

# FELSŐLÉGGKÖRI KUTATÁSAINK AZ ŰRKUTATÁS HAJNALÁTÓL NAPJAINKIG

Illés Erzsébet

a fizikai tudomány kandidátusa, tud. főmunkatárs  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete  
illes@konkoly.hu

Almár Iván

a fizikai tudomány doktora, tud. tanácsadó  
MTA KTM Csillagászati Kutatóintézete  
almar@konkoly.hu

## Bevezetés

1957 nyarán a Szovjet Tudományos Akadémiától levél érkezett az MTA-nak, amelyben felkérték Magyarországot a Nemzetközi Geofizikai Év keretében felbocsátandó szovjet mesterséges holdak optikai követésére. Egyúttal felajánlották, hogy a megfigyelésekhez átadnak negyven darab AT–I jelzésű kis távcsövet is. Az MTA a Csillagvizsgáló Intézethez és annak akkori igazgatójához, Detre Lászlóhoz fordult. A feladatot az intézetnek nyilván el kellett vállalnia, annak ellenére, hogy az égen gyorsan haladó égitestek (kisbolygók, üstökösök) pozícióinak megfigyelése akkor igen távol állt az intézet asztrofizikai orientációjától. A még gyorsabban haladó műholdak megfigyelésében pedig 1957 októbere előtt még senkinek nem lehetett semmiféle tapasztalata.

A megfigyelőhálózat megszervezésére Almár Iván kapott megbízást. 1957 végén már folytak megfigyelési kísérletek az intézet főépületének tetőteraszáról, s megkezdődött a vidéki állomások kiválasztása és felszerelése is. Kevéssel később, ötven évvel ezelőtt, 1958-ban már megkezdődött, és szolgálatyszerűen folyt az átvonuló szovjet szputnyikok égi pozícióinak rögzítése Budapesten, majd Baján, Szom-

bathelyen és évekkel később Miskolcon is. Az előrejelzéseket táviratilag kaptuk a moszkvai központtól, és eredményeinket is kódolt táviratokban küldtük Moszkvába.

Ez időben a megfigyelési technika és a módszerek javítása volt napirenden. Az első tudományos közlemény, amely a magyar megfigyelők által alkalmazott új módszerre vonatkozott, Almár Iván *A 2. szputnyik földárnyékba való belépésének megfigyelése pontos térbeli helyzetének meghatározása céljából* című cikke volt, amely az *Asztronomiczeszkij Cirkulár* 1958. május 26-i számában jelent meg. Tudomásunk szerint ez volt az első, kifejezetten a mesterséges holdakhoz kapcsolódó, idegen nyelvű tudományos célú írás Magyarországról. A *Magyar Tudomány* ugyancsak 1958-ban közölte első, az űrkorszak kezdetéhez kapcsolódó cikkét (Almár, 1958).

Az előrejelzések pontosságának növekedése és a megfigyelések technikai feltételeinek jelentős javulása (TZK binokuláris távcsövek félig automatizált változatainak bevezetése, az időpontok rögzítésének korszerűsítése stb.) következtében egyre több viszonylag pontos (tized fok, illetve tized másodperc pontosságú) megfigyelés gyűlt össze Magyarországon, illetve természetesen más, együttműködő országokban is. Az 1960-as évek elején már

nyilvánvaló követelménnyé vált ezek közös értékelése és tudományos hasznosítása – a szovjet pályaszámító központ igényeinek kielégítésén túl. A régióban elsőként az Ill Márton által kezdeményezett INTEROBS-program tett kísérletet ilyen feldolgozásra, a műholdpályának közvetlenül a megfigyelésekből történő levezetésére, majd a keringési idő változásából a fékező felsőlégkör sűrűségének meghatározására. Ezt követően számos további javaslat született arra, hogy miként lehetne speciális (vizuális) műholdmegfigyelésekkel a felsőlégkörre vonatkozó, hasznos ismeretekhez jutni. Mi magunk is kezdeményeztünk több ilyen új eljárást, illetve elkezdtünk – az akkori primitív számítástechnika hazánkban rendelkezésre álló eszközeit is bevetve – korszerű feldolgozó programokat készíteni (*Illés Erzsébet és Horváth András*).

Az 1960-as évek végén a műholdmegfigyelések és a szovjet és amerikai műholdak pályadatai már gyakorlatilag mindenki számára hozzáférhetőek voltak. Magyarország mint az Interkozmosz-program tagállama is publikálta megfigyeléseit, és megkapta azokat is, amelyeket más programok keretében hajtottak végre. Egyre aktuálisabbá vált az a probléma, hogy milyen célra és hogyan dolgozzuk fel a rendelkezésre álló megfigyelési anyagot. Ott, ahol nagyobb pontosságú, fotografikus, később lézeres megfigyelések álltak rendelkezésre, a geodéták kezdeményezték a Föld pontos alakjának levezetését bizonyos pályaelemek változásai alapján. Ehhez azonban nagyteljesítményű számítógépekre is szükség volt, amilyenek hazánkban akkor még nem működtek. Maradt a másik, hasonlóan ígéretes feladat: a felsőlégkör sűrűségének, hőmérsékletének, esetleg kémiai összetételének vizsgálata sok hold segítségével, de a megfigyelési technika és a számítástechnika

területén kisebb elvárásokkal. Ésszerű döntés volt, hogy mi is a felsőlégköri modellek vizsgálatával, ellenőrzésével kapcsolatos lehetőségekre koncentráltunk.

Az 1970-es évek elején már egyre jobb felsőlégköri modellek álltak rendelkezésre világszerte. Elsősorban *Luigi Jacchia* amerikai tudós nevét kell megemlíteni mint az első, igazán használható modellek kidolgozóját. Ezekből jött létre a CIRA, vagyis a COSPAR nemzetközi referencialégkörök sorozata – később MSIS néven is szerepelt, pl. MSIS'86 = CIRA'86 (Rees – Fuller-Rowell, 1988), amely már annyira tökéletesnek látszott, hogy a korábban e területen dolgozó sok kutatócsoport abba is hagyta a műholdak pályaváltozásain alapuló felsőlégköri vizsgálatokat, mert nem látott lehetőséget a továbblépésre.

A mi kis kutatócsoportunk a Csillagvizsgáló Intézetben más állásponton volt. Úgy láttuk, hogy ezek a felsőlégköri modellek *általánosságban jók* ugyan, de különleges esetekben, például *napkitörések által kiváltott geomágneses viharok idején nem* írják le megfelelően a felsőlégkör sűrűségének a beérkező naprézecske-áram hatására bekövetkező megnövekedését. Más, ugyancsak nehezen magyarázható anomáliákat is találtunk, és a további években ezekre koncentráltuk kutatásainkat. Az 1980-as évekre – nemzetközi együttműködés keretében – már hozzáférhetővé váltak olyan *in situ* sűrűségmérések is, amelyet francia és olasz műholdak fedélzeti műszerei hajtottak végre. Ezek a mérések igen gyakoriak és pontosak voltak ugyan, de tekintve a kérdéses műholdak speciális, az egyenlítőhöz közeli pályáit és viszonylag rövid élettartamát, csak bizonyos feladatok vizsgálatára voltak alkalmasak. Mi igyekeztünk éppen ezekre koncentrálni, ugyanakkor nem feledkeztünk el arról a rendkívül gazdag megfigyelési anyag-

ról sem, amely évtizedek alatt a különböző magyar és külföldi követőállomásokon gyűlt össze. Felhasználtuk és továbbfejlesztettük a rendelkezésre álló számítástechnikai programokat is. Főbb eredményeinket az alábbiakban foglaljuk össze.

#### *A nemzetközi felsőléggöri modellek*

Már az 1960-as évek elejére világossá vált, hogy a Napon lejátszódó változások és a Nap-Föld geometria határozza meg, hogy a Napból jövő elektromágneses sugárzás és részecskeáram milyen változásokat idéz elő a felsőléggöri körben. A geometria változásából következően a Föld Nap körüli pályáján való végighaladás az excentricitás és a tengelyhajlás miatt éves és szezonális változást, a Föld tengely körüli forgása napszakos, a Nap tengelyforgása 27 napos, a naptevékenység változása kb. tizenegy éves (huszonkét éves?), illetve random jelentkező változásokat idéz elő. A geometria miatti változásokat a különböző ciklushosszak miatt könnyen szét lehetett választani, és le lehetett írni, a naptevékenység okozta változások azonban nehezebben megfoghatóknak bizonyultak. Annál is inkább, mert a felsőléggöri ható elektromágneses sugárzás egy része nem jut le a Föld felszínére, így nem áll folyamatosan a modellszámítások rendelkezésére. A már a 60-as években a Föld körül keringő holdak méréseiből elég jó korreláció látszott a Nap ultraibolya (UV-) és extrém ultraibolya (EUV-), valamint a Föld felszínén is mérhető 11 cm-es rádiósugárzása között, így ezt a paramétert használták a modellekben a naptevékenységből adódó UV- és EUV-sugárzások okozta sűrűségváltozások jellemzésére ( $S_{10,7}$  vagy  $F_{10,7}$  jelzéssel).

A korpuszkuláris fűtés okozta változások leírására pedig az *Ap* geofizikai paramétert használták, ugyanis a hirtelen megjelenő,

nagy sűrűségváltozásokról hamar felismerték, hogy geomágneses viharok idején lépnek fel. Az *Ap* planetáris geomágneses index, amelyet az aurora-övezet környékén elhelyezkedő több geofizikai állomás méréseiből határoznak meg, pedig éppen a geomágneses viharok erősségét jellemzi. Hogy ezt a geomágneses viharok idején fellépő sűrűségváltozást hamar fel lehetett ismerni, abban nagy szerepe volt annak a szerencsés véletlennek, hogy az első szputnyikok felbocsátása idején szokatlanul erős naptevékenységi maximum volt, és az azt követő években voltak a rekord erősségű geomágneses viharok. Ekkor már több mesterséges hold keringett a Föld körül, tehát több magasságban, párhuzamosan lehetett látni a hirtelen fellépő, nagy fékeződést.

#### *A gyűrűáramfűtés felfedezése*

A Konkoly Obszervatórium budapesti Szputnyikmegfigyelési Csoportjában a földi felsőléggöri sűrűségváltozásaira vonatkozó kutatásainkat saját megfigyeléseink alapján a modellek kontrolljával kezdtük. Miután láttuk, hogy a fotografikus észleléseknél pontatlanabb, de nagyon nagy számú vizuális észleléseink a legnagyobb és előre jelezhetetlenül jelentkező sűrűségváltozások követésére sokkal alkalmasabbak lehetnek, mint a már viszonylag elég jól leírt egyéb változások vizsgálatára, úgy döntöttünk, hogy az előbbieket vizsgálatát tűzzük magunk elé célként. Bár az akkori megfigyelési és számítástechnikai eszközeink nem voltak egy szinten a nyugati világ obszervatóriumainak lehetőségeivel, de célunk mégis az volt, hogy a COSPAR kongresszusain bemutatott legjobb felsőléggöri modelleket (Jacchia modelljei, CIRA, MSIS) ellenőrizzük és javítsuk.

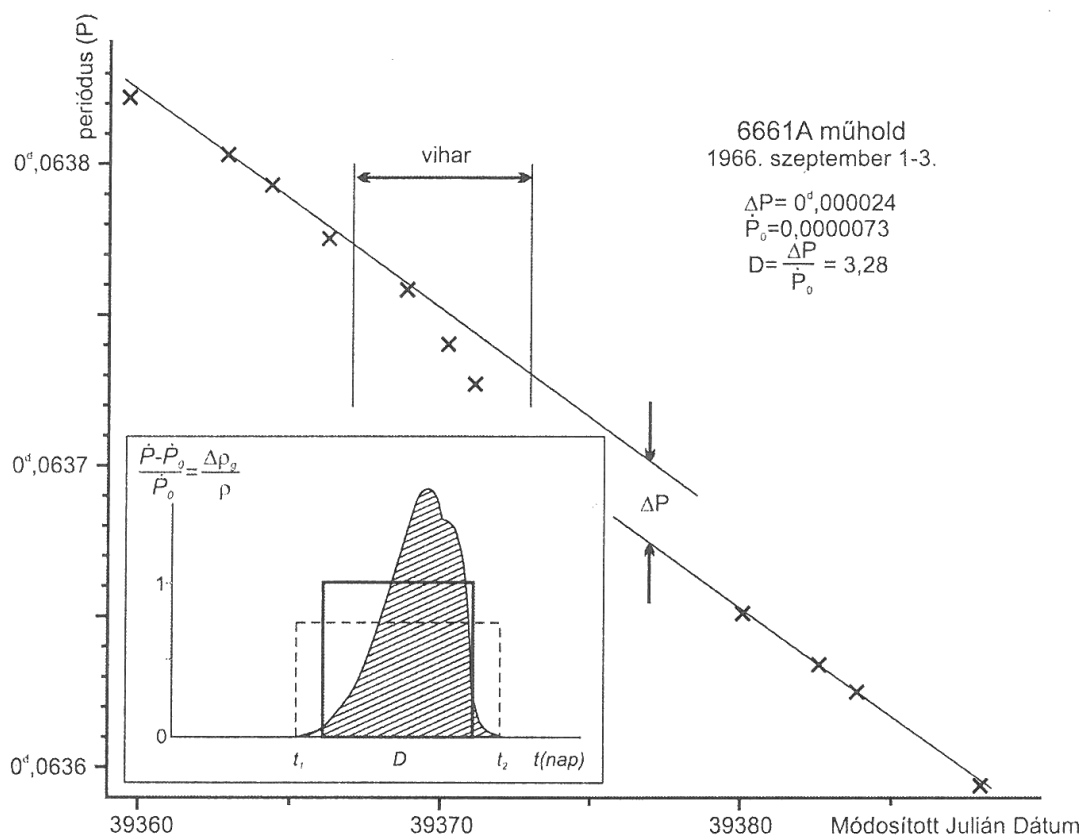
Az órák vagy egy-két nap alatt lezajló geomágneses légsűrűség-növekedések esetében

azonban a vizuális megfigyeléseknek nemcsak a pontossága, de az időfelbontása sem volt elegendő arra, hogy a légsűrűség és a hőmérséklet gyors időbeli változásait követni lehessen. Ugyanis csak nagyon ritka esetben sikerült egymás utáni átvonuláskor megfigyelni egy-egy szputnyikot (ami 1,5 órás időfelbontást jelent a periódusgörbén), jó esetben ez naponta (ami egynapos időfelbontás), de néha csak többnaponta sikerült.

Almár Iván, aki korábban csillagspektroszkópiával is foglalkozott, felismerte, hogy az ott az abszorpciós színekvonalak osszintenzitásának jellemzésére használt *ekvivalens szélesség* paraméter nagyon jól általánosítható a geomágneses vihar alatt létrejövő sűrűségváltozás-görbe alatti integrál meghatározására, amely a vihar által kiváltott össz-sűrűségváltozást jellemzi. Az általa kidolgozott módszer

pedig az, hogy, ha a geomágneses vihar előtti és utáni nyugalmi időszakban meghatározzuk a periódusgörbét – ami nyugalmi időszakban egyenletesen csökkenő, vagyis lefelé tartó egyenes – akkor a periódus hirtelen esésének mértéke a vihar előtti szintről a vihar utáni szintre adja ezt az integrált (*I. ábra*). A modellértékekkel összehasonlítva látjuk, hogy hol és mikor kell a modellt javítani.

Az 1960-as évektől az 1970-es évek közepéig Illés Erzsébet vezetésével mintegy hatvan szputnyikmegfigyelő állomás tizenkét évnyi megfigyelési anyagából kikerestük a geomágneses viharok körüli megfigyeléseket, digitalizáltuk, és az általunk írt számítógépi programokkal feldolgoztuk. Ehhez a magyar hálózat megfigyelésein kívül felhasználtuk egész Eurázsia megfigyelési hálózatának anyagát: angol, francia, finn, német, lengyel, román,



*I. ábra* • A  $D$  meghatározásának módszere egy geomágneses vihar okozta perióduscsökkenés példáján bemutatva (Inzertben a  $D$  ekvivalens időtartam definíciója.)

bulgár és a volt Szovjetunió összes megfigyelő-állomásait is. Ezeket ekkoriban csak nyomtatásban tették hozzáférhetővé az egyes állomások. A többmillió adatból 89 ekvivalens időtartamot ( $D$ ) sikerült meghatározni, amelyek a jelentős számú (34) mesterséges hold különböző magasságokban történt fékezése miatt a modellhibák magasságfüggésére engedtek következtetni. A  $D$ -értékekből vezettük le, hogy főleg 200–300 km között a modellek nagyon alábecsülik a sűrűségváltozásokat geomágneses viharok idején, néhol több száz százalékkal is. Hogy ez milyen lényeges, az akkor derült ki, amikor a Skylab űrállomás élettartama lényegesen rövidebbnek bizonyult, mint amennyit a szokásos felsőlégtéri modellek alapján számoltak, vagyis a vártnál sokkal hamarabb fékeződött le, és égett el a légkörben.

A több mesterséges hold párhuzamos mérése nemcsak a magasságfüggést, de a földrajzi szélességtől és a napszaktól való függés vizsgálatát is lehetővé tette. Észrevettük, hogy az éjszaka közepén mindig van egy, a nappalihoz képest kisebb sűrűségi maximum a maradékokban (2. ábra), amely sokkal erőteljesebb geomágneses viharok idején. Nagyobb földrajzi szélességek felé a maximum nagysága csökken, és fázisban is későbbi helyi időre tolódik át. A geomágneses szempontból nyugodt időben megjelenő éjféle sűrűség-növekedést – amit egyébként mások is megtaláltak – egy, a szubszoláris pontból radiálisan kiinduló szelek által kiváltott kompressziós fűtésnek tulajdonítottuk. A viharok alatt felépő, megnövekedett amplitúdójú maximumnak viszont tovább kerestük az okát.

Ebben sokat segített a MANT (Magyar Asztronautikai Társaság) által 1972 óta évente, majd később két évente szervezett Ionoszféra–Magnetoszféra Szeminárium (a sorozat azóta

is létezik), amelyen geofizikus, fizikus, meteorológus, ionoszféra-kutató, napfizikus és csillagász kollégákkal együtt vettünk részt, hogy egymással ismertessük az intézeteinkben folyó, az űrkutatással kapcsolatos tevékenységünket. Többek között Verő József, Szemerédy Pál, Abonyi Iván, Tarcsay György, Benkó György, Varga András és legfőképpen Bencze Pál (akivel tartós együttműködés is kialakult) a magnetoszférát, a bolygóközi teret és a galaktikus kozmikus sugárzást tárgyaló előadásai alapján ismertük fel, hogy a modellmaradékokban talált maximumoknak a helyi időben elfoglalt helyei (3. ábra) arra utalnak, hogy a geomágneses viharok idején létrejövő sűrűség-növekedésnek nem csak az aurora-övezet lehet a forrása, ahogy ezt a modellek feltételezik, és az  $Ap$  indexszel leírják.

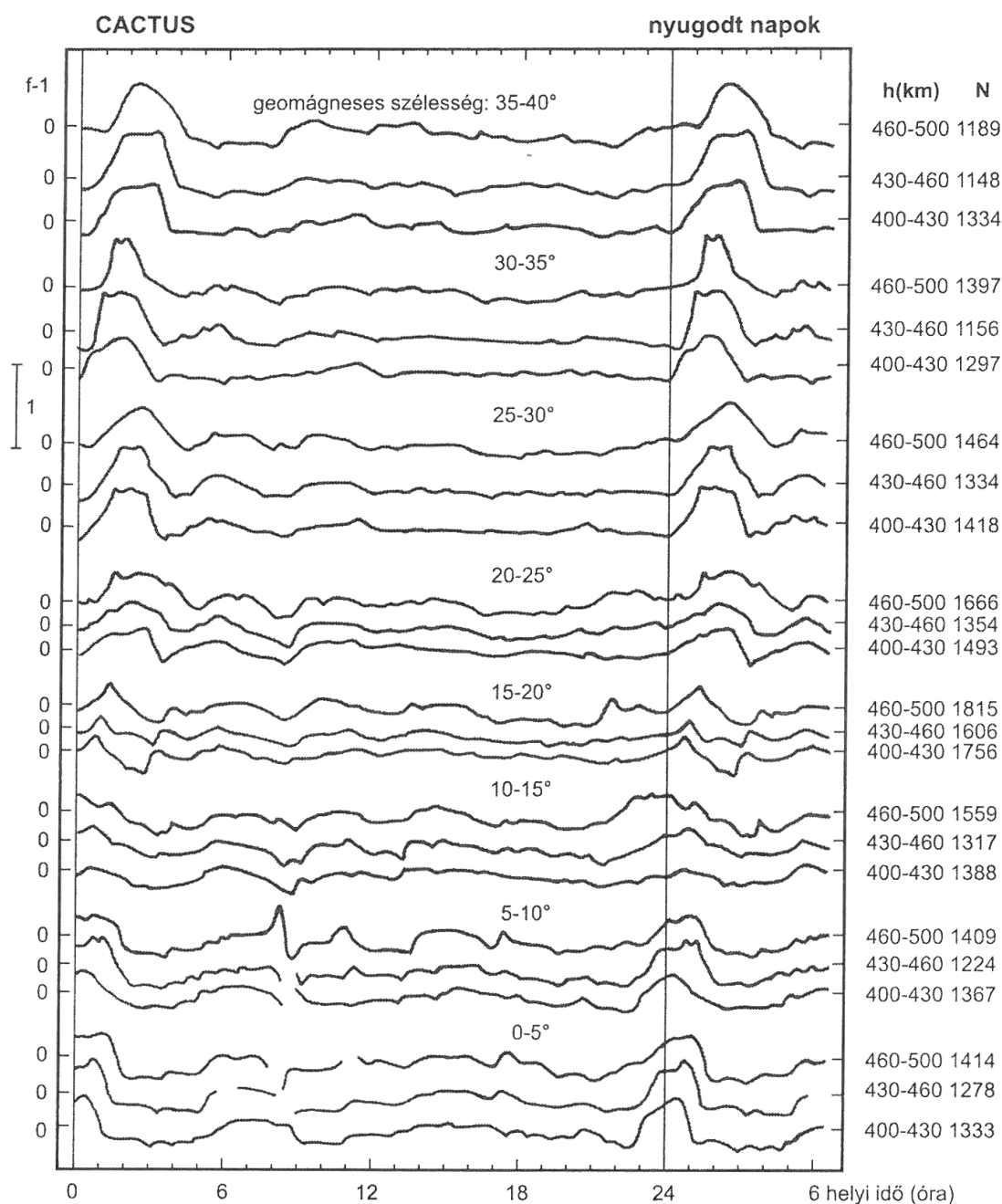
Legalább húszféle geofizikai és bolygóközi paramétert vizsgáltunk meg mind a modell-leírás, mind a jelenség mögötti fizika megértése érdekében. Azt találtuk, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás Deep Riverben mért beütésszáma ( $C_{DR}$ ) önmagában jobb paraméter lenne a felsőlégtéri sűrűségének leírására, mint az addig használt  $S_{10.7}$  és  $Ap$ . Ez arra utalt, hogy a bolygóközi térben a napszéllel terjedő zavarok, amelyek a kozmikus sugárzás részecskéit is szétszórják, és ezzel csökkentik a Föld felszínén mért beütésszámukat is (Forbush-csökkenések), okozhatják az általunk talált többsűrűség-effektust.

Tehát a geomágneses viharok környékét kezdtük részletesebben vizsgálni. Kiderült, hogy viharok után a sűrűséggörbe nem tér azonnal vissza a nyugalmi szintre, ahogy ezt az  $Ap$  görbe alapján várnánk, hanem még kb. egy hétig magasabban marad (4. ábra). Ez azt eredményezi, hogy a viharok előtti és a viharok utáni időkben ugyanazon  $Ap$  értékhez más sűrűségérték tartozik: a sűrűség az  $Ap$  kétér-

tékü függvénye, tehát az  $A_p$  önmagában nem alkalmas a geomágneses effektus leírására.

Ez vezetett annak a felismerésére, hogy az aurora-fűtés mellett kell, hogy legyen egy másik forrása is a magnetoszférán keresztül a napszélből megcsapolt energiabetáplálásnak. A talált effektusok a következők voltak: a

földrajzi szélességtől való függés – a nagyobb maradókkal az egyenlítőnél –, az éjjeli éles maximum és a hatórás helyett csak kétórás időközés a  $Dst$  indexhez képest. A Bencze Pállal folytatott diszkussziók révén jutottunk arra a következtetésre, hogy a gyűrűáramból kiszóródó részecskék (a napszélből származó

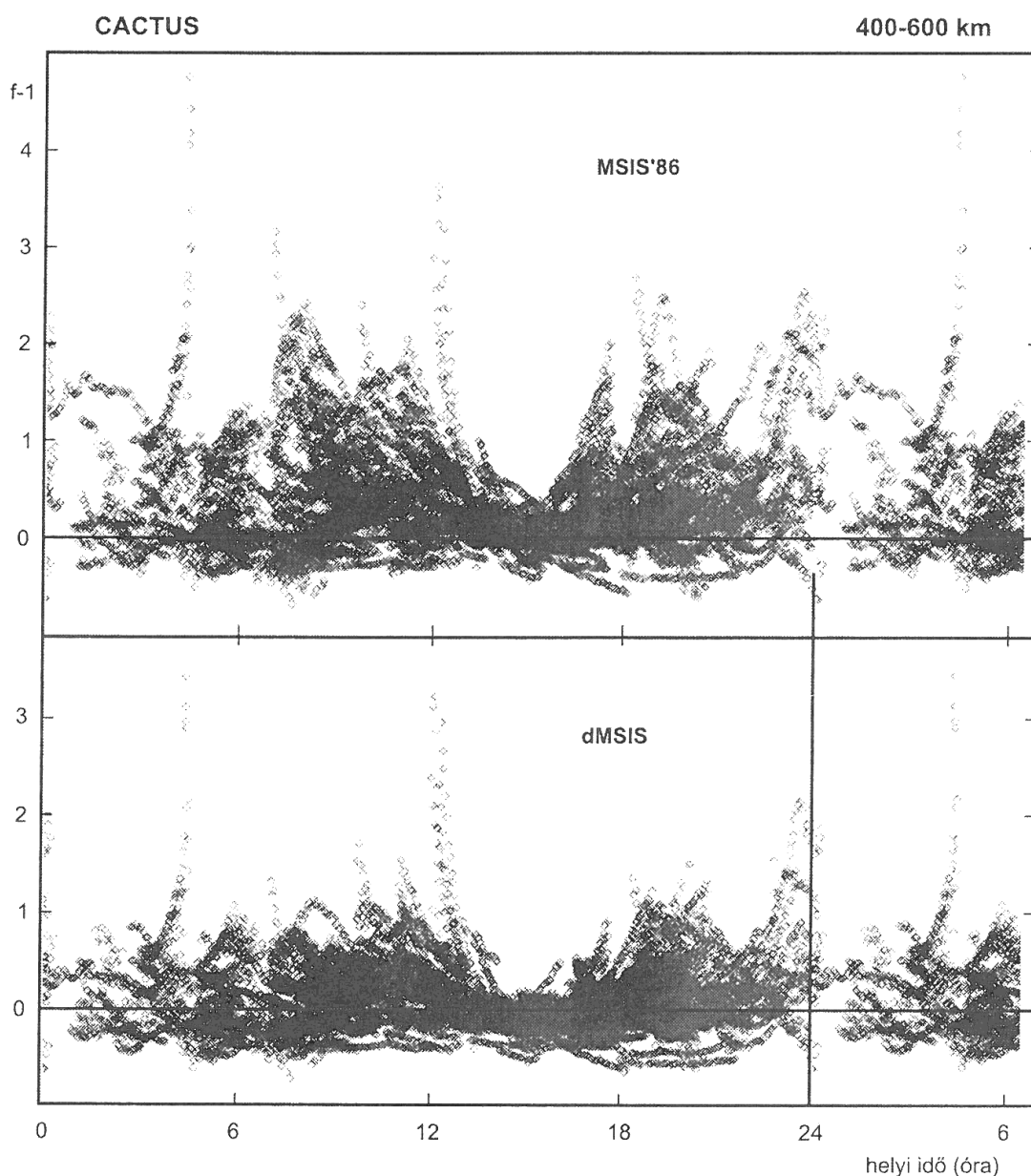


2. ábra • Geomágnesesen nyugodt napokon az éjféli körüli maximum feltűnően jelentkezik a modellmaradékokban ( $f-1 = [\rho^{\text{mért}} - \rho^{\text{modell}}] / \rho^{\text{modell}}$ ), különösen az egyenlítő körzetében és közepes szélességeken (ott az LST helyi időben némileg későbbre tolódva).

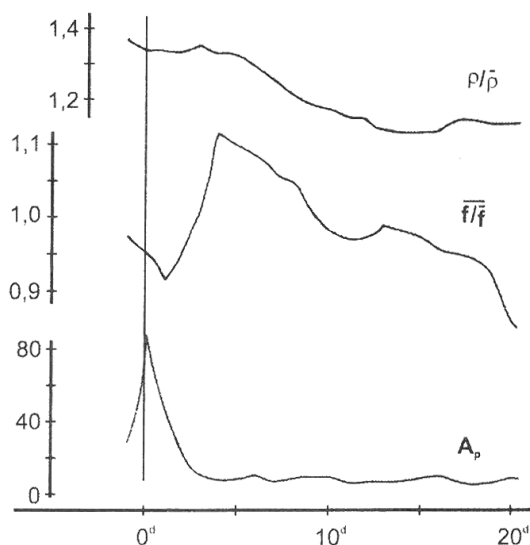
protonok, illetve az ionosféra eredetű oxigénionok) fűtése hozhatja létre azt a jelenséget, hogy a légsűrűség geomágneses viharok után még napokig nem tér vissza a korábbi nyugalmi szintre. Ezért a légsűrűség számításánál az  $A_p$  mellé (amelyhez képest a modellek hatórási időkésséssel számoltak) egy, a gyűrűáram erősségének változását jellemző  $\Delta Dst/\Delta t$  paramétertől függő szorzófaktort vezetünk be, a  $Dst$ -hez képest kétórás időké-

séssel. Mivel a  $\Delta Dst/\Delta t$  arányosnak bizonyult a  $Dst$ -vel, ezért a feltételi egyenletekben  $Dst$ -t használtuk indexként. Ezzel sokkal jobb leírását tudtuk adni a magnetoszféra-viharokkal kapcsolatos felsőlégtéri sűrűségeknél, mint a nemzetközi modellek (3. ábra).

Az 1980–1990-es években már megszületett a  $Dst$ -t is figyelembe vevő dMSIS modellünk, majd ennek a magasság- és napszakfüggést is figyelembe vevő változata, a ddMSIS,



3. ábra • Nyilvánvalóan látszik, hogy a CACTUS-mérések maradékai a nemzetközi modellekhez képest (felső panel) nagyobbak, mint a mi dMSIS modellünkhöz viszonyítva (alsó panel).



4. ábra • Geomágneses viharok után a légsűrűség (felső görbe) nem tér azonnal vissza a nyugalmi szintre, mint a modellekben indexként használt  $A_p$  (alsó görbe). Tehát nyilvánvaló, hogy a légsűrűség nem lehet az  $A_p$  (vagy  $K_p$ ) egyértékű függvénye, ahogy ez az összes felsőlégköri modellben szerepel.

(Almár – Illés-Almár, 2004; Illés-Almár, 2004a), amelynek megalkotásánál már rendelkezésünkre álltak a francia CASTOR-hold CACTUS mikro-akcelerométerének nagyfelbontású és nagy pontosságú *in situ* sűrűségmérései is (a mérések gyakorisága 10 s volt). Ezzel felhívtuk az elméleti szakemberek figyelmét arra is, hogy a belső magnetoszféra és a légkör kapcsolata sokkal bonyolultabb, mint ahogy azt harminc éven keresztül gondolták, és a magnetoszféra fűtésének ezt a második forrását, mármint a gyűrűáramfűtést is bele kell építeni a fizikai leírásba.

Hogy mikét érthettük el ezeket az eredményeket, noha ezeket az *in situ* méréseket előttünk már mások is analizálták? Azzal, hogy nem a sablonos, mindenki által használt statisztikai programokat használtuk csak, hanem magunk fejlesztettünk a kitűzött feladatokhoz alkalmasabb számítógépi programokat.

A szokványos statisztikai programok feltételi egyenleteibe új tagokat vettünk be, amire az 1960-as évek óta nem volt példa. Így sikerült két új fűtés létét bizonyítani, és a modellekbe a leírásukat bevezetni (ddMSIS-modell).

A gyűrűáramfűtés felfedezése és az egyenlítőn a nagy energiájú semleges atomok által közvetített fűtés bizonyítása után szerettük volna kimutatni a gyűrűáramból a hullám-részecske kölcsönhatás miatt kiszóródó részecskék fűtését is az aurora-övezet alatti ún. SAR-ív régióban (5. ábra). Ezt azonban sem a CACTUS, sem az akkor már szintén rendelkezésünkre álló, olasz San Marco V hold akcelerométeres méréseiből nem sikerült végrehajtani, mert a CACTUS-akcelerométert szállító CASTOR-hold 30°-os inklinációjú, a San Marco V pedig 3°-os inklinációjú pályán mozgott, tehát sohasem mértek az 50–60° szélesség felett. Ezért 2000–2001-ben a régi vizuális észlelésekhez nyúltunk vissza. Ezek az észlelések azonban nem voltak elég pontosak ennek a finom effektusnak a kimutatásához, viszont melléktermékként egy másik jelenség felfedezését tették lehetővé.

#### *Észak–dél aszimmetria a felsőlégkör sűrűségében és hőmérsékletében*

Nevezetesen kiderült, hogy az északi félgömb felett melegebb a felsőlégkör, mint a déli felett (Illés-Almár – Almár, 2006). Miután a megfigyelési anyag tizenkét éve mindenféle évszakot, naptevékenységet, napszakot stb. tartalmaz, ez átlagban értendő. Mi okozhat ilyen különbséget a két félgömb hőmérsékletében? A szárazföld–tenger borítottság, esetleg a geomágneses tér aszimmetriája? A geomágnesesen nyugodt és zavart napok között azonban nem találtunk különbséget; ha van, az finomabb, mint amit a pontatlan vizuális észlelésekkel ki lehet mutatni. A tengerborítottság mint



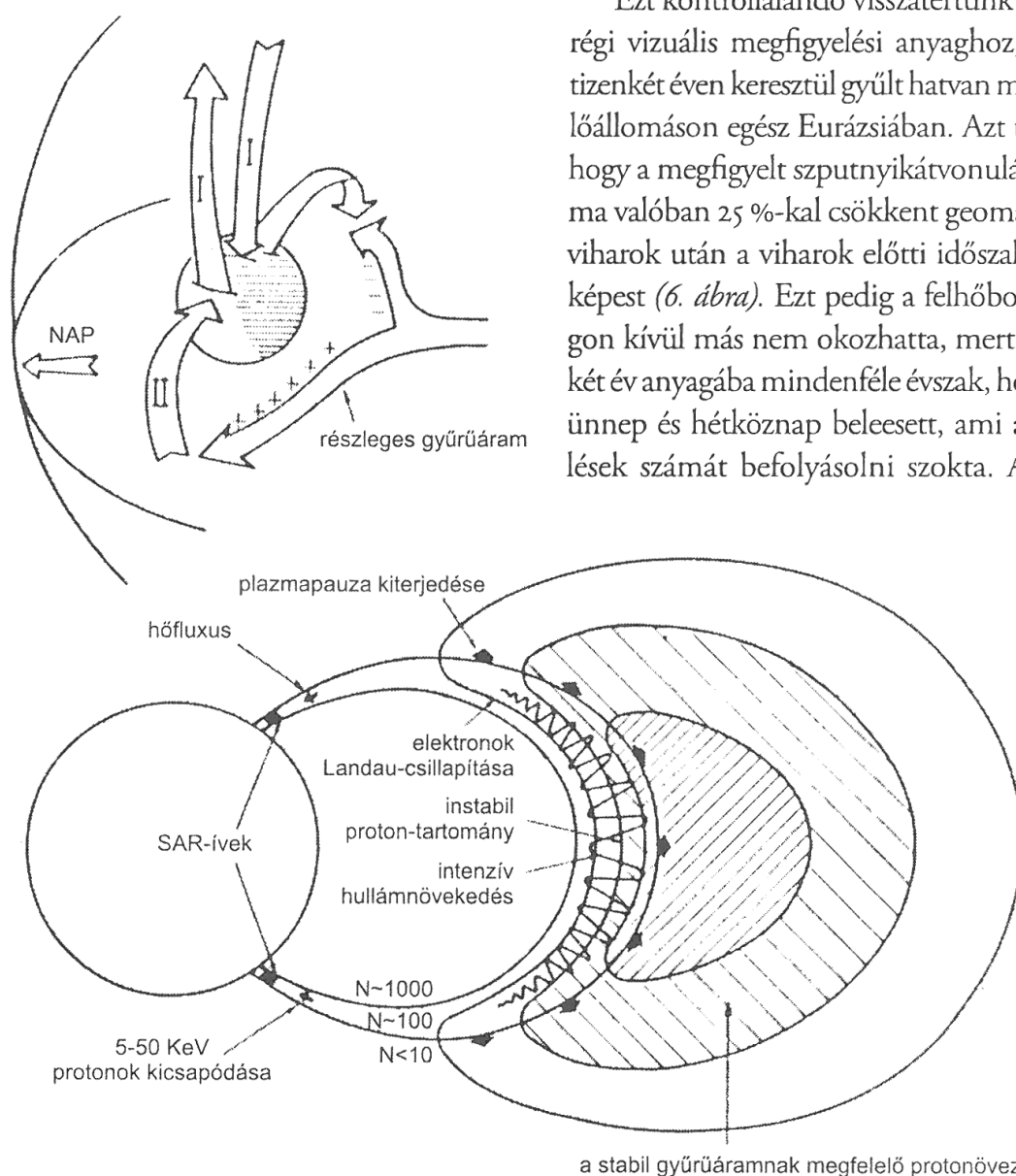
okozó esetén érdekes, hogy a víz nagyobb fajhője még 200–400 km magasságok között is éreztetheti a hatását!

*Geomágneses viharok után  
több a felhő Eurázsia felett*

2000 után a geomágneses vizsgálatoknak még egy másik, érdekes mellékterméke is adódott (Illés-Almár, 2004b). Amikor az 1970-es évek elején az ekvivalens időtartamokhoz gyűjtöt-

tük a megfigyelési anyagot, észrevettük, hogy geomágneses viharok után sokkal kevesebb a megfigyelés a viharok előtti észlelésszámhoz képest, de magunk sem mertük elhinni, hogy itt egy reális jelenséget fedezhetnénk fel. A 2000-es évekre azonban mások kutatásai is ebbe az irányba mutattak, sőt elmélet is született, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás beütésszámának megváltozása miatt a levegő vezetőképességében létrejövő változás szól bele a felhőképződésbe.

Ezt kontrollálандó visszatértünk ismét a régi vizuális megfigyelési anyaghoz, amely tizenkét éven keresztül gyűlt hatvan megfigyelőállomáson egész Euráziában. Azt találtuk, hogy a megfigyelt szputnyikátvonulások száma valóban 25 %-kal csökkent geomágneses viharok után a viharok előtti időszakokhoz képest (6. ábra). Ezt pedig a felhőborítottságon kívül más nem okozhatta, mert a tizenkét év anyagába mindenféle évszak, holdfázis, ünnep és hétköznap belesett, ami az észlelések számát befolyásolni szokta. Az igaz,

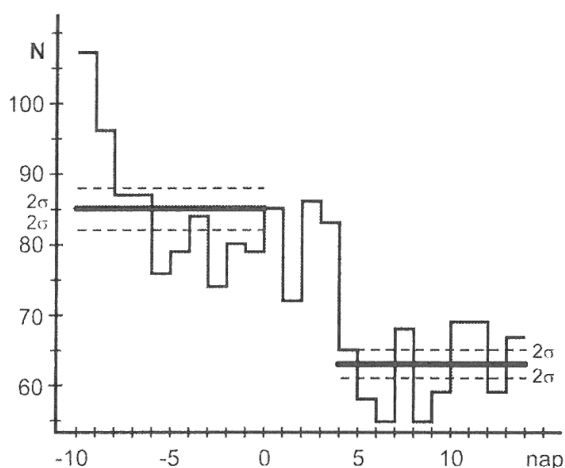


5. ábra • Vázlat a gyűrűáram-jelenség magyarázatához, megjelölve a SAR-ív övezet helyzetét

hogy mesterséges holdat megfigyelni általában csak este szürkület után és reggel szürkület előtt lehet, amikor a megfigyelő már sötétben van, de az átvonuló szputnyikot még megvilágítja a nap. Tehát azt állíthatjuk, hogy szürkületek idején a geomágneses viharok utáni nyugalmi időszakokban Eurázsia felett kb. 25 %-kal nagyobb volt a felhőborítottság, mint ugyanezen napszakokban a geomágneses viharok előtt. Hogy ezek milyen fajta felhők, arról nem tájékoztatnak a megfigyelések, csak arról, hogy az észlelők nem látták a műholdak átvonulását.

#### *A felsőlégköri gravitációs és akusztikus hullámok*

A *Dst*-vel jellemzett gyűrűáramfűtés-tagot is levonva, a maradékok már fehér zajt adtak; mi legalábbis semmiféle paramétertől nem találtunk függést. A szórás pedig sokkal nagyobb volt, mint amit akár a CACTUS, akár a San Marco V hold mérési pontossága megengedhetett volna. Ezért a szórást kezdtük vizsgálni mindenféle paraméter függvé-

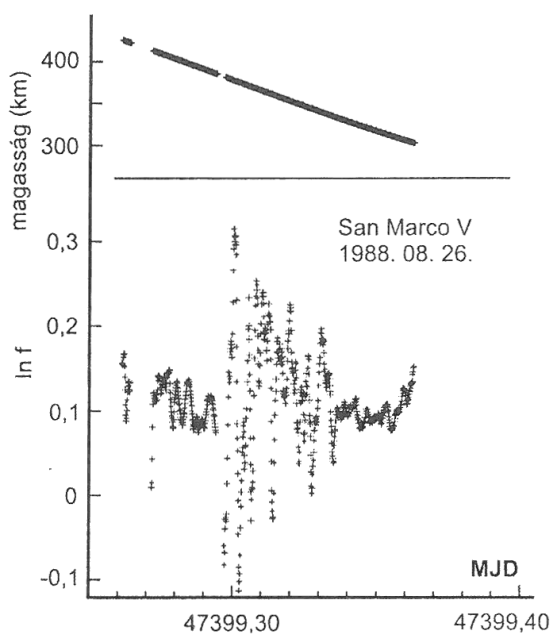


6. ábra • Az egy-egy nap alatt észlelt műholdátvonulások száma (N) geomágneses viharok (nulladik nap) előtt és után. A superponált epochák módszerét 14 geomágneses vihar időszakára alkalmaztuk.

nyében. Ezt a vizsgálatot különösen a San Marco V hold egy másodperc időfelbontású mérései tették lehetővé. A régi vizuális és a CACTUS-anyag csak statisztikai vizsgálatokra volt alkalmas (Illés-Almár et al., 2001).

A szórás nőtt a magassággal, a napszakkal, a földrajzi szélességgel. Kiderült, hogy a hullámzás amplitúdója ugrásszerűen megnő egy bizonyos magasság felett, amely magasság a napszakkal változik. Találtunk példát olyan esetre is, amikor a Hold egy viszonylag alacsony magasságon olyan térrészen ment át, amelyen belül a hullámzás amplitúdója hirtelen nagyobb lett, mint a térrész környezetében (7. ábra).

Továbbá kétféle, nagyon gyors sűrűségváltozást találtunk. Az egyik fajta effektus egy néhány tíz másodpercig tartó hirtelen sűrűségcsökkenés vagy sűrűségcsökkenés-sorozat, amelynek mélysége hat-tízszere a környezet



7. ábra • Példa az általunk felfedezett felsőlégköri hullámjelenségek egyikére. Ebben az esetben a hold olyan térrészen haladt át, ahol a légköri hullámok amplitúdója nagyobb volt a környezeténél (térbeli rezonancia).

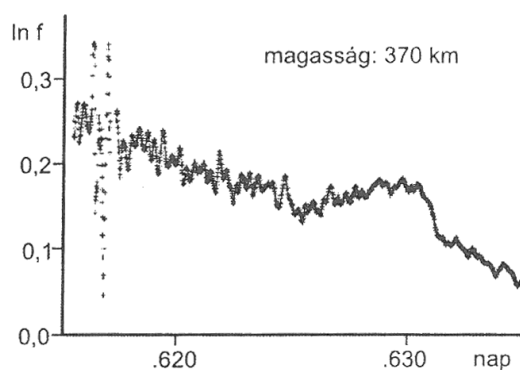
hullámamplitúdójának. Ezt Bencze Pállal közösen a San Marco V hold ionoszféra-burorékon való áthaladásával hoztuk összefüggésbe. Robert W. Schunk és Howard G. Demars (2003) modellszámításai is igazolták ezt a hipotézisünket. A másik fajta változás a háttér-hullámozás amplitúdójánál tíz-húszszor nagyobb, hirtelen sűrűségnövekedések (8. ábra), amikor a San Marco V hold meteoronyomokon haladhatott keresztül (Bencze Pál hipotézise).

Egyébként ezekből a vizsgálatokból nyilvánvalóvá vált, hogy a 200 km feletti termoszférában is állandóan jelen vannak belső gravitációs és akusztikus hullámok, amelyek miatt a modellek 10–15 %-nál pontosabban gyakorlatilag sohasem tudják előre megadni egy pontban a pillanatnyi légsűrűséget – amire egyébként már többek között vezető amerikai geodéták is felhívták a figyelmet.

#### *Miért fontos a felsőlégtörri vizsgálata?*

A semleges felsőlégtörri műholdas vizsgálata nem tartozik a „divatos” kutatási témák közé, pedig a Nap–Föld fizikai kapcsolatok fontos részét képezi. Ugyanis a Nap-hatások kapcsolata a földi magnetoszférával, továbbá a kölcsönhatás a gyakorlatilag azonos rétegben egyidejűleg jelenlévő, töltött részecskék alkotó ionoszférával, illetve a semleges részecskéből álló felsőlégtörri között ezúton tanulmányozható a legtisztábban.

A Napról sugárzás formájában érkező energia nagy része éppen a semleges felsőlégtörri termalizálódik. A szoláris fűtés helyeinek pontos meghatározása által juthatunk el annak tisztázásáig, hogy hol és milyen formában áramlik be ez az energia (3. ábra). A felsőlégtörri sokkal tisztábban látszanak



8. ábra • Példa az általunk felfedezett felsőlégtörri hullámjelenségek egyikére. A görbe elején látható nagy sűrűségnövekedés majd csökkenés feltehetőleg arra utal, hogy a hold egy meteoronyomot metszett.

ezek a fontos folyamatok, mint a meteorológia által tanulmányozott alsólégtörri: egyrészt a légtörri felfelé exponenciálisan csökkenő sűrűsége miatt (a ritka felsőlégtörri a kisebb szoláris effektusok is viszonylag könnyen azonosíthatóak), másrészt a talaj közelében olyan erősen érvényesülnek a felszín lokális hatásai, hogy a kozmoszból érkező hatások elkenődnek, illetve módosulnak. Ami a felsőlégtörri kutatásokat még napjainkban is igazán nehéz teszi, az az a körülmény, hogy a felsőlégtörri sűrűségét (hőmérsékletét) csak nagyon kevés mesterséges hold méri közvetlenül, s azok is viszonylag rövid időszakokon belül. Ezért volt szükségünk arra, hogy több évtizedig tartó vizsgálatainkban a műholdak fékeződésén alapuló, közvetett módon levezetett adatokat is felhasználjunk. Eredményeink e két eljárás egyedülálló kombinációjának köszönhetőek.

Kulcsszavak: *felsőlégtörri modellek, hullámok a felsőlégtörri, műholdmegfigyelés, Nap–Föld fizikai kapcsolatok, úrkutatás*

IRODALOM

- Almár Iván (1958): Asztronautika – története, felosztása és egyes problémái. *Magyar Tudomány*. 65, 3, 1–2,
- Almár Iván (1979): *A felsőlégköri geomágneses effektus összintenzitásának vizsgálata*. Doktori értekezés. MTA, Budapest
- Almár Iván – Illés-Almár Erzsébet (2004): A Proposal to Improve the CIRA'86 Model in the Equatorial Region: The ddMSIS Model. *Advances in Space Research*. 34, 8, 1768–1772.
- Rees, David – Fuller-Rowell, Timothy J. (1988): Chapter 2. The CIRA Theoretical Thermosphere Model. *Advances in Space Research*. 8, 5–6, 27–106.
- Illés Erzsébet (1993): *A semleges légköri geomágneses fűtés egyenlítői forrásának kimutatása és vizsgálata*. Kandidátusi értekezés. MTA, Budapest
- Illés-Almár Erzsébet – Almár I. – Bencze P. – Laneve, G. (2001): Wave-like Variations and Sudden Density Decreases in the Lower Thermosphere As Measured by the San Marco V Satellite. *Physics and Chemistry of the Earth (C)*. 26, 4, 275–280.
- Illés-Almár Erzsébet (2004a): Two Distinct Sources of Magnetospheric Heating in the Atmosphere: The Aurora and the Ring Current. *Advances in Space Research*. 34, 8, 1773–1778.
- Illés-Almár Erzsébet (2004b): Weather Reacting to Geomagnetic Storms. *Advances in Space Research* 34, 2, 376–378.
- Illés-Almár Erzsébet – Almár Iván (2006): A North-South Asymmetry in Thermospheric Density. *Advances in Space Research*. 38, 11, 2461–2464.
- Schunk, Robert W. – Demars, Howard G. (2003): Effect of Plasma Bubbles on the Thermosphere. *Journal of Geophysical Research*. 108, A6, SIA5, 1–8.

