Geoelektromágnesség és a változó Föld

A pályázatban megfogalmazott cél a földi elektromágneses tér különböző periódusú változásainak vizsgálata volt különös figyelemmel az elektromágneses tevékenység és paraméterek trendszerű hosszabb idő alatt bekövetkező megváltozásaira. Ez utóbbiak kapcsolatban állnak a Földnek és környezetének globális változásaival, amint erre a jelen beszámolóban számos helyen utalás történik. A kutatások kiinduló anyaga az esetek legnagyobb részében a Magyar Tudományos Akadémia Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumában (a továbbiakban nagycenki obszervatórium) illetve az Eötvös Lóránd Geofizikai Intézet Tihanyi Obszervatóriumában folyó mérések eredménye. Ezek fejlődéséről az alábbi A1 és C9 pontban számolunk be. Az adatok hozzáférhetőségét a D12 pont ismerteti. A többi téma kivétel nélkül vagy ezeknek az obszervatóriumi adatoknak vagy külön terepi méréseknek (D10, D11, illetve bizonyos értelemben B6) eredményeire épül. Természetesen, ahol erre szükség mutatkozott, más mérési helyekről, obszervatóriumokból illetve mérési hálózatokból nyert adatokat is felhasználtunk (pl.: SEGMA A1, A4 ill. B5 és B6)

A jelentésben ismertetett kutatások nemzetközi fogadtatását is mutatja, hogy az IAGA (Nemzetközi Geomágneses és Aeronómiai Asszociáció) négy évenként megtartandó nagy rendezvényét 2009-ben Sopron rendezheti meg.

A) Űrklíma és űridőjárás

A1. Geomágneses térváltozások megfigyelése és értelmezése, ELF-VLF jelek monitorozása

A Föld környezetének obszervatóriumi megfigyelése és az űreszközökön végzett mérések az elmúlt években számos összefüggést tártak fel a naptevékenység és a Föld körüli plazma állapotának rövid és hosszú periódusú változása között. A rövid periódusú változások és hatásai az űridőjárás, a hosszú periódusú változások az űrklíma fogalmába tartoznak. Mind több jel utal arra, hogy a naptevékenység, a geomágneses aktivitás és a földi globális változások között szoros kapcsolat van. Kérdés, hogy nagyperiódusú, de energetikailag viszonylag kis változások milyen mechanizmusok révén erősödnek fel.

A napszél-magnetoszféra energiacsatolás mechanizmusának, a magnetoszféra szerkezetének és folyamatainak megismerésében nemzetközileg is kiemelt szerepe van a nagycenki obszervatórium széles spektrumú elektromágneses méréseinek. A számos tekintetben egyedülálló (közel öt napciklust átfogó) ULF, ELF, VLF adatok lehetőséget adnak a Nap-Föld energiacsatolás hosszú periódusú változásainak vizsgálatára is.

Az OTKA pályázat keretében végzett munkánk középpontjában a geofizikai obszervatóriumi mérések, adatfeldolgozási eljárások továbbfejlesztése, valamint az obszervatórium számos tekintetben páratlanul értékes idősorainak elemzése állt.

A mágneses mérések terén folytatódtak a korábbi műszerfejlesztések. A fluxgate variométerek meglehetősen nagy (átlagosan 10nT/év) bázisvonal-ingadozása miatt a mágneses méréseket egy ún. DIDD vektor-magnetométerrel egészítettük ki. A MAGSON magnetométer átalakításával készült fluxgate teodolit (DMI-2) és a korábbi DI-flux (DMI-1) összehasonlítása azt mutatja, hogy a DMI-2 alapján számolt bázisok szórása kisebb, így ezt tekintjük az abszolút mérések standard műszerének. Az INTRMAGNET GIN és a WDC mellett folyamatos adatszolgáltatást biztosítottunk az OERSTED program és az ebro-i geomágneses adatközpont felé is.

A mágneses tér mérését és a különböző nemzetközi programokba irányuló adatszolgáltatást öt független variométer-rendszerre építettük. A legnagyobb időbeli felbontást (64Hz) biztosító CHIMAG rendszert a SEGMA hálózatban használjuk bázis meghatározása nélkül. A INTERMAGNET programban a napi adatszolgáltatást (automatikus email útján) a DRXX rendszer biztosítja XYZ elrendezésben, 10s mintavétellel. A hálózat több mint száz állomása közül a legmegbízhatóbb adatszolgáltatók szűk csoportjába tartozunk, adatvesztés pl. az egész 2008-as évben nem történt. Az ARGOS rendszer (HDZ elrendezés, 10s mintavétel) bázisának változását hosszú ideje ismerjük, így erre a rendszerre tudjuk a tárgyévi báziskorrekciót a legnagyobb megbízhatósággal elvégezni. Ez az oka annak, hogy a WDC és az INTERMAGNET végleges (definitive) adatait az ARGOS rendszerből számoljuk. A DR02 rendszer (3 komponensű PSM magnetométer és 2 tellurikus csatorna) mind az áram, mind a számítógépes hálózattól függetlenítve van. A DIDD vektormagnetométer 1s mintavétellel az intézeti adatbázisokat szolgálja ki (F,D,I, illetve ezekből számolt térkomponensek, aktivitási mértékek), de a mágneses tér másodpercenként mért skálaértéke lehetőséget ad az elfogadott bázisok folyamatos ellenőrzésére is.

A South European Magnetometer Array (SEGMA) hálózatban végzett mérések (16Hz mintavétellel, háromtengelyű fluxgate magnetométerrel) szintén folyamatosak.

A SEGMA mérések alapján tanulmány készült az obszervatóriumokban az ULF tartományba eső mesterséges eredetű zavarok szintjének mértékéről és változásairól.

A korábban (2003-ban) kezdett folyamatos ELF-VLF sávú whistler-mérések fő célja a whistlerek keletkezésének és terjedésének tanulmányozása, de lehetőség nyílt a plazmaszféra elektronsűrűségének folyamatos meghatározására, a whistler-ductok és az erővonal-rezonanciák együttes vizsgálatára, de más légköri elektromos jelenségek (spherics-ek) tanulmányozására is. A whistler-mérések folyamatosságát biztosítottuk. A események kiválogatása az ELTE Űrkutató Csoportja által kifejlesztett automatikus whistler-detektorral történik. A folyamatos whistler-mérések lehetőséget adnak a whistlerek időbeli eloszlásának meghatározására. 2 év összegzett adatai alapján májustól októberig a whistlerek gyakorisága egy nagyságrenddel kisebb a téli maximumnál. Különösen érdekes a geomágneses aktivitás és a whistlerek eloszlásának összehasonlítása.

Az ELF/VLF mérőrendszerhez új előerősítő és feldolgozó program készült. A rendszer átalakításával (egy másik hangfrekvenciás csatorna) révén lehetővé vált az ún. trimpi effektus folyamatos megfigyelése. Az elmúlt egy-másfél évben a spektrum alsó részén (néhány kHz) igen erősen megnőtt a zaj. Az obszervatóriumban és közvetlen közelében végzett hangfrekvenciás mérésekkel megállapítottuk, hogy a zajok jelentős része a villamos erőátviteli kábelből ered. (A földkábel rádiófrekvenciás jelet sugároz!) Kizárható, hogy a zaj az obszervatóriumi elektromos berendezésekből ered.

Az OTKA támogatásával történt meg a tellurikus mérőrendszer felújítása. Az obszervatórium területén kívül eső, É-D és K-Ny irányban 500-500 m-re lévő elektróda-párokat felújítottuk, az elektródák és a kábelcsatlakozási pontok védelmére pedig új aknák készültek. A felújítás révén az átmeneti ellenállás változásából eredő hibákat (zajokat) jelentősen mérsékeltük. Az 1957-től folyamatosan meghatározott T geoelektromos aktivitási index automatikus meghatározására olyan szoftvert fejlesztettünk, amely alkalmas különböző ionoszférikus és magnetoszférikus jelenségek jellemző frekvenciaosztályainak indexálására. A neurális hálózatok hatékony mintázatfelismerő tulajdonságait felhasználva kísérletet tettünk a geoelektromos változások bizonyos jellegzetességeinek (kvázi-harmonikus jelcsoportok) kiválogatására. Ez az index azért különösen érdekes, mert a mágneses tér gyors változásait emeli ki, szemben a napszél-magnetoszféra energiacsatolás hosszú periódusú változásainak jellemzésére általánosan használt aa, K, illetve az ezekből képzett más indexekkel. A T index és a napfolt-tevékenység közötti, bonyolult összefüggésekről több tanulmány készült. A napfolt-tevékenység és a geoelektromos aktivitás közötti korreláció csekély, maximuma (átlagolás nélkül, a 3 órás adatokkal számolva 0.3 körüli érték) négy éves időtolásnál adódik. Különös aktualitást adott a vizsgálatnak az a rendkívüli geomágneses aktivitás, amelyet a jelenlegi napciklus minimumához közeledve tapasztaltunk, majd ezt követően pedig a tevékenység korábban soha nem tapasztalt alacsony szintje (A1.1 és A1.2 ábrák).

Érdekes eredmények születtek az obszervatóriumi tellurikus és mágneses adatokból számolt impedancia időbeli változásának elemzéséből. Az impedancia-tenzor periodikus modulációi mellett időszakos források is megjelenhetnek.

Orosz-magyar akadémiai együttműködés keretében, a felső-ionoszférában végzett CHAMP megfigyelések alapján, az upstream eredetű pulzációk alacsony szélességeken való jelenlétét modellszámításokkal is sikerült igazolni. A kérdés az volt, hogy a felső-ionoszférában megfigyelhető magnetoszonikus hullámok (Heilig et al. 2007) a magnetopauza felől érkeznek-e, vagy az ionoszférába beérkező Alfvén-

módusú hullámok gerjesztik őket. Két lehetőséget tekintettünk: 1. a beérkező Alfvén hullám az anizotropikusan vezető ionoszférában magnetoszonikus módusú felületi hullámot kelt, melynek mérhető amplitúdója a felszín felé haladva exponenciálisan elenyészik, vagy 2. az ULF energia transzportja egy távoli forrásból alapvetően a magnetoszonikus módusban történik. Mindkét esetre analitikus formában sikerült megadni a jelamplitúdót az ionoszféra felett (a kompressziós komponensben), illetve a felszínen (H-komponens). Ezekből a műholdon és a felszínen mért jelek amplitúdó-hányadosa becsülhetővé vált, s össze lehetett hasonlítani a mérési tapasztalatokkal. A vizsgálat eredménye egyértelműen a 2. lehetőséget támasztotta alá, azaz bebizonyosodott, hogy a kompressziós komponensben megfigyelt hullámok magnetoszonikus módusú hullámokként érkeznek meg az ionoszférához (Pilipenko et al. 2008) (A1.3 ábra).

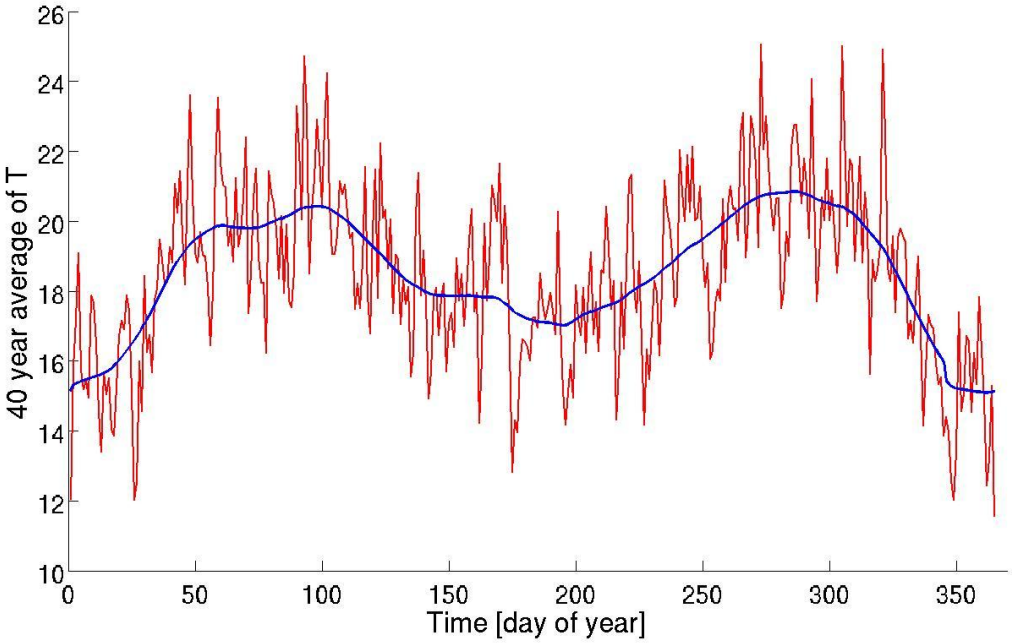
A napszél-magnetoszféra energiacsatolás révén a Föld környezetébe jutó energia több nagyságrendet elérő változásai a globális folyamatok mellett az emberi tevékenységet is számottevően befolyásolják. Ez a felismerés hívta életre az amerikai „Living with a Star" mellett az EU számos kutatási programját (ESTAR, COST Space Weather, SWENET, SWWT), melyekben aktívan részt veszünk.

Az ULF, ELF, VLF tartományban végzett méréseink révén lehetőség nyílt egy ESA pályázatban való részvételre.

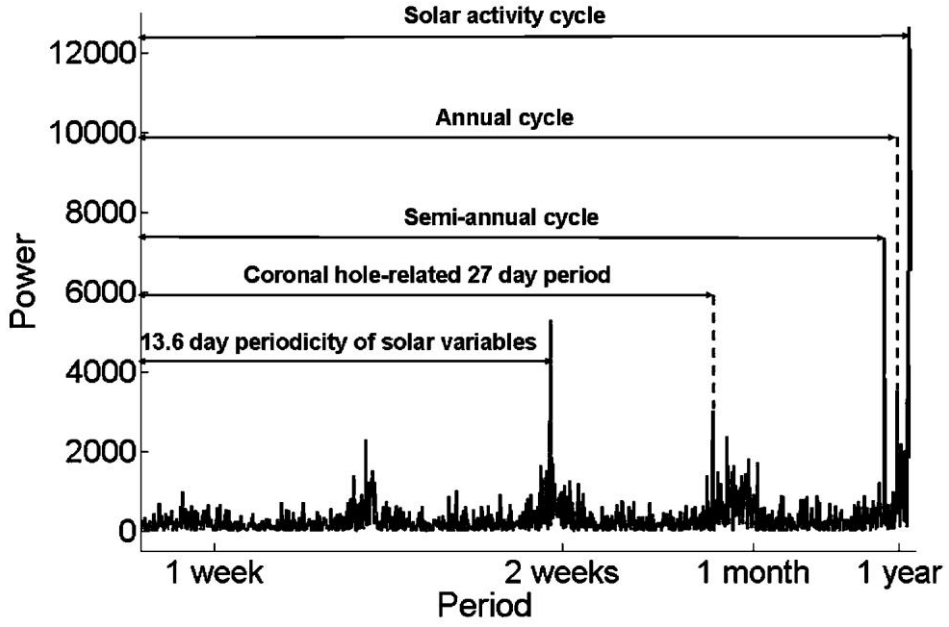
Az Űrkutatási Tudományos Tanács javaslatára a MÜI jóváhagyta és támogatja a Regional Earth's Environment Center (REEC) működését. Ez az információs és adatközpont a Föld körüli térség állapotára, az űridőjárásra, űrklímára, ezek hatásaira irányuló tudományos, biztonsági és gazdasági igényeket elégíti ki.

A nagycenki obszervatórium ötvenéves évfordulójára a múltbeli és jelenlegi kutatásokat, valamint a jövőre vonatkozó elképzeléseket összefoglaló jubileumi kiadvány készült. Lehetőséget kaptunk arra hogy az obszervatóriumban folyó munkát szélesebb szakmai közönségnek bemutassuk.

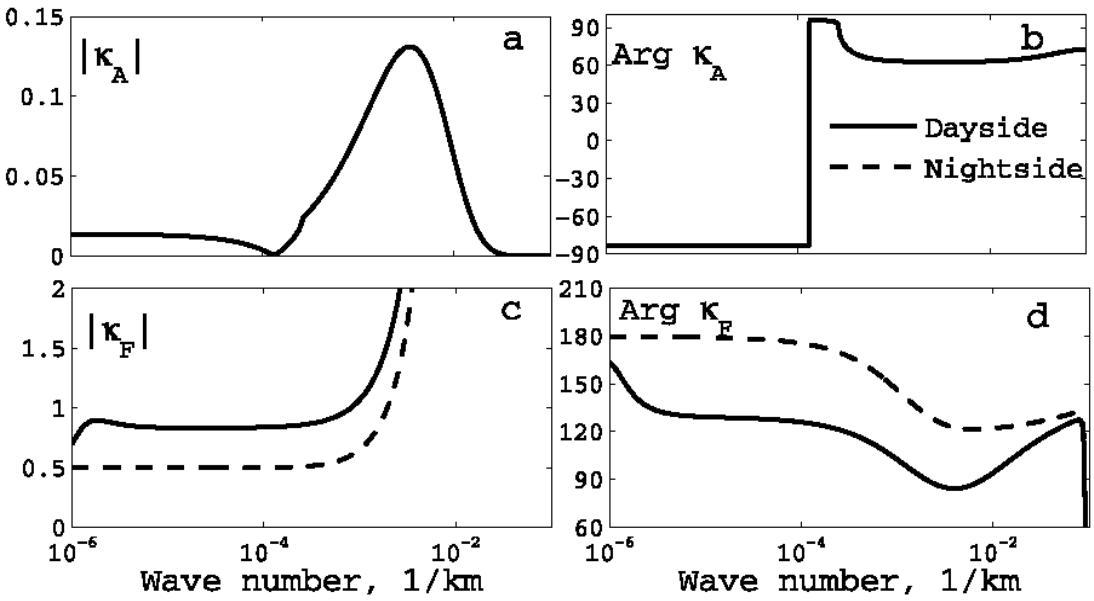
A EU SEE programjához a SEGMA többi résztvevőjével közösen (GEOMESSE néven) pályázatot adtunk be. Részben ennek tapasztalatai alapján egy másik uniós pályázatot is előkészítettünk (GEOWASE), ami az FP7 programhoz került benyújtásra (2008. január 12-én).



A1.1 ábra: Az év egyes napjain 40 év alatt mért átlagos T index és ezek 27-napos futó átlagolással simított értéke



A1.2 ábra: A napi T indexek összegének spektruma 40 év megfigyelései alapján. A jellegzetes teljesítménycsúcsok azonosítása a megfelelő nyílon található meg



A1.3 ábra: A felső ionoszférában (h=400 km) mért kompressziós hullámamplitúdó és a felszínen mért H-komponens amplítúdó aránya a hullámszám függvényében abban az esetben, ha a beérkező hullám a) Alfvén, c) magnetoszonikus módusú. A b) és d) ábrák a jelek fáziskülönbségét mutatja

A2. A naptevékenység és a geomágneses tevékenység hosszúidejű változásai

„A napszél és a geomágneses tevékenység hosszú idejű változásai" témában az eredeti tervhez képest annyi változás történt, hogy a magnetoszféra szerkezetének kutatása került előtérbe, viszont az eredeti címben szereplő hosszúidejű változásokkal kapcsolatos kutatás 2007 végével befejeződött, mivel Martini Dániel a résztéma felelőse kilépett az intézet állományából, és Indiában dolgozik.

Mint közismert, a magnetopauza alakját elsősorban a napszél dinamikus nyomása és a bolygóközi mágneses tér észak-déli irányú komponense (Bz) határozza meg. Többféle kétváltozós empirikus függvényt is meghatároztak a magnetopauza alakjának leírására. Ezek közül a Roelof-Sibeck függvény valamint a Petrinec-Russell függvény a legismertebbek. Egy sor numerikus magneto-hidrodinamikai szimuláció segítségével megvizsgáltuk, hogy hogyan függ a magnetopauza alakja a fent említett két napszélparamétertől és a modellszámítások eredményeit összevetettük az empirikus függvényekkel. Arra a következtetésre jutottunk, hogy a magnetoszféra alakját jobban közelíti a Petrinec-Russell empirikus függvény, mint a Roelof-Sibeck függvény, ami annak köszönhető, hogy a Petrinec-Russell függvény *a priori* feltételezi a dinamikus nyomás szerinti skálázhatóságot. De a Petrinec-Russell függvény is csak korlátozott Bz tartományban érvényes. Ugyanis egyik empirikus függvény sem veszi figyelembe a magnetoszféra aszimmetriáját, ami a mágneses erővonalak eróziójából adódik. Negatív Bz esetén a megélénkülő nappali oldali erővonal-összekapcsolódás csökkenti a magnetoszféra hajnal-napnyugta irányú átmérőjét. Pozitív Bz esetén viszont a sarki tölcsér pólus felőli oldalán történik erővonal-összekapcsolódás, ami a magnetopauza észak-déli irányú átmérőjét fogja csökkenteni. Tehát jelentős nagyságú Bz esetén a magnetopauza

alakja már nem közelíthető forgásellipszoiddal. Ilyen esetben a numerikus magnetohidrodinamikai szimulációk sokkal pontosabban határozzák meg a magnetopauza alakját, mint az empirikus függvények, amelyek eleve forgásellipszoid alakú magnetopauzát feltételeznek.

Részletesen tanulmányoztuk a nagyenergiájú részecskék terjedését különféle paleomagnetoszférákban. Skálázó függvényeket számoltunk a levágási energiákra és a differenciális fluxusokra a dipólmomentum függvényében. Figyelembe vettük mind a galaktikus kozmikus sugárzásból származó nagy rigiditású részecskéket, mind a kisebb energiájú szoláris részecskéket, amelyekre a külső magnetoszféra is befolyással van. Megállapítottuk, hogy erősen lecsökkent dipólmomentumú paleomagnetoszférákban 10 MeV energiájú szoláris protonok is könnyen elérhetik az atmoszférát még közepes földrajzi szélességeken is. Numerikus magneto-hidrodinamikai szimulációk segítségével kimutattuk, hogy magasabb rendű multipoláris paleomagnetoszférákban kettőnél több sarki sapka is létezhet és a mágneses szeparátrixok mentén további nyitott erővonaltartományok képződhetnek, amelyek még jobban megkönnyítik az adiabatikus részecskepopuláció behatolását a belső magnetoszférába.

1-dimenziós numerikus magnetohidrodinamikai (MHD) napszélmodellt fejlesztettünk ki és teszteltünk. A modellel 1 és 10 AU között (a Földtől a Szaturnuszig) szimuláljuk a napszél terjedését ill. az MHD lökéshullámok kölcsönhatását. A program bemeneteként Föld körüli interplanetáris plazma és mágneses tér adatokat használunk időfüggő peremfeltételként. A numerikus kódban javítottunk a peremfeltételeken a virtuális rácscellák fizikai feltételeknek megfelelő beállításával. Kiküszöböltük a szimulációs tartomány peremén lassan felhalmozódó hibát, ami a div B = 0 feltétel numerikus hibájából adódott. A program közvetlen kimenetét úgy módosítottuk, hogy utólagos feldolgozás nélkül megkaphatjuk az elforgatott MHD megoldást egy tetszőleges űrszonda vagy égitest trajektóriáján. A fizikai modellen is végeztünk néhány javítást. A Földdel együtt forgó koordinátarendszerről áttértünk a csillagokhoz rögzített inerciális koordináta-rendszerre. Korrigáltuk a bemenő napszélsebesség-vektor aberrációját, ami abból adódik, hogy a napszél sebességét a Földdel együtt forgó koordinátarendszerben mérjük. Észrevettük és kijavítottunk egy programhibát a megoldás elforgatásában, ahol a Nap Carrington rotációs periódusa (27.2753 nap) helyett a Nap csillagászati rotációs periódusát (25.38 nap) kell használni. Továbbá kidolgoztunk egy iterációs algoritmust, amellyel pontosan leképezhetjük az MHD megoldást gyorsan mozgó űrszondák vagy égitestek (pl. üstökösök) trajektóriáira is.

A napszélelőrejelzések várható pontosságát részletes statisztikai elemzéssel határoztuk meg. A modellszámítás eredményeit összevetettük a Pioneer, Voyager, Ulysses és Cassini űrszondák méréseivel. Kimutattuk, hogy pontosabb napszélelőrejelzések várhatók a naptevékenységi ciklus leszálló ágában, amikor visszatérő napszélnyalábok dominálnak a helioszférában. A napszélelőrejelzések akkor a legpontosabbak, amikor az űrszonda az oppozíció közelében tartózkodik, vagyis a Föld és az adott űrszonda közel azonos helioekliptikus hosszúságon található. Az oppozíciótól távolodva az előrejelzés hatásfoka fokozatosan csökken, de ±75 fokos eltérésig még elfogadható marad. A napszél sebessége jósolható a legnagyobb hatásfokkal, ez után következik az interplanetáris mágneses tér erőssége és a plazmasűrűség. Az interplanetáris lökéshullámok beérkezési pontosságát elemezve kimutattuk, hogy numerikus modellünkkel kedvező feltételek mellett 10-15 órás pontossággal tudjuk megjósolni a lökéshullámok beérkezését a Jupiter vagy a Szaturnusz bolygóknál. Napszélelőrejelzéseinket többek között a

2007-es Hubble Space Telescope kampány is felhasználta a Szaturnuszon végzett auróraészlelések során.

Ezen kívül részt vettünk a Jupiter és a Szaturnusz magnetoszféráinak MHD modellezésében is. Modellszámításaink azt az álláspontot látszanak megerősíteni, hogy az óriás bolygók gyors forgási sebessége és a magnetoszférán belüli plazmaforrások (holdak és gyűrűk) uralják a magnetoszférikus plazmatranszport folyamatokat.

Az általunk kifejlesztett 1 dimenziós MHD napszélmodell [Zieger és Hansen, JGR, 2008] alkalmazásával létrehoztunk egy adatbázist (MSWiM = Michigan Solar Wind Model, http://mswim.engin.umich.edu/), amely a Jupiter és a Szaturnusz bolygók upstream régióiban ad becslést a napszél plazmaparamétereire ill. az interplanetáris tér komponenseire 13 évre visszamenőleg. Adatbázisunkat jelenleg 15-20 regisztrált kutató használja.

Továbbfejlesztettük az MSWiM modellt oly módon, hogy a napszél terjedését nem csak a Földtől kifelé a külső helioszférában tudjuk modellezni, hanem visszafelé is a belső helioszférában. A modell bemeneteként Föld körüli napszélmérések szolgálnak időben visszafelé haladva, ahol a napszélsebesség irányát megfordítottuk. Ez az MHD modell adiabatikus és izentrópikus, tehát reverzibilis, ami elméletileg ellentmond az interplanetáris lökéshullámokban észlelhető entrópiaváltozásnak. Ennek ellenére a visszafordított napszélmodell meglepően jól működik. A modellt többféleképpen is teszteltük. A visszafordított napszélmodell segítségével a napszelet időben visszavezettük a Földtől a Merkúr bolygóig, majd a modell kimenetét peremfeltételként használva a direkt modellben a szimulált napszelet időben előre a Merkúrtól a Földig vezettük. Az eredeti input napszél és a Földtől a Merkúrig oda-vissza terjedő szimulált napszél gyakorlatilag megegyezett, ami a modell reverzibilitását igazolta. További tesztként a Merkúrnál kapott napszélparamétereket összehasonlítottuk egy a visszafordított napszélmodelltől teljesen független 3 dimenziós MHD napszélmodell eredményeivel. Az utóbbi modell fotoszférikus mágneses térképeket használ peremfeltételként és a Nap felszínétől kiindulva modellezi a napkoronát és a belső helioszférát a Nappal együtt forgó koordinátarendszerben. A két teljesen független peremfeltételekből kiinduló modell nagyon hasonló eredményre vezetett a Merkúr környezetében, ami mindkét modell helyességét igazolja. Egy utolsó tesztként a két napszélmodell eredményeit összevetettük a MESSENGER űrszonda Merkúr közelében mért magnetométer adataival. A két modell együttes alkalmazásával meglepően pontos leírást tudtunk adni a Merkúr napszél-környezetéről és az interplanetáris mágneses tér szektorszerkezetéről.

A napszélmodellezésen túl tovább folytattuk a Szaturnusz magnetoszférájának 3 dimenziós MHD modellezését a Cassini űrkutatási projekt keretében. A Szaturnusz előtti fejhullám (bow shock) és a magnetopauza alakját modelleztük különféle napszélnyomás és axiális dőlésszög esetén.

A hosszú távú naptevékenységváltozás földi hatásainak feltárásával is foglalkoztunk, különös tekintettel a földi mágneses tér változásaira. E téma szerves és fontos része a közelmúltban javasolt új tudományos területnek, az űrklíma kutatásának. Az egyik legfontosabb eredmény ebben a témakörben, hogy a Nap ún. nyitott mágneses tere, azaz a bolygóközi mágneses tér (IMF) az elmúlt 100 évben megkétszereződött (Lockwood et al. 1999). Az eredményt más indirekt észlelések, ill. modellek is alátámasztják.

Ezen eredmények ellenére korábban komoly kétség merült fel az IMF jelentős növekedésével kapcsolatban (Svalgaard et al., 2003; LeSager and Svalgaard,

2004). Svalgaard et al. (2003) javaslatot tett a geomágneses aktivitás becslésére alkalmas új index bevezetésére, az IHV-indexre, amely az általa elvégzett számítások szerint nem mutat szignifikáns növekedést a geomágneses aktivitásban az elmúlt évszázadban.

Számításba véve, hogy a naptevékenység ma már vitathatatlanul az egyik fontos meghatározója a globális klíma alakulásának, a Nap valós tevékenységének fontosságát a megelőző évszázadban aligha lehet túlbecsülni. Ezért alapvető munkánkként e kérdés megválaszolását tűztük ki. Kiszámítottuk az IHV-indexet mindazon obszervatóriumok adatsorából, melyek kellően hosszú (~100 év) regisztrációs idővel rendelkeznek, és megvizsgáltuk az újonnan javasolt IHV-index megbízhatóságát. Igazoltuk, hogy az IHV-index valóban leírja a mágneses aktivitást és más szabályosabb változásokat is, mint pl. a nyugodt napi járás változását a napaktivitás függvényében.

Az index hosszú távú növekedése az összes vizsgált obszervatórium esetében kvalitatíve alátámasztja a mágneses aktivitás évszázados növekedéséről szóló fent említett eredményeket. Kvantitatíven azonban a becsült trend csak mintegy a fele a korábban az aa index által becsült értéknek. Ez az eredmény alapjaiban kérdőjelezi meg a korábbi, aa-n alapuló becsléseket a geomágneses-, és a naptevékenység évszázados fejlődéséről.

Mindezt figyelembe véve azonban jeleztük, hogy a K-indexek és az IHV index számítási metódusa alapjaiban térnek el egymástól, s, ez felveti annak a lehetőségét, hogy részben más fizikai folyamatokat regisztrálnak a földközeli űr áramrendszereiben. Ezért kifejlesztettünk egy új mérőszámot a geomágneses aktivitás regisztrálására, az Ah indexet, mely metodológiájában követi a K-alapú indexek számítását, ugyanakkor órás átlagokat használ, ezáltal a számítás bárki által könnyen megismételhető, ellenőrizhető, azaz 'objektív', a hagyományos indexekkel (Ak, aa, Ap) ellentétben. Ezáltal egyesíti az IHV és a K-alapú indexek előnyeit.

Az Ah index megerősítette korábbi eredményeinket, miszerint a hagyományosan használt aa index hibás, nem alkalmas a mágneses aktivitás hosszú távú vizsgálatára. Új, meglepő eredményként találtuk, hogy az évszázados trend nem homogén, de szignifikánsan eltér különböző hosszúsági régiókban. Ez azt jelenti, hogy a geomágneses aktivitás globális leképezése (évszázados időskálán) csak akkor lehetséges, ha a globális index egyenlő mértékben tartalmaz adatot egyenlítői, közép-, és szub-arktikus régiókból.

Az elvégzett kutatás egyik jelentős, bár nem az eredeti célkitűzésnek megfelelő eredménye, hogy az ilyen irányú vizsgálatokban gyakran szereplő Eskdalemuir Obszervatórium órás átlagainak meghatározásában az 1930-as évek elején jelentős változás történt, amit azonban évkönyveikben nem jeleztek, emiatt az órás átlagokra alapozott indexek a jelzett időpont előtt és után csak megfelelő korrekcióval hasonlíthatók össze.

A3. A magnetoszféra állapota és az elektromágneses jelek

A 60-as években vettük észre, hogy a Pc3 típusú pulzációk amplitúdója a nagycenki obszervatóriumban nyáron sokkal nagyobb, mint télen, különösen naptevékenységi maximum idején. A változás szoros kapcsolatban állt a plazmaszféra whistlerek révén meghatározott elektronkoncentrációjával illetve az ionoszféra F2 tartományának elektronsűrűségével, az foF2 frekvenciával. Egy ausztráliai állomás segítségével kimutattuk, hogy a déli féltekén ugyancsak télen jelentkezik számottevő, de valamivel kisebb csillapítás, vagyis a jelenség uralkodóan évszakos, de lehet benne globális június-decemberi komponens is.

Bizonyos űridőjárási feltételek mellett erős korreláció mutatható ki a pulzációs aktivitás és a whistlerek gyakorisága között. A nagy időbeli és térbeli felbontású SEGMA hálózat adatainak felhasználásával vizsgálatokat kezdtünk a Pc3 típusú pulzációk és a whistler módusú hullámterjedés összefüggésének minden korábbinál részletesebb kimutatására. Definiáltunk egy FLR típusú pulzációs aktivitási mértéket a szélességfüggő kvázi-szinuszoidális jelcsomagok leválogatásával. Az események kiválogatása a különböző geomágneses szélességekről származó adatok keresztspektrumának fázisa alapján történik.

A pulzációk (napfoltmaximumok közelében tapasztalt) csillapításában (egy korábban nem ismert) szezonális függést mutattunk ki (nyáron az foF2 rögzített értéke mellett a Pc amplitúdók kisebbek a télinél). Az átlagos csillapítás (azért) erősebb (mégis) télen, mert a magas foF2 értékek télen gyakoriak. (A tavaszi és őszi ekvinokcium idején nem tapasztalható csillapítás.)

Konjugált obszervatóriumokban (Tihany, ill. Hermanus – Dél-Afrika) végzett megfigyelések alapján a legutóbbi napfoltmaximum körüli években kimutattuk a Pc3-as pulzációknak a mindkét féltekén a helyi tél idején fellépő, már korábban az foF2 magas értékeihez kapcsolt amplitúdó-csökkenését.

A felső ionoszféra elektronsűrűsége által meghatározott kritikus frekvenciaértékek (foF2) és a pulzációk amplitúdója között világos kapcsolat látszik a teljes vizsgált időszakban (vö. A3.1 és A3.2 ábrát).

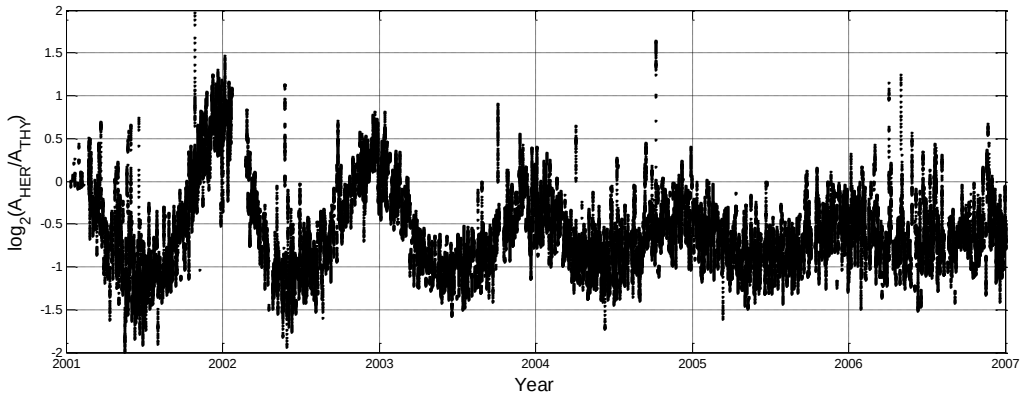
A téli anomáliának megfelelő, a féltekék közötti aszimmetriát a CHAMP-műhold méréseiből is sikerült kimutatni, azonban a Pc3-as jelek energiájának globális (helyi idő és mágneses szélesség szerinti) eloszlásában megfigyelt aszimmetriák téli anomáliával való kapcsolatát még tisztázni kell.

A nappali pulzációk napszélbeni (upstream) eredetét igazolják újabb eredményeink is. A nappali Pc3-as pulzációk gyakorlatilag megszűnnek szubalfvénikus napszél idején, valamint extrém-alacsony sűrűségi anomáliák (napszélsűrűség < 1 cm^{-3}) során. Ez utóbbi jelenség azzal magyarázható, hogy ilyen esetben a magnetopauza (és így a fejhullám) orrtávolsága igen jelentősen megnő, s a napszéltől besöpört upstream eredetű hullámoknak nagyobb utat kell megtenniük az ionoszféráig, s eközben nagyobb csillapítást szenvednek el. A szubalfvénikus napszél viszont eleve nem képes a foreshockban keletkezett, attól távolodó hullámokat a magnetoszféra felé szállítani. A foreshockban (CLUSTER) és a felszínen végzett megfigyelések összevetése rámutatott arra, miként szabályozza a bolygóközi mágneses tér iránya a felszíni pulzációk aktivitását. Eddig is ismeretes volt, hogy az ULF foreshock határa θ_{Bn}~50° körül található, azaz az ULF hullámok in-situ mérésekkel akkor figyelhetők meg a foreshockban, ha θ_{Bn} e küszöbértéknél kisebb. A magnetoszféra orrának környékén θ_{Bn} éppen a kúpszöggel egyenlő, azaz a magnetoszféra orránál akkor figyelhetünk meg ULF hullámokat, ha a kúpszög < 50°.

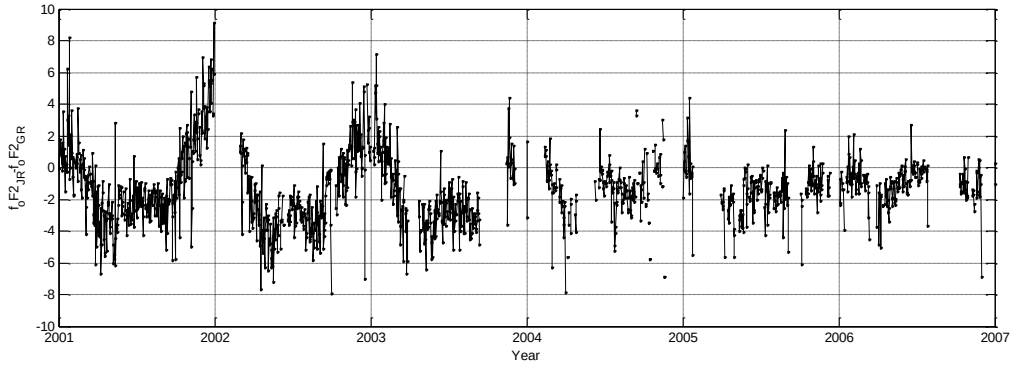
Végeredményben tehát akkor figyelhetők meg a Pc3-as pulzációk a felszínen, amikor a fejhullám orra az ULF foreshockon belül van. Mindez egyszersmind azt is igazolja, hogy az ULF hullámok belépési pontja is éppen itt, a magnetoszféra orránál keresendő.

A CLUSTER foreshockban végzett és a felszíni megfigyelések összevetésével a magnetopauza orrától a felszínig való terjedés ideje is becsülhető volt: a vizsgált esetekben 3-5 percnek adódott.

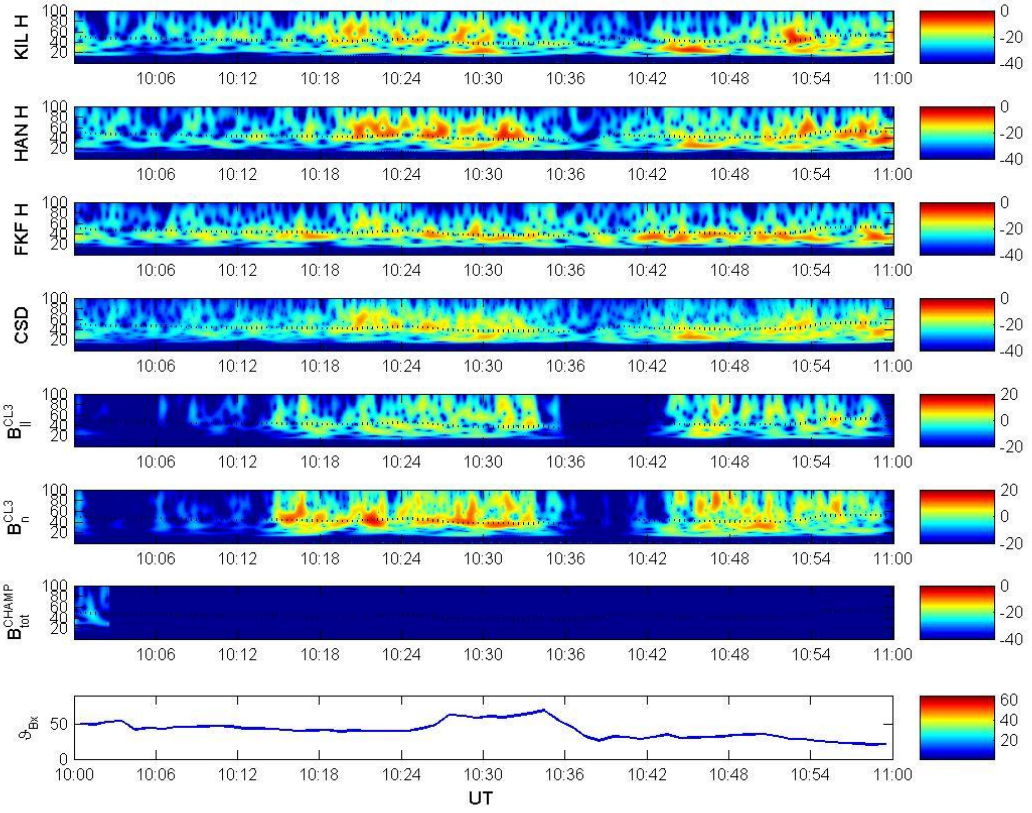
Az 1999. augusztus 11-i napfogyatkozás alatt magyar-japán-német-cseh együttműködésben végzett pulzációs mérések eredményeit véglegesítve 2007-ben publikáltuk, kimutatva, hogy a napfogyatkozás alatt a sötét folt területén a FLR típusú pulzációk eltűntek, ennek megfelelően az amplitúdó csökkent, és a csökkenés a sötét folttal együtt mozgott.



A3.1 ábra: A HER/THY arány alakulása 2001-2006 között (log2 skálán)



A3.2 ábra: Az F2 réteg kritikus frekvenciájának Juliusruhban és Grahamstownban mért értéke közötti különbség



A3.3 ábra: A pulzációs aktivitás energiespektruma KIL, HAN és FKF földi állomásokra, valamint ezek átlagos spektruma (CSD) a felső négy ablakban. Az 5. és 6. ablakban a CLUSTER 3 által a foreshockban mért párhuzamos és merőleges energia spektruma MVA-rendszerben. A 7. panel a CHAMP kompressziós komponensének energiaspektruma, az alsó panel a kúpszög. A vízszintes tengely az idő, órában és percben: 2002. február 18. 10:00-11:00 UT. Néhány perc szinkronitási hiba a kúpszög számításánál felhasznált OMNI adatokban az adatok származtatási algoritmusa miatt elképzelhető

A4. A földrengés-tevékenység és a geomágneses változások közötti idő- és térbeli korreláció elemzése

A földrengések és a földi elektromágneses jelenségek között félévszázada keresnek kapcsolatot. A múlt század 50-es éveiben Troickaja ilyen kutatások érdekében létesített Közép-Ázsiában obszervatóriumokat. Később Mete Isikara a szekuláris változásban, Duma a geomágneses tér napi változásában, Pokhotelov a földi áramok 10 másodperc körüli változásaiban, Gokhberg rövid, 1 s-nél rövidebb periódusú mesterséges holdakon észlelt elektromágneses jelekben kereste a földrengések hatását. A 90-es években Görögországban még előrejelzést is próbáltak adni földi áram változások segítségével, de a kísérlet végül sikertelen maradt. Általában piezoelektromos hatás révén képzelték el a kapcsolatot.

A SEGMA (South European Ground Magnetometer) hálózatot üzemeltető osztrák, olasz, bulgár, magyar csoport először a két 5,5 körüli magnitúdójú szlovéniai ill. montenegrói földrengés által keltett elektromágneses jeleket vizsgálta. (2004.07.12, 13:04h, Bovec Szlovénia, magnitúdó: 5,4, mélység: 5,1 km és 2005.07.10, 13:10h, Podgorica Montenegro, magnitúdó: 5,5, mélység:10 km)

A jelek forrásaként a kőzetanyag mikrorepedéseiből származó elektromos terek (piezoelektromos hatás), illetve a mikrorepedésekből kiinduló szeizmikus hullám magnetohidrodinamikus (MHD) vagy induktív hatását tételeztük fel.

A földrengések hatásának kimutatására legalkalmasabbnak a függőleges és vízszintes mágneses komponens arányát (polarizációt) tekintettük. Bizonyos mértékű, ha nem is túlságosan nagy eltérés jelentkezett a Pc4 tartományban (7-22 mHz) olyan értelemben, hogy a földrengés környezetében a Z komponens változása viszonylag nagyobb volt. Ennek megfelelően tehát a Z/H polarizációs paraméter értéke 1 körül volt, szemben a geomágneses tevékenységből származó Pc4 tevékenység esetével, amikor ez az érték jóval 1 alatt maradt. A földrengés időpontja előtt néhány órával szokatlanul nagy, a Pc4 tartományba eső hullámok léptek fel a Z komponensben.

Ez az előzetes vizsgálat jelezte azt, hogy elképzelhető a földrengések rövidtávú előrejelzése elektromágneses jelek alapján, mivel a pre-szeizmikus eredetű jelek egyes sajátságai eltérnek a magnetoszférikus-ionoszférikus eredetű jelek sajátságaitól. Ilyen sajátságként – irodalmi adatok alapján is – szóba jöhet az észlelt ULF jelek amplitúdója, valamint azok polarizációja.

Bogai földrengés esetében a rengés napjának éjszakáján jelentős anomáliát észleltünk a Z/H polarizáció értékében, mégpedig úgy, hogy az anomália leginkább a rengéshez legközelebb eső állomáson jelent meg.

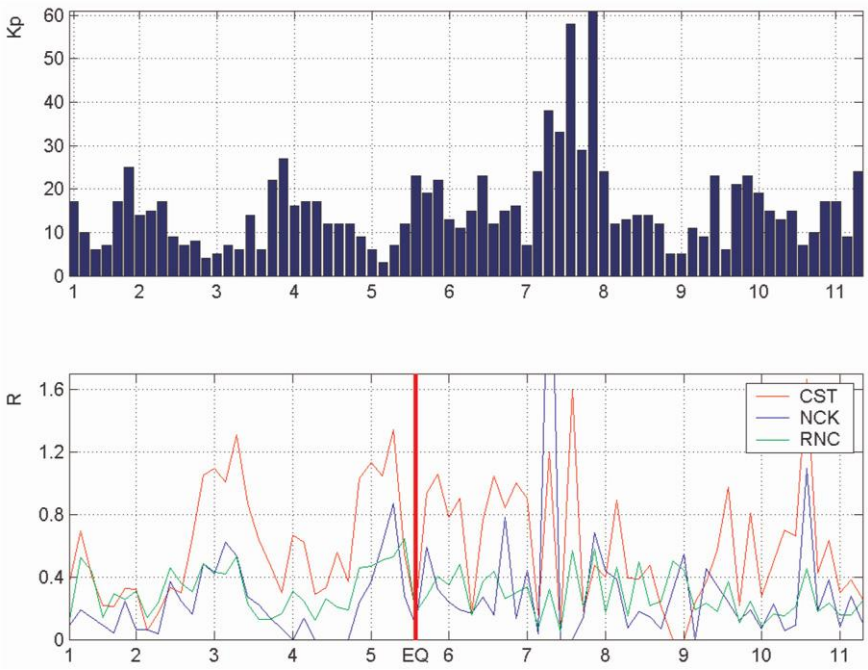
Az A4.1 ábra jelzi, hogy a polarizáció először három héttel a földrengés előtt nőtt meg, majd a legnagyobb növekedés egy nappal a fölrengés előtt következett be, és a nagy értékek néhány nappal a földrengés után szűntek meg. Kiszámítottuk, a 10-50 mHz frekvenciájú jel nagyságát a hipocentrumban, és ez a felszíni 0,16 nT alapján 0,83 nT-nak adódott.

Egy további vizsgálat során az ELF-ULF jeleket az előzőekben említett állomásokon két észak-olaszországi és egy közép-adriai (2004 vége, M=5-5,5) földrengés előtt és után vizsgáltuk. Ezeknél a polarizáció változása a földrengés előtti időszakban részben technikai problémák miatt nem volt kimutatható. Sokkal jobb eredményt adott a DFA (Detrended Fluctuation Analysis). Ennek alapján a több hónapos, a dél körüli és az éjfél körüli órára számított adatsor nemcsak az általános geomágneses tevékenységgel kapcsolatos változásokat jelzett, hanem olyanokat is,

amelyek többé-kevésbé lokálisak voltak. Ezek a különbségek részben állomáshoz kötöttek voltak, vagyis az adott állomás alatti geológia hatásának tulajdoníthatók, részben viszonylag ritkán, csak egyetlen állomáson és viszonylag rövid ideig jelentkeztek, vagyis elképzelhető, hogy a földrengés előtti tektonikus eredetű töredezési folyamatokkal kapcsolatosak. A teljesítményspektrum vizsgálata több kritikus időszakban azt jelezte, hogy a spektrum meredeksége néhányszor jellegzetesen változott, ami azt jelentette, hogy a nagyobb frekvenciák erősebben csillapodtak, mint a 0,1 Hz-nél kisebb frekvenciák.

Annak érdekében, hogy a különböző eredetű változások sajátságait és lehetséges okait azonosíthassuk, részletes vizsgálatot végeztünk a 2004-es év második felében több hónapos időszak dél és éjfél körüli adatait felhasználva. A felhasznált sajátságok közül legrészletesebben a DFA indexet vizsgáltuk, de bevontuk a fractal-multifractal dimenziót és a teljesítményspektrum meredekségét is. Megállapítottuk, hogy az egész szegmahálózatra kiterjedő változások mellett vannak olyanok is, amelyek a DFA index lokális csökkenésével illetve a fractal dimenzió lokális növekedésével jellemezhető, és kapcsolatosak lehetnek a jövőben bekövetkező földrengésekkel. Azt is tapasztaltuk, hogy az 1 Hz körüli ULF tartományban időnként amplitúdónövekedések észlelhetők, amelyek azonban nem terjednek ki a hosszabb periódusú változásokra.

Eredményeink alapot adnak arra, hogy közös pályázatot nyújtsunk be földrengések elektromágneses jelekkel való előrejelzésének tárgyában az Európai Unióhoz (FP7-ENV-2009-1, No. 244295).



A4.1 ábra: 1. ΣKp, 2. A Z/H polarizáció átlagos értéke 22-02 h LT között, piros: Castello Tesino (epicentrális távolság 153 km), kék: Nagycenk (275 km), zöld: Ranchio (291 km)

B) A globális légköri elektromos áramkör

B5. Háttér Schumann-rezonancia

A Föld felszíne és az ionoszféra által határolt gömbréteg elektromágneses rezonancia-frekvenciáit Schumann-rezonanciáknak (SR) nevezzük. Gerjesztő forrása a világ zivatartevékenysége. Saját háttér SR méréseinkre alapozott eredményeink a világ zivatartevékenységének idő- és térbeli változásaira, valamint a Föld-ionoszféra üregrezonátor felső határoló régióját (ionoszférikus D-tartomány) érő extraterresztrikus hatások feltárására vonatkoznak.

Szoláris röntgensugárzás szerepe

Kimutattuk, hogy a szoláris elektromágneses spektrum részeként, a kemény röntgensugárzás esetenként több nagyságrendet meghaladó intenzitásváltozása (röntgen-viharok idején és a 11-éves napciklus során) a felelős Schumann-rezonancia frekvenciák elhangolódásáért, ami a Föld-ionoszféra üregrezonátor magasság- és vezetőképesség-változásának a következménye.

Naptevékenység és a galaktikus kozmikus sugárzás által okozott modulációk

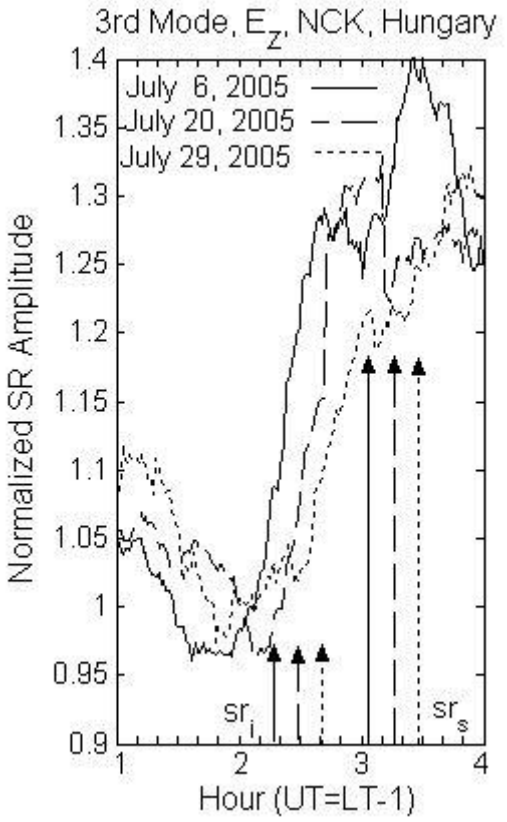
A globális zivatartevékenység már ismert éves és féléves változásában a 11-éves napciklussal összefüggő modulációt mutattunk ki. Az éves változás modulációjának a mértéke a növekvő naptevékenységgel nő, míg a féléves hullám a napciklussal ellentétes modulációt mutat, ami a galaktikus kozmikus sugárzás 11 éves napciklus során történő változására ill. annak villámaktivitást befolyásoló szerepére utal. A villámaktivitás éves és féléves változása más-más földrajzi szélességhez köthető, a 11 éves napciklus során mutatott ellentétes fázisú modulációt az északi és déli féltekén a szárazfölddel és óceánnal borított területek nagyfokú aszimmetriájával hoztuk összefüggésbe. Ennek megfelelően más extraterresztrikus hatások érvényesülnek az északi félteke magasabb szélességein nyáron (éves változás modulációja) és a trópusokon (féléves változás modulációja).

A Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriája

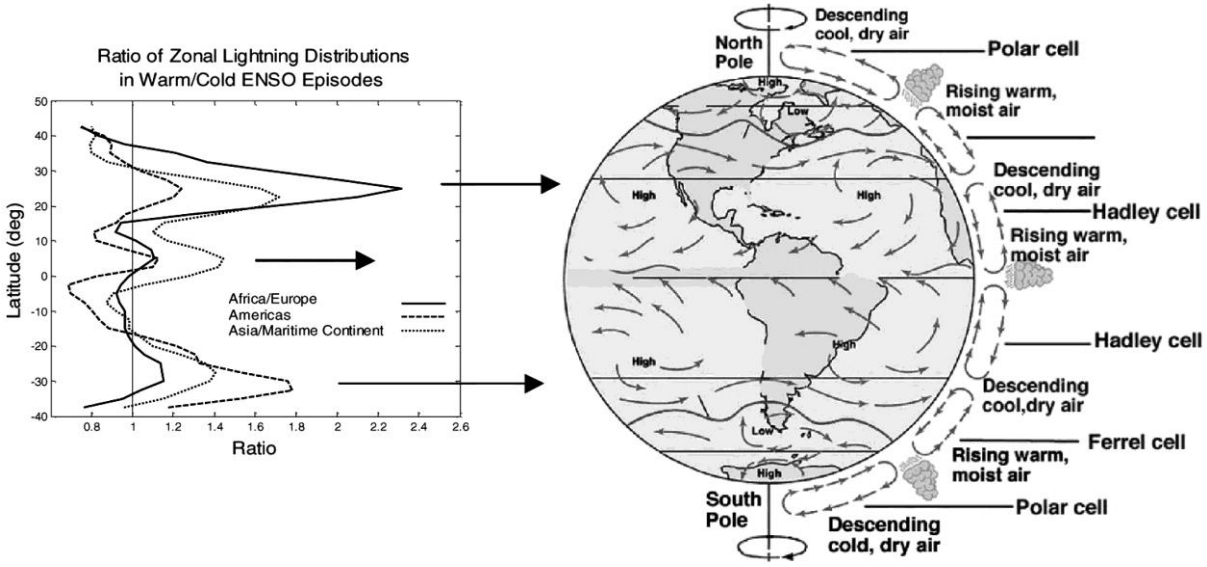
Nagy időfelbontású háttér Schumann-rezonancia amplitúdó/intenzitás adatokkal bebizonyítottuk, hogy a Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriája kimutatható az aszimmetria geometriai méreténél nagyobb hullámhosszakon is megcáfolva ezáltal évtizedes elméleti megfontolásokat.

A globális villámaktivitás dinamikája az ENSO időskálán

A globális villámaktivitás ENSO időskálán tapasztalt változásait, amit először Schumann-rezonancia mérések indikáltak, független műholdas villámmegfigyelésekkel teszteltük. A globális (szárazföldi) zivatartevékenység legnagyobb relatív változása: növekedése nem az egyenlítői régióban következik be az alapvetően trópusi ENSO jelenség meleg El Nino fázisában, hanem a nagy meridionális légkörzések (Hadley-cellák) száraz, hideg süllyedő légtömegekkel jellemezhető ágában, a 30°N és 30°S szélességen.



B5.1 ábra: A harmadik SR módus (E_Z-térkomponens) „óramű pontosságú" ugrásszerű amplitúdó növekedései Nagycenken az ionoszférikus nappali-éjszakai aszimmetria terjedési viszonyokra gyakorolt hatását jelzik. A nyilak sr_i-nél és sr_s-nél az ionoszférikus valamint a felszíni napfelkelte időpontjait jelölik



B5.2 ábra: A zonális villámeloszlás arányai meleg/hideg ENSO időszakokban Dél-Amerikát, Afrikát és a Maritim-kontinenseket magába foglaló hosszúsági tartományokban. A legnagyobb relatív változások a Hadley-cellák süllyedő hideg száraz levegőjű valamint az emelkedő meleg és nedves légtömegű globális légkörzések határán alakul ki

B6. Schumann-rezonancia tranziensek

Az energetikus villámokhoz kapcsolódó SR-tranziens méréseinkkel bekapcsolódtunk a zivatarok felett lejátszódó magas légköri, igen rövid időtartamú, de nagy kiterjedésű elektro-optikai emissziók világszerte folyó kutatásaiba.

Nappal-éjszakai aszimmetria

A nappal-éjszakai aszimmetria vizsgálatát végeztük el az izraeli MR állomással párhuzamosan regisztrált ELF (Extremely Low Frequency) tranziensek segítségével. Megállapítottuk, hogy a Schumann rezonancia (SR) háttérmérésekben felfedezett és a nappal-éjszakai terminátorvonalnak az obszervatóriumon történő áthaladásával kapcsolatba hozható spektrális amplitúdóváltozás különálló tranzienseknél is megfigyelhető, mégpedig a háttérmérésekkel egyező nagyságrendben. Ugyanannak a forrásnak az árammomentum spektrumában az amplitúdók nappali oldalon levő állomás adatsoraiból számítva kb. 20%-al nagyobbnak adódnak, mint egy éjszakai oldalon álló obszervatórium adataiból számolt spektrumban. Nappali féltekén levő forrás esetén a spektrum 5-20Hz-es tartományában, míg éjjeli féltekén levő forrás esetén a spektrum 25-30Hz-es tartományában figyelhető meg jellemzően az eltérés. A helymeghatározás pontosságában nem mutatkozott különbség a nappali és az éjszakai oldalon történő regisztrálásból származó eredmények között, viszont függetlenül a terminátorvonal helyzetétől bizonyos esetekben, ideálisnak mondható események feldolgozása során a két állomásról származó forráskoordináták jelentősen különböztek, ami olyan nem globális anomáliák jelenlétére utal, amik a feldolgozás eredményét számottevően befolyásolhatják.

Felsőlégköri optikai emissziók tanulmányozását célzó nemzetközi megfigyelési kampányok

A következő nemzetközi megfigyelési kampányokban vettünk részt: EuroSprite 2005-ös és EuroSprite 2007-es TLE (Transient Luminous Events) megfigyelési/mérési kampány (dán, francia, olasz, angol, spanyol, izraeli, lengyel, amerikai, új zélandi és magyar közös munka), 2005-2006 és 2006-2007-es téli Izraeli TLE megfigyelési kampány, 2006-os African Monsoon Multidisciplinary Analysis (AMMA, amerikai, japán, izraeli, új zélandi és magyar közös munka). Valamennyi esetben az emissziókat keltő villámok tulajdonságainak meghatározásával járultunk hozzá a kampány eredményeihez: polaritás és észlelési idő alapján segítettük a fényjelenségeket kiváltó villámkisülések azonosítását és elkészítettük ezek töltésmomentum statisztikáit. Az eredményeket a nagycenki obszervatóriumban működő, Schumann rezonancia monitorozó rendszer által regisztrált tranziens jelek analízise szolgáltatta. Ezen túlmenően a 2007-es EuroSprite nyári kampányban közvetlen megfigyelések végzésével is részt vettünk.

Saját vörös lidérc megfigyelések

A tudományos iskola támogatásával beszereztünk és beüzemeltünk egy mobil megfigyelőrendszert, amelyet felsőlégköri optikai emissziók (vörös lidércek – spriteok, kék jetek, stb.) fényképezésére 2007 nyarán valamint 2008 nyarán és őszén sikeresesen alkalmaztunk. A két évben összesen több mint 170 fényjelenséget és

több száz meteort kaptunk lencsevégre. Ezek között vannak a Magyarország fölött első ízben megfigyelt vörös lidércek is. A vörös lidérc megfigyelések elemzését részben elvégeztük, további vizsgálatok folyamatban vannak. A megfigyelt égi események egy részét Szlovákiából is lefényképezték. Ezen eseteket háromszögelés segítségével nagyobb részletességgel tudjuk megvizsgálni. Sikeres megfigyeléseinkről a hirek.csillagaszat.hu internetes újságban adtunk először hírt. A cikket több hazai hírportál is átvette, hatására több amatőr csillagász jelezte, hogy a jövőben szívesen részt venne szervezett megfigyelési kampányban. A jelenségeknek magyar neveket adtunk, és rádióinterjúkon keresztül több nyilvános előadás (pl. TIT) tartásával igyekeztünk bevinni őket a köztudatba. 2008-ban továbbfejlesztettük és interneten keresztül, távolról vezérelhetővé tettük a 2007-ben összeállított megfigyelőrendszerünket.

Földi gamma sugár impulzusok (Terrestrial Gamma Flashes – TGF)

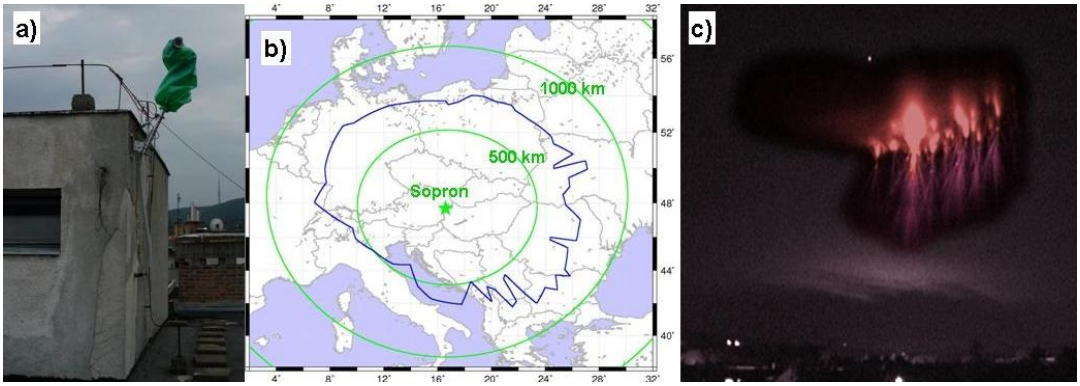
A világűrből észlelhető, földi villámaktivitáshoz kapcsolható gamma sugár impulzusok esetében kizártuk annak a lehetőségét, hogy ezek az impulzusok Schumann rezonancia (SR) tranzienseket is előidéző, tipikusan nagy töltésmomentumú villámkisülések közben keletkeznének. A vizsgálat során összevetettük a SR tranziensek és a TGF-ek észlelési időpontjait. Az elemzést egyetemi hallgatók bevonásával folytattuk, TDK munka keretében.

Afrikai horizontális viharfrontok (squall lines) vizsgálata

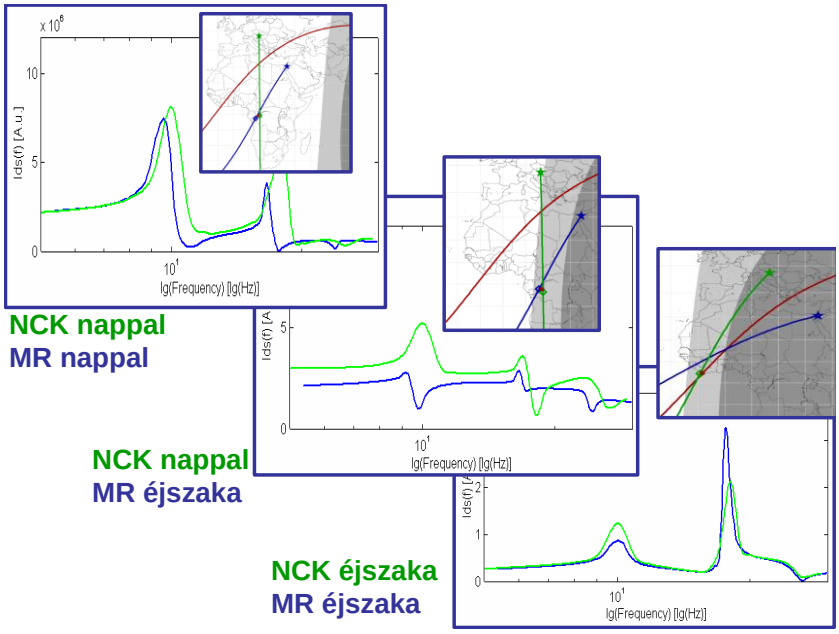
Afrikai eredetű SR tranziensek azonosításával járultunk hozzá ahhoz a nemzetközi projecthez (USA, Izrael, Japán és Magyarország), amely nagy kiterjedésű viharfrontokban előforduló villámok jellemző paramétereinek (pl. polaritás, töltés momentum) időbeli változását vizsgálja az Extremly Low Frequency (ELF, 3Hz-3kHz) tartományban észlelt jelek segítségével.

SR tranziens csoportok vizsgálata

Schumann rezonancia (SR) tranziensek előfordulásának statisztikáját tanulmányoztuk szlovák kollégákkal közös munkában. Megállapítottuk, hogy az események egy csoportja 2 illetve több átlapolódó tranziensből áll össze és a tranziensek közötti idő közel azonos – nagyságrendileg annyi, amennyire az elektromágneses hullámoknak a Föld megkerüléséhez szükségük van. Ebből adódóan ezek a különleges tranziens-párok illetve tripletek koherensen gerjesztik a Föld-Ionoszféra üregrezonátort, így a regisztrált térkomponensekben a többi esethez képest jóval több rezonanciamódus azonosítható. A viszonylag gyakori előfordulás azt sejteti, hogy a második illetve további tranziens a láncban nem független az előzőtől.



B6.1 ábra: a) Interneten keresztül irányítható kamera a Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet tetején Sopronban, b) a kék görbe által határolt területen belül lehetséges felsőlégköri fényjelenségek megfigyelése a soproni megfigyelőhelyről, c) távirányított rendszerrel Ausztria fölött megfigyelt vörös lidércek 2008. augusztus 7-én. 21:23:30.868 órakor (UTC) (hamis színes felvétel).



B6.2 ábra: Nappal-éjszakai átmenet hatása intenzív villámkisülések Schumann rezonancia (SR) tranziensekből levezetett árammomentum spektrumára. A nagyobb képeken NCK (Magyarország) és MR (Izrael) ELF állomásokon regisztrált, ugyanazon villámkisülés által keltett SR tranziensek horizontális mágneses adatsoraiból levezetett forrás árammomentum spektrumokat ábrázoltuk. A betét ábrákon a mérőállomásokat (csillagok), a mérőállomásokon meghatározott forrás irányokat (vonalak) és forrás távolságokat (rombuszok), valamint a forrás helyét (piros kör) tüntettük fel. A piros vonal azokat a pontokat ábrázolja, amelyek mindkét állomástól azonos távolságra helyezkednek el. A fehér-világos szürke határvonal a felszíni naplemente terminátor vonalának helyzetét jelöli, a világosszürke-sötétszürke határvonal a naplemente terminátor vonala az ionoszférában kb. 100 km-es magasságban. Amennyiben az állomások a nappal-éjszakai terminátor vonal különböző oldalán vannak az esemény észlelésekor, a forrás levezetett árammomentum spektrumában a nappali oldalon levő állomás esetében nagyobb amplitúdók adódnak.

B7. A légköri elektromos potenciálgradiens hosszútávú csökkenésének elemzése különböző európai állomások alapján

A légköri elektromos jelenségek tanulmányozására 1962 óta folyamatosan végzünk potenciálgradiens méréseket a nagycenki obszervatóriumban. Ezekre a mérésekre alapozottan több mint 40 évet átfogó adatbázissal rendelkezünk, amely jó lehetőséget nyújt a légköri elektromos jelenségek időbeli változásainak beható vizsgálatára. A korábban vizsgált napi és évszakos változáson kívül újabban a hosszabb periódusú változások megismerésére irányultak azok a kutatásaink, amelyek az OTKA projekthez is kapcsolódnak. Az időbeli változások megismerése révén egyaránt következtetéseket vonhatunk le a potenciálgradienst befolyásoló helyi hatásokról, valamint a légköri elektromos globális áramkörben érvényesülő hatásokról. Erre való tekintettel célszerűnek bizonyult az időbeli változásoknak a kutatását több megfigyelő állomás mérési adatsoraira támaszkodva elvégezni, ugyanis így a levezetett kutatási eredmények lehetővé tehetik a kétféle hatás részbeni elkülönítését is.

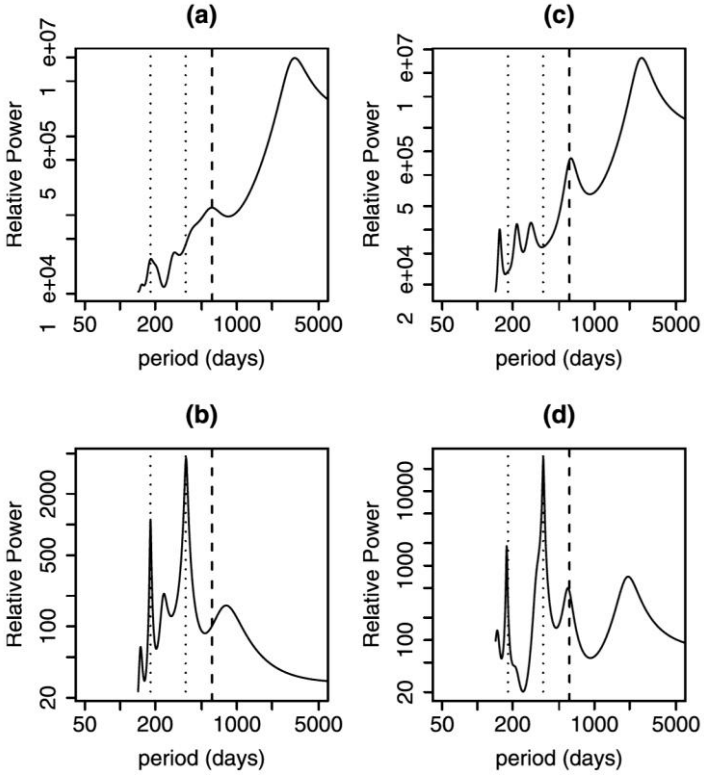
Nagycenkhez hasonlóan az angliai Eskdalemuir és Lerwick állomásokon is több évtizeden keresztül folytak légköri elektromos potenciálgradiens mérések. Az University of Reading Meteorológiai Tanszékének professzorával, Dr. R.G. Harrisonnal együttműködve közös kutatásokat végeztünk, amelyek feltárták a nagycenki obszervatóriumban és a két angliai állomáson a potenciálgradiens több évtizedre terjedő csökkenését. A London melletti Kew állomásra vonatkozóan, a légköri elektromos globális áramkör vizsgálatára még alkalmasabb vertikális áram adatsorában is kimutattuk ezt a tendenciát. Sőt két további európai állomás (Serra do Pilar, Athén) adatait alkalmazva a korábbi vizsgálataink eredményei megerősítést nyertek. Eredményeinket több nemzetközi folyóiratban publikáltuk. Legújabb vizsgálataink szerint az említett európai állomásoktól távoli Irkutszkban mért PG szintén jelezte a csökkenő tendenciát. Ezekről az eredményeinkről a nagycenki obszervatórium 50 éves évfordulója alkalmával kiadott jubileumi kötetben jelentettünk meg közös publikációt 2007-ben.

Dr. Harrisonnal más irányban is folytattunk közös kutatásokat. Ehhez alapot szolgáltattak a nagycenki PG adatok egyedi elemzéséből levezetett korábbi eredményeink, amelyek azt igazolták, hogy a felszínen mért PG csökkenéssel reagál a galaktikus kozmikus sugárzás (GCR) intenzitásában megjelenő jelentős csökkenésre, az un. Forbush–csökkenésre. (Az eredményeket a JASTP Vol. 59. No. 9-ben, 1997-ben tettük közzé.) A GCR mint légköri ionizációs forrás időbeli változásaival befolyásolhatja a légköri elektromos globális áramkör bizonyos elemeit. Ugyanakkor egyes kutatók szerint a légköri elektromos paramétereknek a felszínen végzett megfigyelései korlátozottan alkalmasak a GCR-rel és más extraterresztrikus paraméterrel összefüggő változások jelzésére, hisz a helyi hatásoknak általában nagyobb a befolyásuk. A szakirodalomban újabban a GCR hosszabb periódusú (1,68 éves) változásáról több szerző tudósított. Így célszerűnek látszott ennek a periódusnak a több évtizedes nagycenki PG adatsorban történő nyomozásával foglalkoznunk.

Az 1963 és 2004 között meghatározott összes PG adattal, valamint a zavartalan (szépidő-tér) és a zavart körülmények között mért adatokat egymástól elkülönítve is végeztünk vizsgálatokat. Power spectrum analízist alkalmazva az egyes adatsorokban az éves és a féléves periódus mindegyik esetben megjelent. A keresett 1,68 éves periódus gyengén jelentkezett az összes adattal végzett analízis alapján, míg jelenléte jól megerősödött a zavartalan adatokban. Ez utóbbi adatsorból

kiválasztva a helyi hatásokkal legkevésbé terhelt hajnali órákat, újabb adatsort generáltunk, amelyben szignifikánsan megmutatkozott az 1,68 éves periódus. A zavart időszakok adatsorából csak az éves és féléves periódust lehetett kimutatni. Rouillard és Lockwood (2004) megállapította, hogy a neutron monitor adatokban különösen az 1978 és 1990 közötti időszakban volt szignifikáns az 1,68 éves periódus és csak gyengén jelentkezett 1978 előtt, ill. hiányzott 1975 előtt. Erre való tekintettel szintén két csoportra osztottuk a zavartalan időszakokra vonatkozó PG adatokat. A maximum entrópia módszert alkalmazva megállapíthattuk, hogy a neutron adatokra jellemző tendencia érvényesül a felszínen mért potenciálgradiens esetében is. A GRL Vol. 34-ben L23816, doi:10.1029/2007/GL031714, 2007 sz. alatt közzétett eredményeink azt mutatják, hogy nem véletlenszerűen megjelenő periódusról van szó. Újabb bizonyítékát adtuk annak, hogy felszíni mérésekre alapozva a légköri elektromos paraméterekben extraterresztrikus hatás is kimutatható.

A potenciálgradienst befolyásoló helyi hatások közül a mérés helyén elhelyezkedő fák növekedésével kapcsolatos befolyást vizsgáltuk és az eredményeket a globális eredetű változásokkal összevetve elemeztük. Erről a nemzetközileg elismert GRL szakfolyóiratban jelentettünk meg további tanulmányt Prof. R.G. Harrisonnal közösen (GRL, Vol. 33, L12803. doi:10.1029/2005GL025574,2006).



B7.1 ábra: Maximum entrópia módszerrel meghatározott spektrumok mind a Climax neutronmonitorral mért adatok, mind a Nagycenken, ún. „szép időben” mért légköri elektromos potenciálgradiens (PG) értékek esetében. *Bal oldalon:* 1963–1977 időszakra vonatkozóan a) neutronok, b) PG. *Jobb oldalon:* 1978–1990 időszakra vonatkozóan c) neutronok, d) PG. Vertikális szaggatott vonal jelzi az 1,68 éves periódust, a pontozott vonalak az éves és a féléves periódust jelölik. Az 1,68 éves periodicitás határozottan jelenik meg az 1978–1990 időszakban, mind a neutronok, mind a PG esetében

C) Ionoszférikus/plazmaszférikus folyamatok

C8. Ionoszférikus és plazmaszférikus irregularitások

Az 50 éve fennálló nagycenki obszervatóriumban olyan mérési tevékenység folyik, amely példa nélküli talán az egész világon. Ennek a széleskörű monitoringnak, amely magában foglalja szinte az egész Föld körüli térséget, csak akkor van értelme, ha ezt a complexitást ki is tudjuk használni, vagyis szükség van egy erre vonatkozó koncepcióra. A koncepció az űridőjárás monitoringjára épül és a következő elemei vannak. Az erővonal-rezonancia (FLR) típusú pulzációk periódusa nemcsak az észlelési helyhez tartozó mágneses erővonal hosszától, hanem a plazmaszféra (belső magnetoszféra) plazmasűrűségétől is függ. A plazmaszférikus elektronsűrűséget az ionoszféra F tartományában kialakuló elektronsűrűség határozza meg. Az F tartomány paramétereinek (foF2) és az FLR periódus ismeretében a plazmaeloszlás az erővonal mentén a plazmaszférában kiszámítható. Hasonló lehetőséget kínál a whistlerek feldolgozása, amely az egyenlítői elektronsűrűség meghatározását teszi lehetővé. Mindhárom paraméter (FLR pulzációk periódusa, foF2 és whistler diszperzió) az űridőjárás jelenségeinek a hatását is tükrözi. A Schumann rezonanciafrekvenciák az üregrezonátor felső határfelületének a vezetőképességével változhatnak, amely az űridőjárás által befolyásolt galaktikus kozmikus sugárzás függvénye. A légköri elektromos áramkör paraméterei (potenciálgradiens, vertikális áram) az alsó légkörben ionizációt előidéző galaktikus kozmikus sugárzás függvényei. Ezt a koncepciót a prágai IRI-COST Workshop-on mutattuk be (Bencze és Wesztergom, 2007).

Az űridőjárás évtizedes átlagos változása határozza meg az űrklímát. Az űrklímával kapcsolatos kutatásaink az ionoszféra F tartományában kialakuló F2 réteg magassága (hmF2) hosszú időtartamú változása trendjének megállapítására irányultak. Azt a tényt vizsgáltuk, hogy a tengerpartok közelében levő ionoszféraállomásokon hmF2 trendje negatív, vagyis hosszú időtartamú csökkenést mutat, míg a szárazföldek belsejében elhelyezkedő állomásokra a pozitív trend, vagyis a hosszú időtartamú növekedés a jellemző. Erre a légköri árapály hullámok nemmigráló típusa ad magyarázatot, amely a szárazföld-tenger határokon alakul ki a fajhőkülönbség hatására és idézi elő a hmF2 trend térbeli eloszlásában mutatkozó képet. Értelmezésünket mesterséges holdak mérései (pl. UARS) is alátámasztják (Bencze, 2007). Arra a megállapításra jutottunk hogy a hmF2 trendek előjelének nemmigráló ár-apály hullámokkal történő értelmezése csak abban az esetben közelíti meg a hmF2 trendek tényleges földrajzi eloszlását, ha a tengeráramlatok levegőt melegítő, illetve hűtő hatását is figyelembe vesszük. A nemmigráló légköri ár-apály hullámok ugyanis termikus gerjesztésűek. Így a globális felmelegedés hatása a rádióhullámok terjedése szempontjából fontos ionoszféra-paraméterben (hmF2) is kimutatható.

Módszert dolgoztunk ki a plazmaszférikus plazmasűrűségnek FLR típusú pulzációk periódusa alapján történő meghatározására. A Pc 3 típusú pulzációkban már korábban kimutatott téli anomália magyarázatát keresve kiszámítottuk, hogy különböző FLR periódusokhoz milyen plazmaszférikus plazmasűrűségek tartoznak. A számítások azt mutatták, hogy a periódus a plazmasűrűség növekedésével növekszik, mint az egy növekvő csillapítású rezgőkör esetén is várható (Bencze és Verő, 2007). Meghatároztuk a Pc 3 FLR típusú pulzációk alapján a plazmaszférikus elektronsűrűségnek a naptevékenységgel történő változását is. Elemzésünk azt

mutatta, hogy a plazmaszférikus elektronsűrűség erővonalmenti eloszlásának egyenletessége a naptevékenység csökkenésével 1960-tól 1964, a naptevékenység minimuma felé (1964) közeledve fokozatosan növekszik. Ennek az az oka, hogy a plazmaszféra plazmája az ionoszférából származik, majd a naptevékenység újbóli növekedésével (1964-1970) ismét az erővonalak ionoszférához közeli végére koncentrálódik (C8.1 ábra). Így a naptevékenységgel csökkenő, illetve növekvő geomágneses tevékenység nyomán a plazmaszféra egyre jobban feltöltődhet plazmával, illetve egyre jobban kiürülhet (Bencze és Lemperger, 2008).

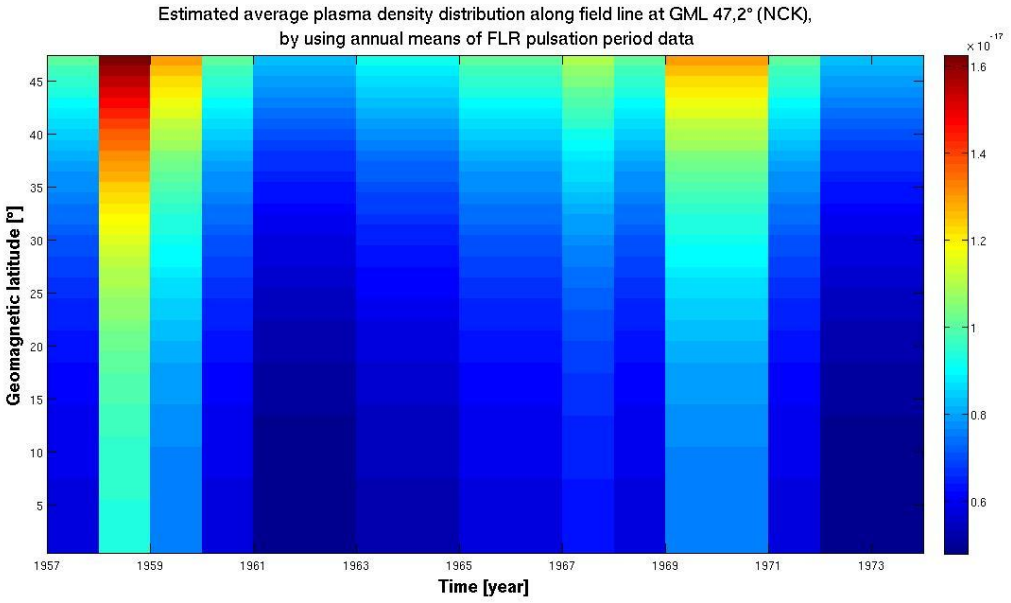
A Pc3 típusú pulzációkkal történő foglalkozás nyomán született az a felismerés, hogy szükséges egy átfogó tanulmány az ionoszférának a pulzációk paramétereire (periódus, amplitúdó, polarizáció) gyakorolt hatásának az áttekintésére. Ehhez jó anyagot kínált a nagycenki obszervatóriumban regisztrált földi (tellurikus) áramok 1960 és 1973 közötti részletes feldolgozása. Az említett feldolgozás adatai közül a pulzációk előfordulása gyakorisági spektrumát választottuk. Ezeknek alapján meg tudtuk állapítani a spektrum maximumához, vagyis a maximális előforduláshoz tartozó periódust, az előfordulás nagyságát és a sávszélességet. A pulzációkat (a maximum kialakulását nagyrészt FLR típusú pulzációknak tulajdonítva) rezonancia jelenségnek tekintve és „helyettesítő" kapcsolásként elektromos rezgőkört alkalmazva, a plazmasűrűség az ohmikus tagnak felel meg. Ennek a munkahipotézisnek az alapján határoztuk meg a periódus és a geomágneses tevékenység, illetve foF2, az előfordulás és a geomágneses tevékenység, illetve foF2, valamint a sávszélesség és a geomágneses tevékenység, illetve foF2 közötti empirikus összefüggést (Bencze és Verő, 2007). Az ionoszonda folyamatos működési lehetőségének a megteremtése hardver problémák miatt elhúzódott, így egy helyen egyidejűleg végzett mérésekre nem volt lehetőségünk. Így a kutatásokat más állomások adatainak felhasználásával végeztük el.

Az ionoszférikus irregularitások két fő típusa közül a szporadikus E (Es) rétegekkel, azok idő- és térbeli változásával foglalkoztunk. A nagycenki obszervatóriumban nagy időbeli felbontással végzett ionoszféra szondázások alapján megállapítottuk, hogy az Es rétegekben kialakuló, a háttér elektronsűrűségnél nagyobb elektronsűrűségű „foltok" átlagos távolsága 3 km-nél kisebb. Az Es rétegek frekvenciaparamétereinek elemzése alapján bizonyítottuk, hogy a „foltok" a közepes földrajzi szélességeken az Es rétegek megjelenését előidéző szélnyírás növekedésével keletkező turbulencia következményei, tehát örvényeknek felelnek meg. Mivel a szélnyírás nyári maximumot mutat, az Es rétegek előfordulásának nyári maximuma magyarázható. Szerintünk téves az a szakirodalomban elterjedt nézet, mely szerint ezeknek a „foltoknak a megjelenése" a szporadikus E réteg elektronsűrűségének légköri hullámok által történő modulációjának, illetve az igen kicsi rekombinációs tényezővel rendelkező meteoritikus eredetű ionoknak lenne tulajdonítható. A HF rádióhullámok terjedésére vonatkozóan az a következtetés vonható le, hogy minél nagyobb a turbulencia és ezáltal az Es rétegek felszabdaltsága, annál nagyobb azok „átlátszósága". Az Es rétegek frekvencia paraméterei idő- és térbeli eloszlásának a bemutatására azok napi és évszakos változását az Európa feletti térre 216 térképen mutatjuk be.

Az ionoszférikus irregularitásoknak a mesterséges holdakkal történő helymeg-határozásra gyakorolt hatását tekintve azok a rádiójelek szcintillációját idézik elő. A GPS holdak jeleinek szcintillációja a meghatározott koordináták ingadozását idézi elő. Ez az ingadozás elsősorban a függőleges összetevőben hozható összefüggésbe az ionoszférikus irregularitásokkal. A függőleges koordináta növekedése elektron-sűrűség növekedésre, csökkenése elektronsűrűség-csökkenésre vezethető vissza.

Az ionoszféra hatásáról csak abban az esetben beszélhetünk, ha az ingadozás két szomszédos vevőállomáson azonos képet mutat. A szcintillációt előidéző irregularitásokat az ionoszféra F tartományában kell keresni (spread F).

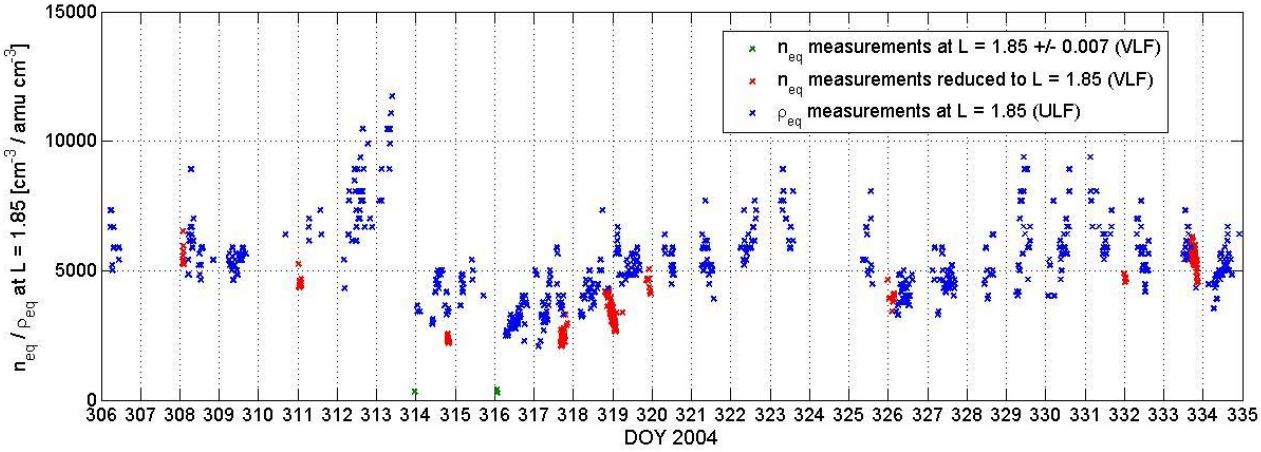
Az ionoszférikus irregularitások és a whistlerek előfordulása közötti kapcsolatot keresve mind a rádióhullámok ionoszférikus abszorpcióját, mind az ionoszféra F tartományában a spread F jelenséget előidéző irregularitásokat vizsgáltuk. A rádióhullámok ionoszférikus abszorpciója és a whistler-előfordulás között nem mutatkozott egyértelmű kapcsolat, a whistler-előfordulás csökkenése az abszorpció növekedésével jár. A spread F-el való kapcsolat egyértelműbbnek mutatkozott, amennyiben napi és évszakos előfordulásukat tekintve mind a whistlerek, mind a spread F előfordulása éjszakai maximumot, illetve téli maximumot mutat. Az előfordulásnak ilyen időbeli egybeesése mögött a spread F-et létrehozó ionoszférikus irregularitások az F tartományban lehetnek felelősek. Ezek az irregularitások a mágneses erővonalak mentén alakulnak ki és hozzájárulhatnak a whistlerek erővonalmenti terjedésének elősegítéséhez, duktok kialakulásához (a duktokat nem folyamatos elektronsűrűség irregularitásoknak tekintve).



C8.1 ábra: Becsült átlagos plazmasűrűség-eloszlás a 47.2° (NCK) GML szélességű erővonal mentén. Kiinduló adat az FLR pulzációk éves átlagos periódusa

Az FLR pulzációk megfigyelése 2006–2008-ban Tihanyban is folyamatos volt. 2005–2007. évi méréseinkből megbecsültük a plazmaszféra egyenlítői sűrűségét az L=1.85 erővonalra. Az ELTE-n kidolgozott új whistler inverziós modell figyelembevételével kísérletet tettünk a whistlerekből számított elektronsűrűség-becslés és az FLR-ekből becsült plazmasűrűség összekalibrálására. Néhány esettanulmány keretében vizsgáltuk a plazmaszféra állapotának mágneses viharok hatására bekövetkező megváltozását. Egy 2004. november elején kitörő vihar főfázisában a plazmasűrűség jelentősen emelkedett. Bár egyidejű elektronsűrűségadatok nem állnak rendelkezésre, a magyarázat az oxigénionok feldúsulása lehet. Ezt néhány nappal követően a plazmaszféra gyors kiürülése figyelhető meg, feltehetően a csóvától a magnetopauza irányába tartó, és a szubviharok idején jellemzően felerősödő plazmakonvekció hatására. A vihar visszatérési fázisában a felső ionoszférából ambipoláris diffúzió útján lassan újratöltődik a plazmaszféra. Az eljárás lehetővé tette az ionösszetétel, a plazmaszféra radiális sűrűséggradiense, valamint a mágneses viharok során felerősödő konvekció által kiürített plazmaszféra újrafeltöltődési ütemének becslését is (C8.2 ábra).

A Cluster szimultán mérései alapján kimutattuk, hogy az upstream-hullámok energizált ionokkal való kölcsönhatása leírható egy diffúziós transzport egyenlettel. Az energizált ionok parciális sűrűségprofiljának térbeli változása exponenciálisan lecsengő, ami a diffúziós folyamat közvetlen bizonyítéka.



C8.2 ábra: Az erővonalrezonancia-becslésekből számolt plazmasűrűség (kék x) és a whistlerek diszperziójából számított elektronsűrűség (piros és zöld +) összevetése egy 2004. novemberi mágneses vihar előtt, alatt és után. A vízszintes tengelyeken a 2004. év napjai napszám szerint

C9. Az ionoszféra szondázása függőlegesen kibocsátott rádióhullámokkal

A beszámolási időszakban arra törekedtünk, hogy a nagycenki obszervatóriumban megindulhasson a rendszeres ionoszféraszondázás. Korábban az ionoszféraszondázás csak az Országos Meteorológiai Szolgálattól örökölt IRS42 ausztrál ionoszondával történhetett. Ezzel többnyire csak olyan ionogrammok készülhettek, amelyeken a visszaverődések kimaradása miatt hiányzott az ionogramm nagy frekvenciákhoz tartozó része. Így csak az ionogramm alsó része volt használható pl. a szporadikus ionizáció tanulmányozására. Ezt a lehetőséget ki is használtuk, két kampányt is szerveztünk sűrített, 3 percenkénti szondázással.

Az obszervatóriumban az ott évtizedek óta folytatott mérési tevékenységnek (geomágneses térváltozások, földi áramok, légköri elektromosság) az űridőjárás tanulmányozása szempontjából elengedhetetlenül szükséges volt egy új ionoszonda beszerzése. Ez meg is történt a pénzügyi lehetőségeink által megszabott kereteken belül maradva egy lengyel gyártmányú VISRC2 típusú ionoszonda beszerzésével.

Az ionoszonda üzembe helyezése 2007 áprilisában történt. Az új szondát a korábbi IPS 42-es szondához készült antennarendszerhez csatlakoztattuk. Megkezdtük a kísérleti méréseket abból a célból, hogy kialakítsuk az optimálisabb hardveres és szoftveres konfigurációt. A szondát csatlakoztattuk az obszervatóriumi hálózathoz, ezzel lehetővé téve az adatok és a szondavezérlés hálózaton keresztüli elérését. Kísérleti méréseket végeztünk a régi és az új balun transzformátorokkal és megállapítottuk, hogy a nagyobb teljesítmény átvitelére alkalmas, a VISRC2 szondához mellékelt transzformátorok csak a lezáró ellenállások cseréje után használhatók.

A VISRC2 szonda vételi üzemmódban alkalmas arra, hogy az adóantennát vevőantennaként is használja, így lehetővé téve a visszaverődött elektromágneses jel két egymásra merőleges térkomponensének a vételét. A korábbi IPS-42 szonda ezt a lehetőséget még nem tudta kihasználni. Az első szonda adóegységének teljesítménye is kisebb volt, ezért eredetileg a két delta antennát nem egyforma méretűre készítettük, az adóantenna méretét megnöveltük, ezzel biztosítva a nagyobb kimenő jelnagyságot. Az új szondánál viszont, amelyik feltételezi az egyforma antennaméretet, ez az aszimmetria problémát jelentett. Az ionogrammokon nem vált szét megfelelően a rendes és extraordinális komponens.

Sajnálatos módon időközben a szonda tápegysége meghibásodott, ezért azt javításra Varsóba vissza kellet szállítani. A javítással egy időben több modult is kicseréltek a továbbfejlesztett változatokra, valamint a vezérlő szoftverekből is a legújabb verziókat telepítették. 2008 nyarán újra elindítottuk a szondát.

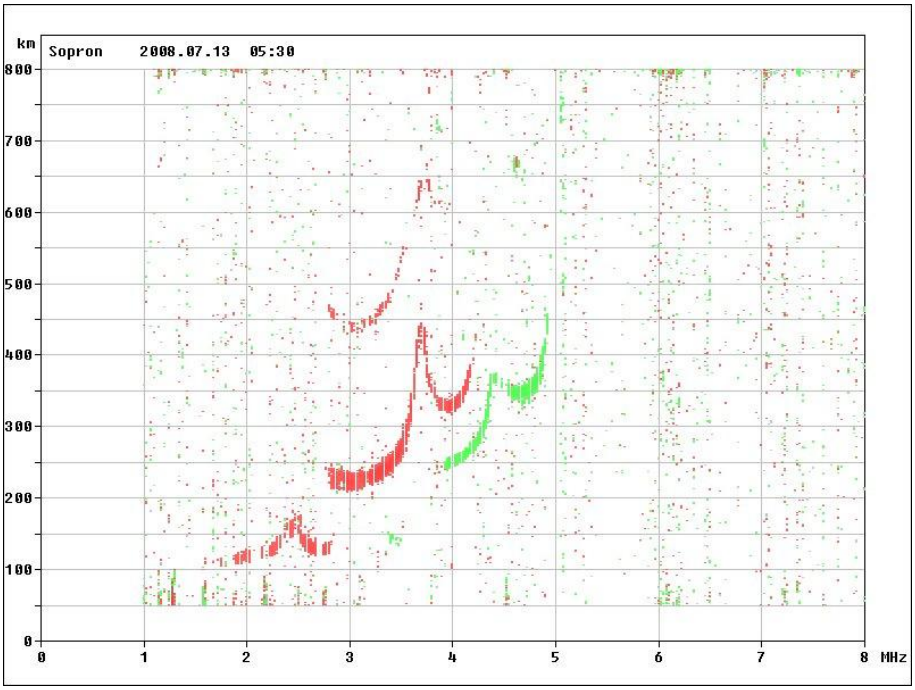
2008 őszén lehetővé vált az antennarendszer felújítása. Erre egyrészt a korrodálódott tartószerkezetek és vezetékek miatt volt nagy szükség, de a legfontosabb okot a már említett aszimmetrikus elrendezés kiküszöbölése jelentette. Az antennarendszer teljes felújítása után múlt év végén elkezdődhetett újra a kísérleti mérés. Mivel teljesen más méretű antennákat építettünk, újra kellett konfigurálni a szondát.

Az új antennákkal készített ionogrammok azt mutatják, hogy a korábbi problémák megszűntek, az ionogrammok alkalmasak arra, hogy automatikus és kézi feldolgozással kinyerjük belőlük a nemzetközi szabványoknak megfelelő paramétereket. A szonda 24 órán keresztül 30 percenként készít egy-egy

ionogramot. A feldolgozott adatokat az obszervatóriumi adatbázisban helyezzük el és interneten elérhetővé tesszük azokat.

Megtörtént az ionogrammok feldolgozásához szükséges szoftver adaptálása és beszereztünk az ionogrammok alapján történő elektronsűrűség-szelvény számításra alkalmas szoftvert is. Gondoskodtunk az ionogrammok archiválásáról és lépéseket tettünk az európai ionoszféraszondázó állomások szervezetéhez (DIAS) történő csatlakozásunk érdekében. A felsorolt előkészületek alapján 2009. január 1-gyel elkezdtük a rendszeres ionoszféraszondázást. Ami az ionogrammok minőségét illeti, azok megfelelnek a nemzetközi normáknak, sőt sok állomáshoz viszonyítva jobb minőségűek.

Az ionogrammok kiértékelése szempontjából a legkritikusabbak az ionoszféra rendkívüli (zavart) állapotával összefüggő állapotok. Ezekre az esetekre is felkészültünk a leggyakoribb rendkívüli állapotokat tükröző ionogrammok példatárának beszerzésével és alkalmazásával.



C9.1 ábra: Ionogramm a felújított ionoszondával 2008. július 13-án 05h 30m LT. Zöld a rendes és piros az extraordinárius jel

D) Felszínalatti elektromágneses kutatások

D10. Az éghajlatváltozás felszínalatti következményeinek elektromágneses jelei

A globális éghajlatváltozásnak, illetőleg mindenféle más környezeti hatásnak a felszínalatti fajlagos elektromos ellenállás időbeli változására vonatkozó következményeivel kapcsolatos kutatásaink során a fajlagos ellenállás-változás időbeli változásának nyomon követésére a nagycenki kastélyparkban 2006 tavaszán elektródarendszert állítottunk fel. Paraméter-érzékenységi kísérleteink a null-elrendezések tulajdonságainak jobb megismeréséhez vezettek. Numerikus modellezés alapján is úgy tűnt, hogy a legkifejezőbb ellenállásváltozási paraméterek a mellékelemekből számított tenzor-invariánsok, ezért a már működő monitorrendszer mellett a másik két rendszert az eredmények függvényében 2007-ben terveztük indítani. Az eredmények azonban – további módszerfejlesztés hiányában – értelmezhetetlenek maradtak. Ezért a hangsúlyt további elméleti tanulmányokra, modellezésre és inverzióra, valamint laboratóriumi és rövidebb idejű, de különböző körülmények közötti terepi kísérleti mérésekre helyeztük.

Az elméleti-modellezési-inverziós vizsgálatok során

– összeszedtük és rendszereztük az összes – az angol és orosz nyelvű szakirodalomban fellelhető – több mint egyszáz - felszíni egyenáramú elrendezést, és összeállítottuk az egyes alapelrendezések „családfáit";

– részletes geoelektromos paramétertérképeket készítettünk (nem csak az elektromos, hanem a mágneses komponensekre is), és megvizsgáltuk a térképeken az érzékenység eloszlását, a szimmetria viszonyokat, a pozitív, negatív és nulla érzékenységű tartományokat;

– egymással összehasonlítható számértékkel jellemeztük az összes olyan létező geoelektromos elrendezés vékonyréteg-kimutatásra vonatkozó kutatási mélységét, amelyre ilyen mennyiség egyáltalán számítható;

– vizsgáltuk kis átmérőjű, nagy vezetőképességű ható kimutathatóságának realitását, és az ún. MAN elrendezést találtuk a legjobbnak;

– megállapítottuk, hogy a terepi monitorozásnál (és egyáltalán: minden geoelektromos mérésnél) az elektródák pontatlan pozícionálásából eredő geometriai hibák minimalizálhatók, amennyiben az elektródákat a mérési vonalra merőlegesen távolítjuk el az ideális pozíciótól;

– lépéseket tettünk egyes null elrendezések (MAN) beépítésére a sokelektródás mérőrendszerbe;

– miután az összehasonlító kutatási mélység-vizsgálat a fókuszált elrendezésekre, a várakozással ellentétben, nem adott kiemelkedő értékeket, foglalkoztunk az áramfókuszálási eljárás leképezési tulajdonságaival is;

– kimutattuk, hogy – ahol lehetséges – érdemes az impedancia- ill. fajlagos ellenállástenzor invariánsait alkalmazni a leképezésre. Az első-, másod- és harmadrendű invariánsok leképezési tulajdonságait ötvenezer adaton elemeztük.

Terepi geoelektromos-elektromágneses méréseket-monitorozásokat végeztünk először a nagycenki kastélyparkban, majd az ún. Balfi tönkön. A Hidegvíz-völgyben, a kópházi törés térségében, a Fertő keleti (ausztriai) oldalán, Sopron város több eltemetett műtárgya fölött, Pilisszentkereszten, Sárisápon, a dunaszekcsői

magasparton, a bakonyi Homód-árokban pedig leképezési tulajdonságokat tesztelő terepi méréseket hajtottunk végre. Fontosabb eredmények:

– Kópházán bebizonyítottuk, hogy a VLF-EM módszer esetében a Hr komponenst mérve ugyanúgy ki tudtuk mutatni a mélytörést, mint a hagyományosan mért Hz komponens segítségével, ugyanakkor vannak olyan változások, amelyeket csak az Hr érzékel;

– a dunaszekcsői magasparton több elrendezéssel végzett geoelektromos repedésvizsgálat eredményei között rendkívül figyelemre méltó, hogy a nagyellenállású helyek jól korreláltak azokkal a helyekkel, ahol az elektródák beszúrásához kisebb erő volt elegendő. (Nyilván a lazult zónák jelentkeztek efféle módon.) A MAN elrendezést sikerrel alkalmaztuk többirányú repedésrendszerek vizsgálatában is, bebizonyítva többek között, hogy az komplex geológiai körülmények között is jól használható;

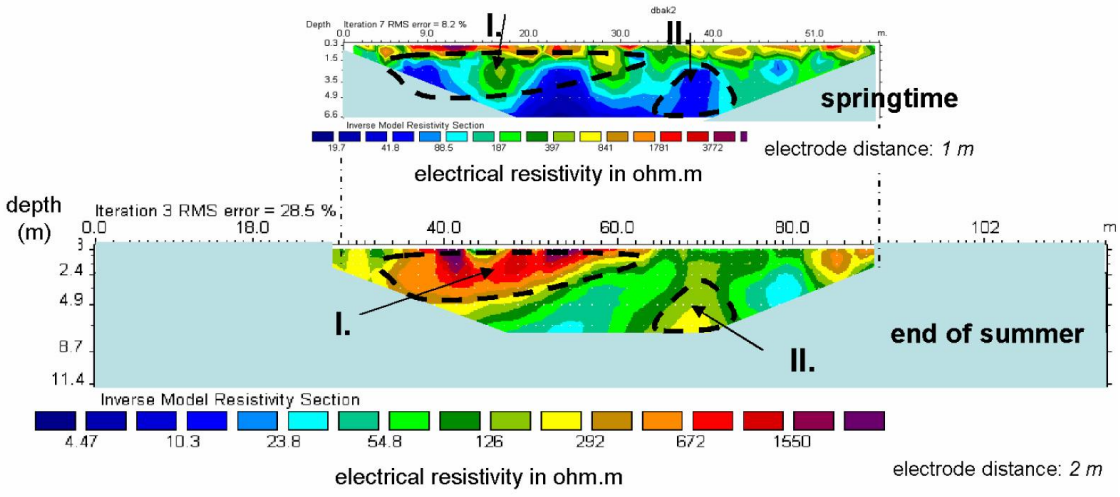
– három terepi mérés (Homód, Sárisáp és és Dunaszekcső) során is sikerrel próbáltuk ki a felszínközeli törmelékeloszlás mérésére kigondolt új technikánkat, amelynek a szúrópróba módszer (SZP, angolul pricking probe, PP) nevet adtuk;

– a Balfi tönkön (Szárhalom) felszín közeli karsztos területen két éven át időszakos monitorozásokat végeztünk. Összehasonlítottuk több különböző elrendezéssel, különböző évszakokban, különböző mélységtartományokra vonatkozó eredményeinket (részletes felszínközeli, kevésbé részletes mélységi felbontással). (Az eredmények rendkívüli zajérzékenyek.)

– a legérdekesebb geoelektromos monitorozás-jellegű eredményt a bakonyi Homód-árokban kaptuk. A D10.1 ábra a tavasszal és a nyár végén ugyanazon szelvény mentén sokelektródás elrendezéssel mért adatok inverzióját mutatja. A tavaszi időszak vízbő, tehát kis fajlagos ellenállású anomáliákkal jellemzett, a nyár vége ugyanakkor száraz, tehát nagy fajlagos ellenállású anomáliák a jellemzők. Az eddig is ismert volt, hogy a törések elektromos fajlagos ellenállása attól függ, hogy azok ki vannak-e töltve vízzel, vagy nem, de ekkora különbségre nem számítottunk.

Lehetséges alkalmazások: az éghajlatváltozás általános kérdéseihez kapcsolódóan a talajvíz- (beleértve karsztokat, de a növények vízfelvételét is), a régészeti kutatás, valamint az árvízvédelmi gátak állapot-vizsgálata, a szennyezett területek lehatárolása, a szennyező források helyének meghatározása és a szennyezés terjedési paramétereinek meghatározása.

Az e ponthoz végzett vizsgálatokat részben a K-049604 számú „Nem-konvencionális geoelektromos elrendezések” című OTKA-pályázat (témavezető: Szalai Sándor) is támogatta. Így a tervezettnél sokkal átfogóbb kutatásra nyílt lehetőség. A 61013 projektből elsősorban a terepi méréseket, diákok foglalkoztatását fedeztük. Az eredményekből TDK, diplomaterv és megkezdett PhD-munkaterv készült.



D10.1 ábra: Ugyanaz a fajlagos ellenállás-profil kétszer mérve: tavasszal (fent) ill. nyár végén (lent) (Homoród-árok, Bakony)

D11. A földkéreg gyenge zónáinak elektromágneses kutatása

A Kárpát-Pannon medence litoszférájának földtani-geofizikai sajátságait, köztük az elektromágneses indukciós módszerekkel (magnetotellurikus (MT), magneto-variációs (MV)) meghatározott elektromos vezetőképességének mélybeni eloszlását több gyűjteményes kötetben írtuk le, így a AAPG (Americal Association of Petroleum Geologists) Memoir 84-ben (Pospisil and Ádám, 2006; Pospisil et al., 2006; Bielik and Ádám, 2006), továbbá a Geological Society London által kiadott „European Lithosphere Dynamics, Memoirs 32-ben (Horváth et al., 2006).

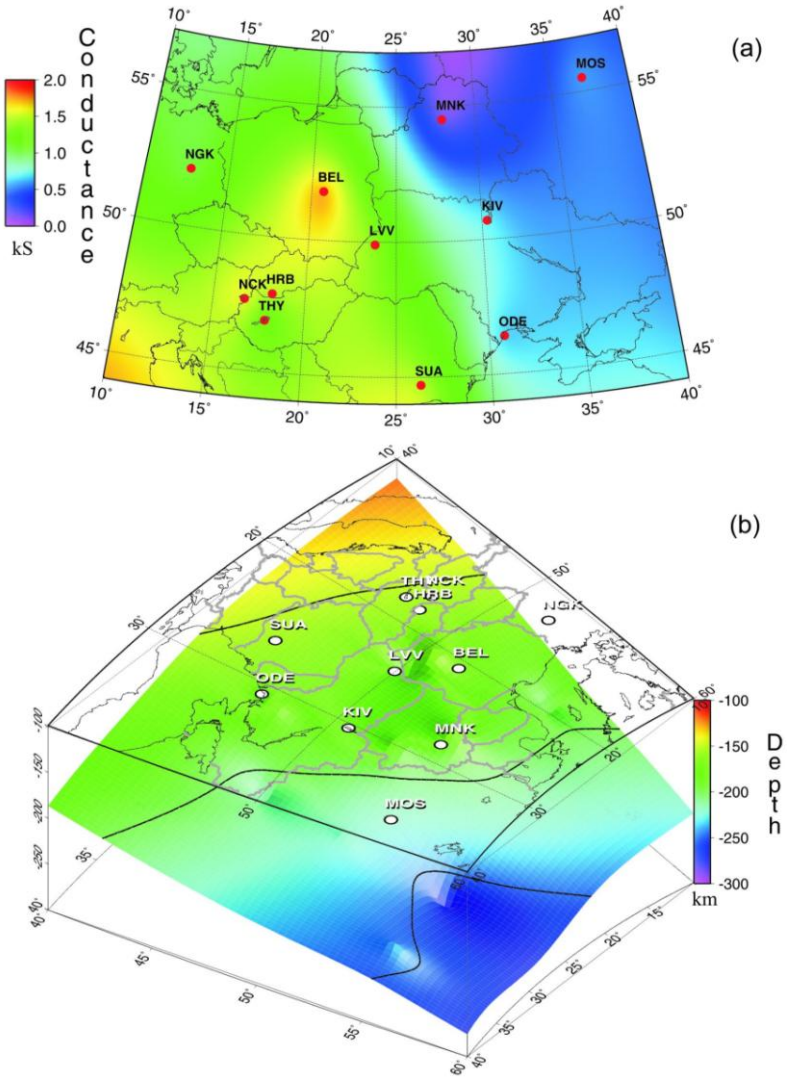
Behatóan foglalkoztunk a MT módszer adatfeldolgozási kérdéseivel a földbelsőről nyerhető legtöbb és legmegbízhatóbb információ elnyerése végett. Módszertani kísérleteink kiterjedtek a CEL-07 mélyszeizmikus vonal (az ország DNy-i részén, 72 MT pont) és osztrák területen a vonal folytatásában mért MT szondázásokra, továbbá a mintegy 300 pontos területi MT mérésre Nagyatád környezetében. Ez utóbbi lehetőséget adott egy 3D inverziós program kipróbálására is, valamint 2D szelvényekből felépített 3D szerkezeti kép megalkotására. Fokozott figyelmet szenteltünk és jelentős eredményeket értünk el az anomáliák megjelenítésére az MT impedancia invariánsaival (Szarka et al., 2006; Novák, Ádám, Szarka, 2006). Novák Attila doktorandusz az egyenáramú geoelektromos szondázásokra is adaptálta az MT megjelenítési technikákat, és PhD értekezésében részletes leírását adta eredményeinek (Novák, 2009). Régészeti kutatásokban ennek alkalmazására a pilisszentkereszti cisztercita kolostor maradványainak megtalálásában került sor (Varga, Novák, Szarka, 2008).

E témakörbe tartozik az a vizsgálatunk is, amely révén a CEL-07 által keresztezett 3D mélymedencék üledékvastagságát 1D inverziókkal közelítettük meg és kimutattuk e jelentős adatrendszerben a TM módusú szondázás hatékonyságát. A jólvezető tektonikai zónák kimutatásában viszont a TE módussal mért eredmények bizonyultak kifejezőbbnek (Ádám, Novák, Szarka, 2007). A TE módus világosan kirajzolta a Balaton- és a Közép-magyarországi tektonikai vonal gyenge zónáit, mint elektromosan jólvezető anomáliákat (Ádám, Novák, Szarka, 2005). A CEL-07 vonal osztrák szakaszán a nagyobb földtani formációk határán, így a Grazi-medence

peremén és az Északi Mészkőalpoknál kisebb tektonikai vonalakat indikáltunk MT-val (Ádám et al., 2008). Ezek az anomáliák lényegesen kisebbek mind vezető-képességüket, mind kiterjedésüket illetően, mint a CEL-07 hazai szakaszán elsőrendű töréseknél észleltek.

Eredménnyel zárult a nagy közép- és kelet-európai együttműködésben a nagy-mélységű MT és magnetovariációs szondázásokkal – mágneses obszervatóriumok adataival – végzett felső köpenykutatás, az ún. CEMES projekt Semenov vezetésével. A felső köpeny vezetőképességében határozottan kirajzolódik a TESZ-vonal, elválasztva az idős és hideg Kelet-európai táblát Európa fiatalabb (Fanerozoos) részétől (Semenov et al., 2008) (D11.1. ábra).

Változatlanul érdeklődésünk előterében áll a Dunántúli Vezetőképesség-anomália és kapcsolata a terület geodinamikájával, a földrengésekkel. A jólvezető grafitos képződmények, a karbon szerepét a törési felületek viszkozitásában és így a földrengések mechanizmusában Glover kanadai kutató kőzetvizsgálatai igazolni látszanak (Glover and Ádám, 2008).



D11.1 ábra: A felső köpeny horizontális vezetőképessége (conductance in kS) 50 és 200 km mélységben Közép-Európában (a) és az a mélység (üledék és kéreg nélkül), ahol a felső köpeny horizontális vezetőképessége eléri az 1kS-t (b) (Semenov et al., 2008)

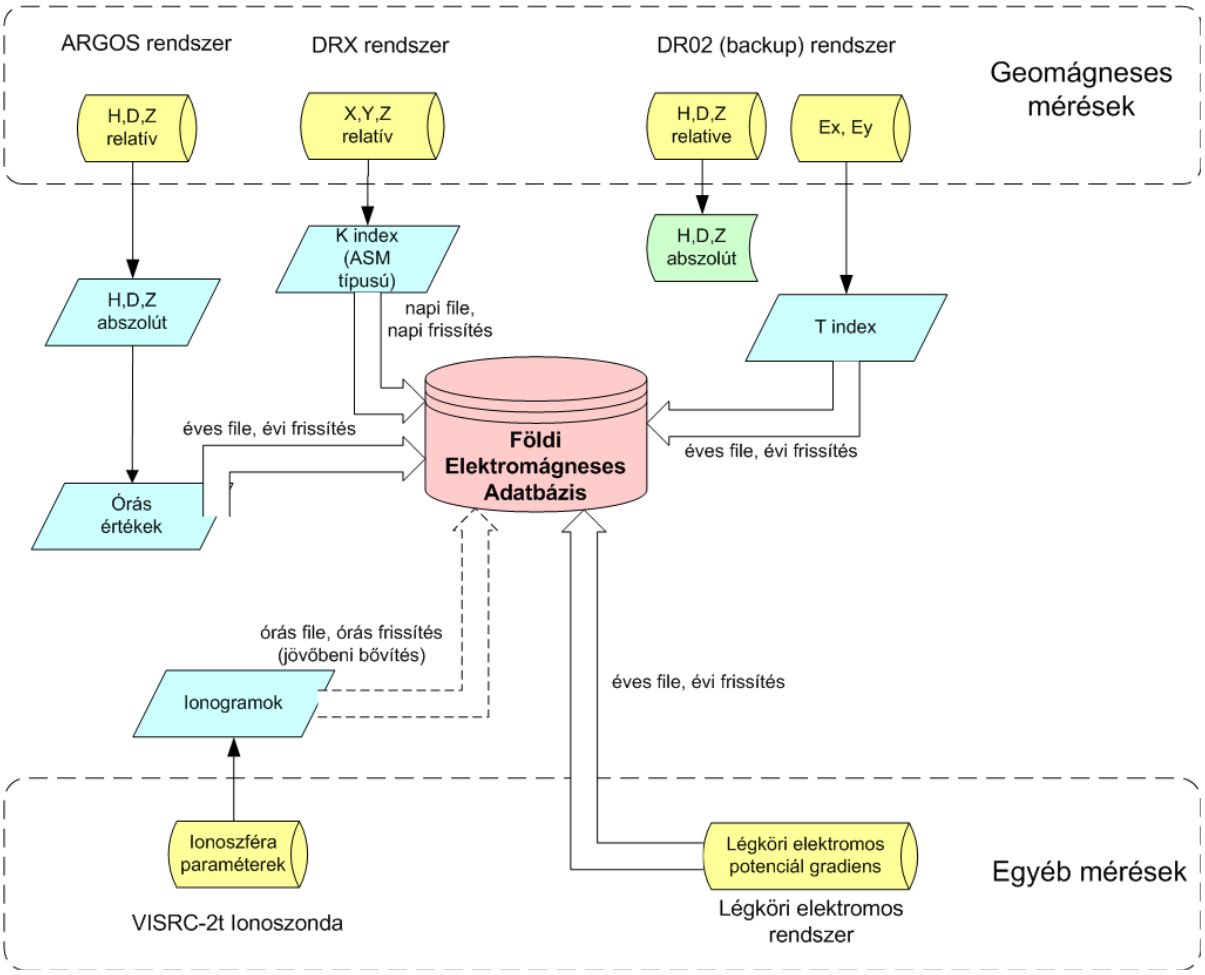
D12. Földi elektromágneses adatbázis multidiszciplináris célokra

A Föld körüli térség (ionoszféra-magnetoszféra rendszer) állapotát és az abban végbemenő magnetohidrodinamikai, plazmafizikai folyamatokat alapvetően a napszél (a Napból kilökődő töltött részecskék plazmaárama), illetve az ehhez kapcsolódó interplanetáris mágneses tér határozza meg és szabályozza. A napszél valamint a Föld mágneses tere közötti energiacsatolás rendkívül sokrétű és részleteiben máig nem tisztázott folyamatok révén valósul meg. E jelenségek vizsgálatában, a különböző földfizikai paraméterek folyamatos és hosszú időn keresztüli regisztrálása révén nagy szerepet kapnak a földi megfigyelőállomások.

A nagycenki obszervatóriumot 1957-ben, a Nemzetközi Geofizikai Évben alapították, elsősorban a földi elektromágneses tér megfigyelésére. A geomágneses és tellurikus mérések 1961-ben kezdődtek. Légköri elektromos potenciálgradiens és ionoszféria mérések 1967-től folynak. Az obszervatórium 1993-tól tagja lett az INTERMAGNET-nek (az obszervatóriumok globális hálózata, melynek célja a Föld mágneses terének monitorozása). Az utóbbi két évtizedben jelentősen bővült a megfigyelt jelenségek köre. A Föld ionoszféra üregrezonanciára jellemző Schumann-rezonancia mérése 1993-ban kezdődött, és 2003-tól folynak az ELF-VLF tartományban whistler-mérések, valamint 2008-tól szolgáltat adatokat a digitális ionoszonda.

Az utóbbi két évtizedben a mért paraméterek iránt az űrtechnológia részéről megnyilvánuló, egyre fokozódó érdeklődés, valamint a Föld-rendszer minél jobb megismerésének az igénye arra ösztönzött, hogy a megnövekedett adatmennyiséget olyan egységes rendszerbe foglaljuk össze, hogy azt a geofizikusok mellett más tudományterületek kutatói is hasznosíthassák. Ennek a folyamatnak az eredménye a Földi Elektromágneses Adatbázis (FEMA, www.fema.ggki.hu).

Az adattáblák geomágneses, légköri elektromos adatokat tartalmaznak az későbbiekben ismertetett formában. Az SQL adattáblák és a felhasználók közötti kapcsolatot (mint a keresés, lekérés, megjelenítés) PHP programok segítségével valósítottuk meg. Minden adattípushoz külön lekérdező ill. megjelenítő program készült, kiegészítve egyéb, a szerveren futó speciális részfeladatok elvégzésére írt szerviz programokkal (pl. a beérkező geomágneses adatfile-okból 3 órás K geomágneses aktivitási indexeket számító program, ill. a K indexeket az adatbázisba feltöltő segédprogram, stb.). A különböző obszervatóriumi méréseket (mérőrendszerek és mért adatok) valamint az adatbázisba kerülő adattípusokat a D12.1 ábra mutatja.



D12.1 ábra: Az obszervatóriumi mérések és az adatbázisba kerülő adattípusok

Az adatbázisban szereplő adattípusok

Órás geomágneses adatok

A geomágneses térerősség-vektor mérése a nagycenki obszervatóriumban két triaxiális fluxgate magnetométer segítségével történik, ezek az ARGOS és DRX rendszerek. A DRX rendszer 10 másodpercenként mér relatív X (földrajzi északi komponens), Y (keleti komponens), Z (vertikális komponens) értékeket, és az ezekből képzett 1 perc átlagokat továbbítja e-mailen naponta INTERMAGNET kompatibilis formában. (Tartalék rendszerként egy nagy stabilitású Bobrov-rendszerű magnetométer - PSM8711 - biztosítja a folyamatos mérést.)

Az ARGOS rendszer a H (horizontális komponens), D (deklináció) és Z (vertikális) komponenst méri. A variométer rendszer bázisvonala abszolút mérések segítségével állítható elő. Az I (inklináció) és D (deklináció) mérése fluxgate teodolittal történik, míg az F térerősség-vektor mérése Overhauser proton magnetométerrel. A hetente (esetenként gyakrabban) végzett abszolút mérések alapján meghatározott bázisvonalból és a H, D és Z komponensek perces relatív értékeiből számíthatók ki a komponensek abszolút értékei. A perces abszolút értékből órás átlagokat számolunk, s ez az adatsor évente frissül, mivel a bázis csak időeltolással határozható meg.

Adatjellemzők:

Adatforrás	MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium
Adatfile elérhetősége	letölthető *
Adatfile típusa	ASCII
Adattartomány	1994.01.01 – 2008.12.31.
Grafikus megjelenítés	igen
Adattábla tartalma	- az egyes komponensek órás értékei

* csak regisztrált felhasználók számára

Az órás geomágneses adatok lekérdezése során egy maximum 2 hónap terjedelmű időszak órás értékeit (H, D, Z komponensek) lehet (futásidőben létrehozott) grafikon formájában megtekinteni (D12.2 ábra), valamint lehetőség van a havi adatfile-ok letöltésére.

K geomágneses aktivitási index

A K index a mágneses aktivitás 3 órás kvázi-logaritmikus helyi indexe (a regisztrálás helyére jellemző feltételezett nyugodt napi görbére vonatkoztatva). Értéke logaritmikus skálán 0 és 9 között változhat. A K index értékek a DRX rendszer által mért mágneses komponensek perces értékeiből kerülnek meghatározásra, így az adatsor napi frissítésű.

Adatjellemzők:

Adatforrás	MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium
Adatfile elérhetősége	letölthető *
Adatfile típusa	ASCII
Adattartomány	2007.04.22 – től folyamatos
Grafikus megjelenítés	igen
Adattábla tartalma	- napi adatfile-ok - 3 órás index értékek

* csak regisztrált felhasználók számára

Lekérdezési lehetőségek: a napi adatfile-ok megtekintésén és letöltésén túl választható a napi összegek egy megadott dátumtartomány szerinti megjelenítése, valamint az indexosztályok szerinti lekérdezés (D12.3 ábra).

T tellurikus aktivitási index

A természetes elektromos tér (telluráramok) mérése észak-déli (Ex) és kelet-nyugati (Ey) irányban 500 méteres elektród-távolságokkal történik. Az elektródok kis polarizálhatóságú ólom elektródok, melyek 2 m-re vannak elásva a talajfelszín alatt. A tellurikus adatokat (Ex és Ey) a DR02-es digitális rendszer regisztrálja, ezekből

kerül meghatározásra a 3 órás T tellurikus aktivitási index. Az index lineáris skálájú (1.8 mV/km a lépték), értéke 0 és 9 között változik.

A T index 2004-ig helyi idő szerint került kiszámításra, 2005-től viszont UT szerint határozzuk meg.

Adatjellemzők:

Adatforrás	MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium
Adatfile elérhetősége	letölthető *
Adatfile típusa	ASCII
Adattartomány	1994.01.01 – 2008.10.31.
Grafikus megjelenítés	Igen
Adattábla tartalma	- 3 órás index értékek - napi összegek

* csak regisztrált felhasználók számára

Lekérdezési lehetőségek: napi összegek és előfordulási gyakoriság diagramok (D12.4 ábra) egy megadott dátumtartomány szerinti megjelenítése, valamint indexosztályok szerinti lekérdezés.

Légköri elektromos potenciálgradiens adatok

A vertikális légköri elektromos tér egyenáramú komponensének lassú változásait a föld és egy a felszín fölött 1 m magasságban lévő elektród között mérik. Az elektród körüli potenciált egy radioaktív kollektor egyenlíti ki. A légköri elektromos potenciálgradiens mérési gyakorisága 15 másodperc, és az órás átlagértékek szerepelnek az adatbázisban.

Adatjellemzők:

Adatforrás	MTA Széchenyi István Geofizikai Obszervatórium
Adatfile elérhetősége	letölthető *
Adatfile típusa	ASCII
Adattartomány	2005.01.01 – 2007.12.31.
Grafikus megjelenítés	igen
Adattábla tartalma	- órás potenciálgradiens értékek

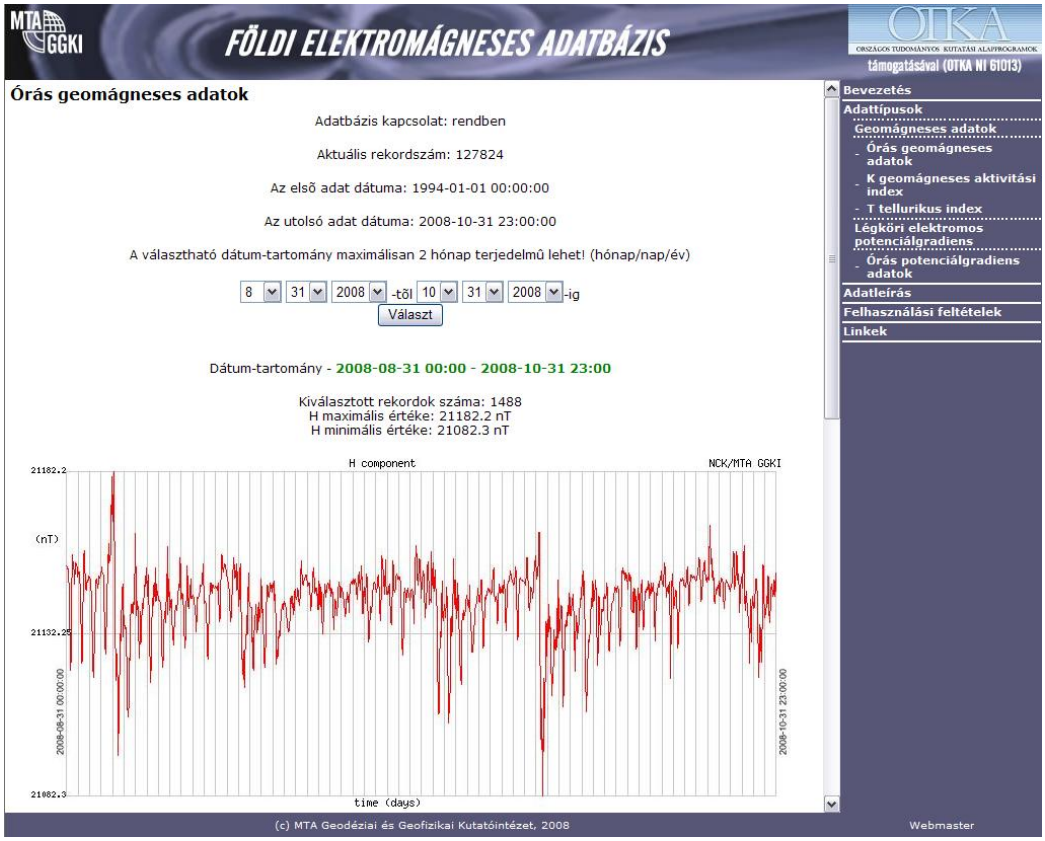
* csak regisztrált felhasználók számára

A légköri elektromos potenciálgradiens adatok esetében egy megadott dátumtartomány szerinti megjelenítésre nyílik lehetőség (D12.5 ábra).

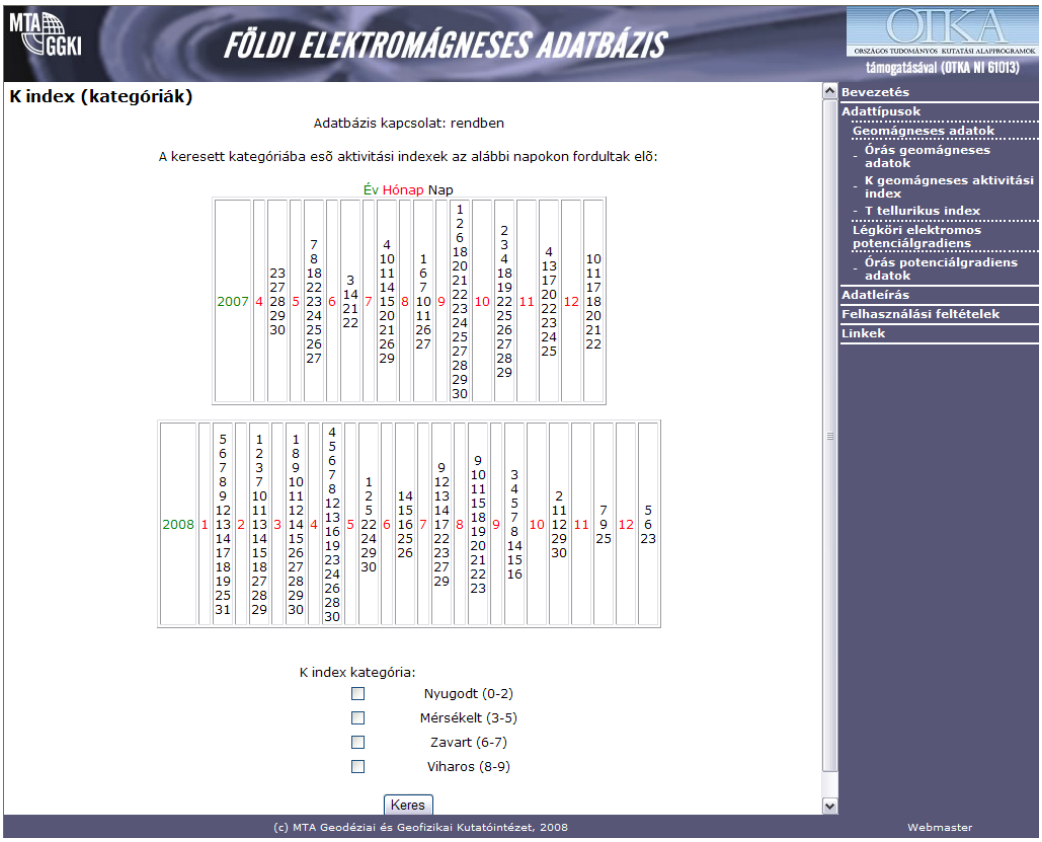
Megjegyzés az adatbázis használatához: az adatsorok grafikus reprezentációi szabadon megtekinthetők, de az adatfile-ok letöltése csak előzetes regisztráció után lehetséges. Az adatok és grafikonok felhasználásáról a fema.ggki.hu/terms_en.htm oldalon található adatvédelmi szabályzat rendelkezik. A felhasználók regisztrálása

nem automatikus, egyedi elbírálás alapján történik. Az OTKA számára külön felhasználói nevet és jelszót biztosítottunk az adatbázis szolgáltatásainak teljes körű megismeréséhez:

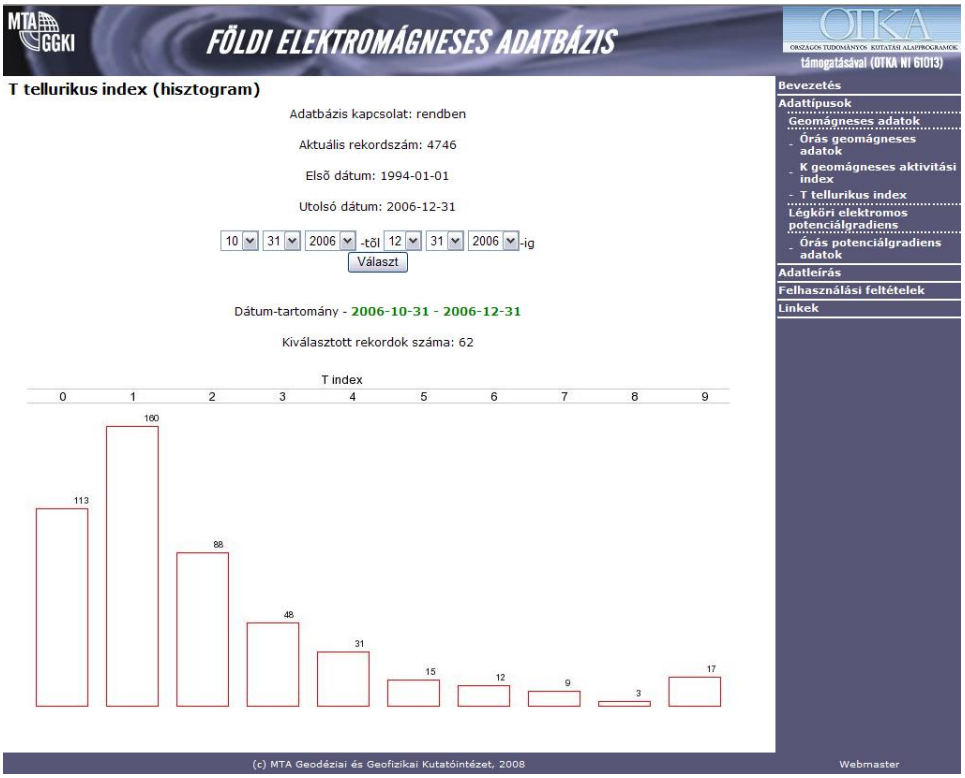
felhasználónév: otka
jelszó: .otka.



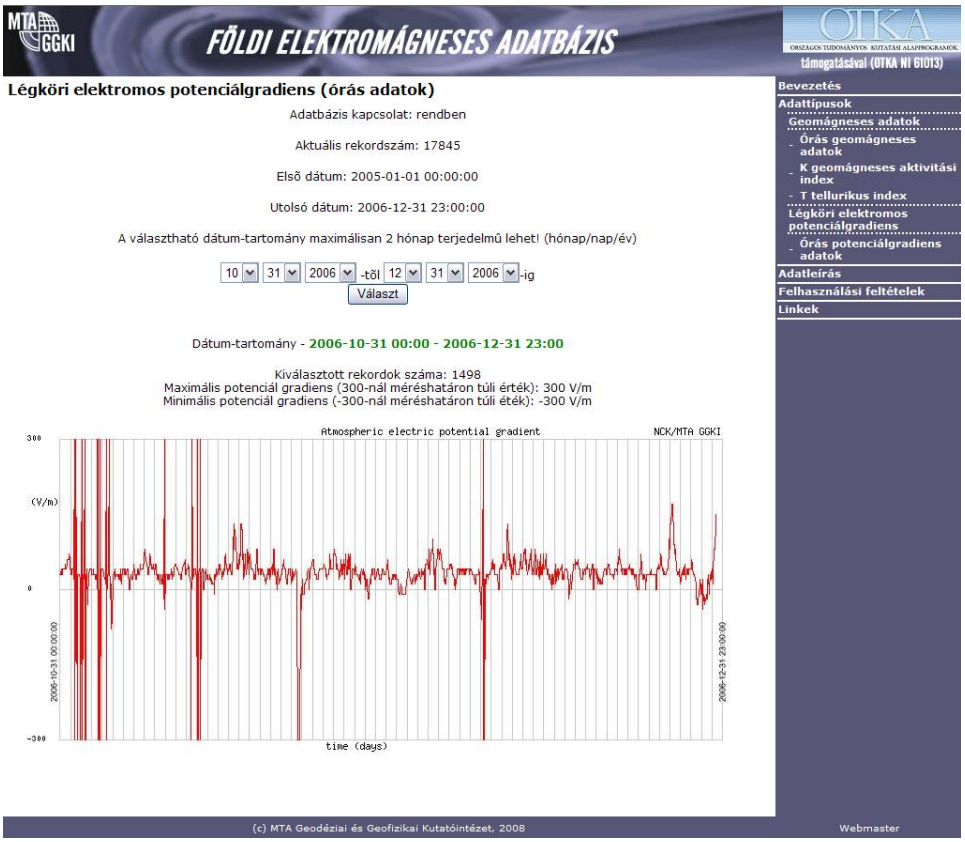
D12.2 ábra: Az órás geomágneses adatok megjelenítése



D12.3 ábra: A K index kategóriák szerinti lekérdezése



D12.4 ábra: Egy megadott dátumtartományba eső T index értékek előfordulási gyakorisága



D12.5 ábra: A légköri elektromos potenciál-gradiens adatok megjelenítése