetőségére rámutott, de a gyakorlatban a módszer nem volt alkalmazható. A másik kérdés, amely sokat foglalkoztatta, a Föld belső tömegeloszlásának és központi sűrűségének meghatározása a föld-

rengéshullámok terjedésének vizsgálatából. Ezt a kutatását azonban már nem tudta lezárni. Gazdag szeizmológiai tapasztalatait és ismereteit egy latin nyelvű könyvben foglalta össze („Seismonomia”, Modena, 1906; később megjelent olasz nyelven is). Kutatásaiba egyetemi hallgatókat és tanítványait is bevonta. Az 1910-es években Kövesligethy körül egy „magyar szeizmológiai iskola” alakult ki, amely világszerte elismert eredményeket ért el.

A gyakorlati földrengéskutatás előmozdítására – állami támogatással, a Kozmográfiai Intézet keretében – megalakult az egyetemi Földrengéskutató Intézet (1904), majd a Földrengési Számolóintézet. Sikertült Magyarországon egy akkor korszerű szeizmográfokkal felszerelt földrengésjelző állomáshálózatot kiépíteni. Ekkor már nemzetközi szaktekintély volt. Amikor 1905-ben megalakult a Nemzetközi Szeizmológiai Szövetség, Kövesligethy Radót választották meg az „állandó bizottság” főtítkárává. Erre a feladatra jó szervezőképessége és széles körű nyelvtudása is alkalmassá tette.

A Szeizmológiai Szövetség munkájában 1909-ben már 19 ország vett részt. Az első világháborúig (1914) négy nemzetközi konferenciát tartottak Kövesligethy szervezésével. A Szövetség állandó bizottságának központja Strasbourgban volt, de a számolóintézetet Budapestre helyezték. Az első világháború alatt a Szövetség feloszlott, munkáját 1922-től az International Union of Geodesy and Geophysics szeizmológiai szekciója vette át, de ennek alakulólésére a vesztes országok képviselőit már nem hívták meg.

## Epilógus

Kövesligethy csillagászatban szerzett érdemei elismerésül Sárnecky Krisztián róla nevezett el egy 2005. április 2-án felfedezett, a naprendszeri fő kisbolygóöv belső részén mozgó, 3,57 éves keringési idejű, megközelítőleg 1–2 km-es kisbolygót.

A csillagászat után figyelmét a geofizikának, pontosabban a szeizmológiának szentelte, ahol elévülhetetlen érdemeket szerzett a földrengések tanulmányozásában.

Kövesligethyről a legfrappánsabbat egykori tanítványa, Réthly Antal írt: „... kitűnő előadó volt. Roppant népszerű volt tanítványai körében, valamint játszi könnyedséggel oldotta meg a legbonyolultabbnak tűnő problémákat is. ... Számára olyan kérdés nem létezett, amelyre nem tudott ki-elégítő választ adni.”

Kövesligethy kutatási eredményeit figyelembe véve a magyar csillagászat és geofizika is sokat köszönhet neki, és érdemei vannak a tudományos ismeretterjesztés, sőt még az irodalom terén is. Sokoldalú, nagy tudású kutató volt, méltó kortársa még Eötvös Lorándnak is. Mégis, sokáig nem került az őt megillető helyre még a hazai köztudatban sem. Ezért kívántunk itt a *Magyar Geofizika* oldalain is megemlékezni róla, tisztelni emléke előtt annak ellenére, hogy ma már sok, a jelenleginél részletesebb megemlékezés, illetve életrajz érhető el róla a különböző folyóiratokban, illetőleg a világhálón.

## A tanulmány szerzői

Hágen András, Jaloveczki József

## Hivatkozások

- Balázs L., 2008: A kvantumelmélet Ógyallán született? *Természet Világa* 2008/6.
- Balázs L., Vargha M., Zsoldos E., 2008: Radó Kövesligethy's spectroscopic work. *Journal of Astronomical History and Heritage* 11/2, 124–133
- Kosztolányi Dezső, 1925: Kövesligethy Radó. *Pesti Hírlap*, 1925. május 24.
- Réthly A., 1963: In memoriam Kövesligethy 1862–1934. *Annales Universitatis Scientiarum Budapestiensis de Rolando Eötvös Nominatae, Sectio Geologica* 6, 5–9
- Szabados L. (szerk.), 2011: Kövesligethy Radó és az aztrofizika kezdetei. *Konkoly Observatory, Budapest*, 182 p.
- Varga Domokosné, Balázs Lajos, 2006: Kövesligethy Radó tetem-rehívásáról. *Magyar Tudomány* 12
- Wodetzky József, 1935: *Astronomische Nachrichten* 255
- Zsoldos Endre, 2002: Kövesligethy Radó, Jókai Mór és az Androméda-köd. *Aetas* 17, 205–210

## Kövesligethy-emléknap

A Magyar Tudományos Akadémia szeizmológiai obszervatóriuma Kövesligethy Radó születésének 150. évfordulója alkalmából a nagyhírű asztrofizikus, geofizikus tudós nevét vette fel. A 2012. október 17-én megrendezett emléknapon az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont kezdeményezésére – az MTA Fizikai Tudományok Osztálya és Földtudományok Osztálya közös szervezésében – az MTA Székházában Kövesligethy szakmai munkásságát bemutató emlékülésre került sor. A rendkívül érdekes előadások anyagát a *Magyar Tudomány* folyóirat rövidesen közli.

Az előadóülés után az obszervatóriumban tartott névadó ünnepségen Pálincás József, az MTA elnöke és Ábrahám Péter, az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont főigazgatója leplezte le az obszervatórium új névtábláját. Pálincás József beszédében méltatta a tudós munkásságát, és bemutatta a Nemzeti Szeizmológiai Hálózat

fejlesztésének eredményeit. A névadón megszólalt Bakondi György altábornagy, az Országos Katasztrófavédelmi Főigazgatóság vezetője, valamint Hamvas István, a Paksi Atomerőmű Zrt. vezérigazgatója. Mindketten hangsúlyozták, hogy a kellő földrengésbiztonságot a korszerű szeizmológiai állomáshálózat és az akadémiai tudományos háttér együtt szolgálja eredményesen.

Ábrahám Péter főigazgató úgy véli, hogy Kövesligethy személye az újonnan alakult Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont szimbolikus alakja, olyan nemzetközi hírű tudós, aki a csillagászat és a földtudományok terén is maradandót alkotott. Elmondta, hogy a Kutatóközpont a magas színvonalú kutatások mellett számos közfeladatot lát el, ezek sorában pedig kiemelt helye van a szeizmológiai szolgáltatásnak.

Závoti Józseffel, az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézet igazgatójával együtt megemlékeztek Egyed



Balról jobbra: Ábrahám Péter, Pálincás József, Bakondi György, Hamvas István az MTA Kövesligethy Radó Szeizmológiai Obszervatórium névadóján

Lászóról, az obszervatórium alapítójáról is. Kövesligethy Radó és Egyed László közös emléktábláján koszorút helyeztek el.

Az eseményt széles körű sajtóérdeklődés kísérte. Az obszervatórium munkatársai bemutatták a szeizmológiai szolgálat munkáját, és egy sor olyan háttéranyagot, ismereteket adtak át, amelyet egy-egy szeizmikus esemény kapcsán a

média felhasználhat. Ennek különös aktualitást ad, ami a 2009. évi l'aquilai földrengés „felelőseinek” keresésével Olaszországban történik. A tudósok és a média közös feladata, hogy sem tudatlanságból, sem valamiféle érdekből ne lehessen a társadalmat megtéveszteni.

*Wesztergom Viktor*



Závoti József és Ábrahám Péter koszorút helyez el Kövesligethy Radó és Egyed László közös emléktábláján

## Kántás Károlyra emlékezünk

A Kossuth-díjas Kántás Károly akadémikus születésének 100. évfordulója alkalmából 2012. december 1-én az MTA Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Geodéziai és Geofizikai Intézetben, Sopronban emléktábla-avatására és megemlékezésre került sor. Az emléktábla leleplezésénél *Ádám Antal* mint egykori kolléga a tudós szakmai életútját mutatta be, *Szarka László* pedig az MTA vezetése nevében Kántás Károly máig ható szellemi örökségét méltatta. Az emléktáblánál koszorút helyezett el a GGI, a Miskol-

ci Egyetem, a Nyugat-magyarországi Egyetem, a Kőolajipari Múzeum, a Magyar Geofizikusok Egyesülete és a Kántás család. Az emléktábla-avatást követő baráti beszélgetésen az egykori kollégák és tanítványok visszaemlékezéseiből Kántás Károly emberi arca, példás erkölcsi tartása és az 1956 utáni emigráció évtizedekben is fennmaradt kollegialitása tárult fel.

*Wesztergom Viktor*



Kántás Károly emléktáblája az MTA CSFK GGI homlokzatán (fotó: Szendrői Judit)



Emléktábla-avatás és koszorúzás az MTA CSFK Geodéziai és Geofizikai Intézetben (fotó: Szendrői Judit)

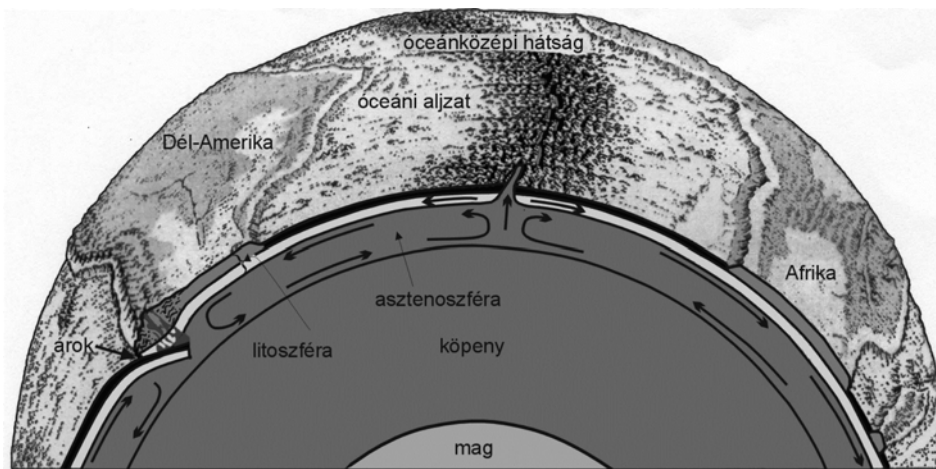
## 100 éves a kontinensvándorlás és 50 éves a lemeztektonika elmélete

A Magyar Tudomány Ünnepe alkalmából ünnepi előadótülésre került sor 2012. november 7-én az MTA székházában, az MTA X. Osztály rendezésében.

Mint azt *Horváth Ferenc* egyetemi tanár, a tudományos előadótülés szervezője a rendezvény címében és nyitóelőadásában megfogalmazta, a kontinensvándorlás elméletének megszületése valóban a földtudományok kopernikuszi fordulata volt. Alfred Wegenernek (1880–1930) sikerült egy olyan dinamikus modellt felállítania a kontinensekre vonatkozólag, amelyben számos, korábban megmagyarázhatatlan vagy félremagyarázott földtudományi jelenség értelmezhetővé vált. Ez a radikálisan új modell akkor vált általánosan elfogadottá, amikor az kiegészült az óceáni aljzat mozgását bizonyító tengeri geofizikai kutatások eredményeivel és megszületett az egységes lemeztektonikai elmélet.

Az elmélet jelentőségét kellően demonstrálta a program sokszínűsége és a rendkívül nagy érdeklődés is. A szakma neves hazai személyiségei tartottak előadásokat a földképeny termikus konvekciójáról, az ún. földmotorról, a Föld mélyszerkezetének elektromágneses geofizikai kutatásáról, a paleomágnesség, a bauxitképződés, a paleo-biogeográfia, vulkanizmus, paleokörnyezeti hatások és a lemeztektonika összefüggéseiről, valamint a Pannon-medence geodinamikai folyamatainak rekonstrukciójáról és modellezéséről. Az előadások egy része az MTA Földtudományok Osztálya, ill. az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék honlapján elérhető ([http://mta.hu/x\\_osztaly\\_cikkei/eloadasok\\_tara\\_25611](http://mta.hu/x_osztaly_cikkei/eloadasok_tara_25611)), <http://geophysics.elte.hu/wegener/>.

*Wesztergom Viktor*



Új földmodell a lemeztektonikai elmélet szerint (Horváth F. 2012)

## P. Fülöp József, S.J. 1932–2010

### Emlékezés egy különös sorsú évfolyamtársamra

Fülöp József 1932. június 23-án született Szombathelyen. Elemi és középiskoláit is ott végezte. Középiskolai tanulmányait a Szt. Norbert premontrei gimnáziumban kezdte, amelyet 1948-ban államosítottak, így 1950-ben már a Nagy Lajos gimnáziumban (ez lett az új neve) érettségizett. Ugyanabban az évben felvették az egyetemre, Miskolcon a bányászati karra. De tanulmányait csak a következő évben kezdte el a Földmérő Mérnöki Karon Sopronban. Ez az 1951-es évfolyam volt Magyarországon az első, amelynél a mérnöki szaktanulmányi idejét fölemelték öt évre. Így 1956-ban végezte geofizikus mérnökként. Ugyanebben az évben a folyamatos honvédelmi ismeretek tantárgy és a nyári táborok révén, valamint az 56-os tiszti képző után eleget tett a kötelező katonai szolgálatnak is.

Jagodits Ferenc, egykori gimnáziumi osztálytárs, egyetemi évfolyamtárs és későbbi munkatárs, így emlékszik vissza ezekre az évekre:

„Emlékszem, együtt tanultunk az első matematikavizsgákra Jóskaéknál a karácsonyi szünetben. Ő mindig nagyon sokat tanult, az iskolai eredményei kiválóak voltak, és a tanuláshoz való szorgalma végig kísérte egész életét. Két évig tanultunk földmérőnek, ám ekkor mindketten úgy döntöttünk, hogy kipróbálunk valami más, izgalmasabb és rejtélyesebb tudományt, a geofizikát. A geofizikaprofesszorunk a földmérők és geofizikusok közti különbséget viccesen abban határozta meg, hogy a földmérő gyalogol munka közben, a geofizikust meg autóval viszik dolgozni.”

Az 1956-os események következményeként decemberben elhagyta az országot, és a soproni egyetem egy részlegével Torontóba ment. A körülbelül 150 menekült mérnök-hallgató diákot a kanadai Mining Association támogatta a torontói egyetemmel közösen. 1964-ben a Mining Engineering fakultáson a Geological Engineering szakon újra végzett (BSc). Ezután egy évig dolgozott a Gulf Olaj Vállalatnál, majd 1965–67 között a waterlooi egyetem Civil Engineering fakultásán megszerezte a MSc fokozatot (Soil Mechanics Option).

„Torontóba 1957-ben egy fagyos éjszakán érkeztünk meg. A következő négy hónapot angol tanulással töltöttük, amiben Jóska szintén remekelt. Ezután folytatta tanulmányait és 1964-ben átvehette geológus mérnöki diplomáját. ... Mivel a felszíni geofizika elbűvölte, tanulmányait foly-

tatva 1967-ben mesterdiplomát szerzett talajmechanikai szakirányon.”

1967–71 között a Huntce-Kenting vállalatnál mint project geofizikus dolgozott. 1971–79 között ún. „freelance” konzultáns geofizikus volt, s a világ különböző országaiban vett részt geofizikai kutatásokban.

„Ekkoriban életünk megint közös szálon futott, hiszen ugyan annál a cégnél dolgoztunk, és számos közös projektünk volt Kanadában, illetve számos más országban. Mesélt nekem guayanai újtárról, amikor bauxit után kutatva szeizmikus méréseket végeztek. ... A hadsereg biztositotta munkájukat egész nap ... A munka befejezése után Jóska sok érdekes emlékekkel és tapasztalattal biztonságban hazatért, sőt egy üveg igazi guayanai rumot is hozott, amit együtt fogyasztottunk el beszámolója hallgatása közben...

Jóska mérnöknek és tudósnek is kiemelkedő volt, különböző klimatikus és földrajzi környezetben dolgozott, ismerte az összes geofizikai eljárást, és ezt alapos geológiai tudás támasztotta alá.”

1979. január 25-én belépett a jezsuita rend magyar noviciátusába Torontóban. Szerzetesi fogadalmához szükséges filozófiai tanulmányait New Yorkban végezte

a Fordham Egyetemen, míg a teológiai tanulmányokat a torontói Regis College-ban.

1983. november 19-én pappá szentelték. 1984-ben Montreálban volt kiegészítő lelkész, és 1985-től 2000. nov. 21-ig a hamiltoni Szt. István Magyar templom plébánosaként szolgált.

„Abba a kitüntetett helyzetbe kerültünk, hogy »saját« szerzetesünk lett. József atya keresztelte meg unokáinkat, támogatta betegséggel küzdő családtagjainkat és temette el elhunyt szeretteinket.”

2000-ben vírusos agyvelőgyulladásra kapott, három hónapos intenzív kórházi kezelés után Torontóba került az Árpád-házi Szent Erzsébet plébánia jezsuita közösségébe. Ott halt meg 2010. augusztus 15-én, életének 78. évében. Hamvait a courtlandi temetőben helyezték örök nyugalomra.

„József atya kiváló szerzetes, a Soproni Csoport szeretett tagja, nagy tudású természettudós, geofizikus és felfedező volt. Szép és teljes életet élt.”

Nyugodjék békében!

*Gerzson István*  
geofizikus mérnök (Sopron 1956)



**P. Fülöp József, S.J.**  
1932–2010



# Dr. Fabiáncsics László, aranyokleveles geofizikus mérnök 1934–2012

Dr. Fabiáncsics László életének 78. évében 2012. május 8-án elhunyt. Utolsó útjára 2012. június 20-án kísértük. A család, a barátok, tisztelők búcsúja után, most szeretnénk felidézni munkás és küzdelmes életét.

Dr. Fabiáncsics László aranyokleveles geofizikus mérnök 1934-ben született. Középiskolai tanulmányai befejezéseként 1952-ben érettségizett Pécsen a Nagy Lajos Gimnáziumban. 1952-ben kezdte meg egyetemi tanulmányait Sopronban. A vidám, konfliktusokat nem nélkülöző diákeveket követően 1957-ben a Bányamérnöki Kar Földmérő tagozatán okleveles geofizikus mérnökként végzett.

Fabiáncsics László életének és munkájának áttekintése nagyon szép és izgalmas feladat.

A hazai földtani-geofizikai kutatás az ötvenes években nagyon intenzív fejlődésnek indult. A hagyományos fúrási tevékenységhez kapcsolódva a szilárd nyersanyagkutatásban is egyre nagyobb szerepet nyertek a mélyfúrás-geofizikai módszerek. A hagyományos réteghatár kijelölés mellett a mélyfúrás-geofizikai szelvényeket sikeresen alkalmazták a szénkéminőségi és kőzetmechanikai paramétereinek meghatározásában. Bonyolult tektonikájú területeken nagy előrelépés volt az orientált rétegdőlés mérésének bevezetése. Az új eljárások bevezetésében és alkalmazásában komoly szerepe volt Fabiáncsics Lászlónak a liász, eocén és miocén szénmedencék kutatásánál.

A geofizikai módszerek sok új területen is új lehetőségeket nyújtottak. A bányageofizikai és az agrogeofizikai módszerek területén több kezdeményezése volt.

A hetvenes években már érzékelhető volt a hazai kutatási és fúrási tevékenység csökkenése. Az új kihívásnak megfelelően több éven át dolgozott külföldön (Mongólia, Szíria, Libanon, Algéria, Jugoszlávia).

A nyolcvanas-kilencvenes években a szénbányászati feladatok csökkenése az építőanyag-bányászat (homok, kavics, mészkő, bazalt) és a környezetvédelem területén biztosított számára új feladatot.

1957-ben első munkahelye a Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézetben (ELGI) volt. Munkáját a komlói kihelyezett csoportnál észlelőként kezdte. A csoport a szénkutató fúrások mélyfúrás-geofizikai vizsgálatával foglalkozott. A rossz magmintavételi lehetőségek miatt

fontos volt az oldalfal-mintavétel és a radioaktív izotóppal történő sűrűségmérés. 1958-ban az újonnan alakult miskolci csoport vezetésére kapott megbízást. A csoport három műszerkocsival az ózdi és salgótarjáni szénmedencében dolgozott. 1962. január 1-től csoportvezetőként került vissza Komlóra.

1963-ban a mongóliai vízkutató expedíció felszíni geoelektromos csoportjában végzett mélyfúrás-geofizikai vizsgálatokat.

1964-ben új feladatot kap. Az ELGI-ből terv szerint leválasztásra kerülnek a mélyfúrás-geofizikai terepi csoportok, amelyek a jövőben az Országos Kutató és Fúró Vállalat (OFKFBV) keretében végzik tevékenységüket. Ennek előkészítésére Fabiáncsics László osztályvezetőként kapott megbízást. 1965–67 között már az OFKFBV-nél dolgozik osztályvezetőként. 1968-ban újra mongóliai feladatot vállal. 1968–71 között a magyar–mongol érckutató expedíció tagja, Jantsky Béla expedícióvezető helyettese. További feladata az expedíció munkájához tartozó felszíni geoelektromos mérések elvégzése.

1971-ben újra itthon van, az OFKFBV vezető geofizikusaként elsősorban fejlesztői munkát végez.

1972–75 között Libanonban és Szíriában dolgozik, a Vízkutató Fúrasi Expedíció felszíni vízkutató geofizikai részlegét irányítja. Szakértőként geoelektromos és rádiófrekvenciás módszerrel végzett vízkutatást és kőszókutatást. Libanon, az irigyelt ország, ezalatt vált a polgárháború áldozatává, így vált az ő munkája egyre veszélyesebbé. Különösen érdekes feladata volt Bejrút vízellátásának keretében a rosszul szabályozott víztermelés miatt bekövetkező sós vízbeáramlás kimutatása. Az 1975–79 időszakban ismét itthon van, az OFKFBV vezető geofizikusaként a műszaki fejlesztéseket irányítja. 1978–79 között Algériában végez felszíni geoelektromos méréseket, agyagkutatási feladat keretében.

1978-ban műszaki egyetemi doktorrá avatják. Értekezését az eocén programhoz kapcsolódó mélyfúrás-geofizikai vizsgálatokról írta.

1981-től Ipari Minisztérium szakértőjeként bányageofizikai feladatok megoldásán dolgozik. Kérésére 1984-ben áthelyezték a Központi Bányászati Fejlesztési Intézetbe (KBFI).



Dr. Fabiáncsics László  
1934–2012

Az Ipari Minisztériumban és a KBFI-nél több nagy ívű koncepció kidolgozásában vesz részt. Ezekben a felszíni és mélyfúrás-geofizikai módszerek lehetőségeivel foglalkoznak a szilárd ásványbányászat, szilárd nyersanyag-hasznosítás, bányageofizika területein. Vizsgálataik elsődlegesen a kőszén, bauxit és vegyes ásványok területére terjednek ki. Dorogon a fiteállékonyág geoelektromos vizsgálatával foglalkozik. Recskén a rézkoncentráció meghatározására bányabeli fúrásokban végeznek gamma–gamma méréseket.

1980-ban egy rövidebb munka erejéig ismét Mongóliába találjuk. A korábban megkutatott wolframhányó vízellátásának megoldására folytatnak kutatásokat.

1984-ben újra Libanonban dolgozik, völgyhidak, bevágások geoelektromos vizsgálatában vesz részt. Érdekes feladata volt egy jugoszláviai bánya vízbetörésének geofizikai vizsgálata. Ezt a Miskolci Egyetem Geofizikai Tanszékével közösen végezték.

AKBFI-ben több munkatársával „Komplex agrogeofizikai mérőműszer és mérési eljárás” címmel szabadalmat dolgozott ki, amelyet a gödi szövetkezetben alkalmaztak. A berendezéssel a talaj geoelektromos ellenállását és dielektromos állandóját, természetes gamma-sugárzását vizsgálhatják. Ezek mellett neutron–gamma és a gamma–gamma mérésekre is lehetőség van.

1986-ban megváltik a KBFI-től, s geológiai és bányászati szakértőként folytatja érdekes és változatos tevékenységét. Elsősorban kavics- és homokbányákkal foglalkozik, kavicsbányák felelős műszaki vezetője. 1989–2002 között már egyéni vállalkozó. Az Agronatura Bt., Meran 97 Kft. munkáját irányítja, többek között bányagödrök feltöltését végzik.

1993-ban egy csernobili geofizikai kutatást próbál előkészíteni. Az agrogeofizikai szabadalomra alapozott műszerrel végeztek kísérleti méréseket.

Nagy kalandja a szobi kerekhegyi mészkőhányó, amely a kor változásai miatt nem a legszerencsésebb vállalkozásként zárult.

1994-ben nyugdíjas lesz, de továbbra is aktívan dolgozik. Munkáját a több mint 100 jelentés, szakvélemény, kutatási terv mellett a *Magyar Geofizika* ban és a *Bányászati Lapok* ban ismertette. A szilárd ásványkutató mélyfúrás geofizikájáról egyetemi jegyzetet készített. A szénbányászatban és az ércbányászatban alkalmazható geofizikai módszerekről a *Bányai Szakirodalmi Tájékoztató* ban két könyv szerkesztését végezte. A szilárd ásványbányászattal kapcsolatos geofizikai információk rendszereivel kapcsolatban a KBFI adta ki munkáját.

Eredményes munkájáért 1960-ban a Földtani Kutatás Kiváló Dolgozója kitüntetésben részesült, megkapta a Bányászati Szolgálati Érdemérem bronz, ezüst és arany fokozatát. Mongóliai tevékenységét is kitüntetésekkel ismerték el.

1996-ban kezdődött betegsége. Ekkor távolították el jobb veséjét. Ezt követte még több operáció és a kezelések hosszú sorozata. Betegségét hihetetlen élni akarással, türelemmel, erővel élte meg. Az utolsó küzdelemben mindez kevés volt. 2012. május 8-án egy régi kollégánk, ismerősünk, barátunk végleg eltávozott közülünk.

Sokszor felvetődik a kérdés, mi is örzi egy kutató ember emlékét?

A kutatások eredménye nemcsak megvalósult bányákban, vizet adó kutakban, mérnöki létesítményekben, a helyreállított környezetben marad meg, hanem ismereteink bővülésében is. Ehhez járult hozzá Fabiáncsics László kollégánk is. Munkásságának eredményei ott vannak hazánk, Mongólia, Szíria, Libanon földtani-geofizikai ismereteiben, környezetvédelmi és vízkutatói eredményeiben.

Ha nevünk, emlékünk apró porszemként el is tűnik utódaink előtt, tudnunk kell, munkánk, eredményeink mindig részét képezi a múltnak, segítik a jelent, biztosítják a jövőt.

2012. nov. 15.

Az anyag összeállításában közreműködött:  
*Baráth István, Bucsi Szabó László, Hursán László,  
 Mészárosné Jelinek Beáta, Papp Jenő, Szalay István,  
 Zsadányi Éva*

## Rendezvénynaptár

2013. február		
2013. febr. 20.	Új Utak 2013 – földtudományi előadóiülés: (tárgysorozat később)	MFGI előadóterem, Budapest, Stefánia út
2013. március		
2013. márc. 4–7.	DGG – 73. Jahrestagung der Deutschen Geophysikalischen Gesellschaft (www.dgg-2013.de)	Lipese, Németország
2013. márc. 17–20.	4th EAGE Passive Seismic Workshop (www.eage.org)	Amsterdam, Hollandia
2013. márc. 20.	Új Utak 2013 – földtudományi előadóiülés: (tárgysorozat később)	MFGI előadóterem, Budapest, Stefánia út
2013. márc. 25–29.	Tyumen 2013 – „New geotechnology for the old oil provinces” (www.eage.org)	Tyumen, Oroszország
2013. április		
2013. ápr. 7–12.	EGU General Assembly – AZ EGU évi közgyűlése (www.egu2013.eu)	Bécs, Ausztria
2013. ápr. 22–26.	Engineering Geophysics 2013 konferencia és kiállítás	Gelendzsik, Oroszország
2013. ápr. 25–28.	4th International Geosciences Student Conference, Természettudományi Múzeum (www.IGSC-2013.com)	Berlin, Németország
2013. május		
2013. máj. 13–16.	Geoinformatics 2013 – 12. Nemzetközi Konferencia	Kiev, Ukrajna
2013. máj. 15–17.	IGC 2013 – 9. Nemzetközi Geotermikus Konferencia (www.geothermiekonferenz.de)	Freiburg, Németország
2013. június		
2013. jún. 10–13.	75th EAGE Conference & Exhibition incorporating SPE EUROPEC 2013 Az EAGE éves kongresszusa és műszerkiállítása (www.eage.org)	London, Nagy-Britannia
2013. szeptember		
2013. szept. 8–12.	Near Surface Geoscience 2013 (www.eage.org)	Bochum, Németország
2013. október		
2013. okt. 7–10.	BGS2013 – a Balkán Geofizikai Egyesület 7. kongresszusa (www.eage.org; mailto: eage@eage.org)	Tirana, Albánia

További részletek, referenciák a honlapról (<http://www.mageof.hu>) érhetők el.

Kakas Kristóf



Kövesligethy Radó (1862–1934)



Az ógyallai obszervatórium 1880 körül



A kiskartali obszervatórium 1890 körül