

Az űr kutatás hőskora II.

Magyarországon az űrkorszak első űr kutatási tevékenységéeként 50 éve kezdődött a mesterséges holdak megfigyelése.

Mit tudunk meg a légkörről az első mesterséges holdak mozgása alapján?

Az égimechanikával foglalkozó csillagászok, akik a mesterséges holdak pályameghatározásait végezték, és látták, hogy az előrejelzéseik hol és mennyire nem voltak jók, az eltérések vizsgálatából kiderítették, hogy a Föld légköre 200 km magasság felett is elég sűrű ahhoz, hogy a mesterséges holdak mozgását észrevehetően fékezze. Az a feltételezés ugyan helyesnek bizonyult, hogy a légsűrűség a magassággal alapvetően exponenciálisan csökken, de ugyanabban a magasságban a különböző irányokban más és más volt a sűrűség, ami ráadásul nagy helyi és időbeli változásoknak volt kitéve.

A nappal-éjszaka fűtéskülönbség okozta sűrűségváltozás volt a legfeltűnőbb. Felismerése mégsem volt könnyű, mert a mesterséges holdak fékeződésében egy 60–100 napos periódusként jelent meg. A mesterséges holdak ugyanis elliptikus pályájukon ott fékeződnek a legjobban, ahol a legnagyobb sűrűségű légrétegekbe merülnek le. Ez elliptikus pálya esetén a földközelpont környékén van. A mesterséges holdak perigeum-hosszúsága pedig lassan, mintegy 60–100 nap alatt tolódik át a nappali oldalról az éjszakai oldalra, és hogy milyen sebességgel, az függ a hold pályahajlásától.

Megtalálták a fékeződésben az egyéves, a féléves (vagyis szezonális) változásokat is, amelyek a földpályán való végighaladás, illetve a Föld forgástengelyének hajlása miatt lépnek fel. Felismerhető volt egy 27 nap körüli periódus is a sűrűség-változásban, amit a Nap tengelyforgásával hoztak összefüggésbe. A mesterséges holdak méré-

sei később igazolták is, hogy a Nap forgásának következtében fellépő sugárzás-változás a légkör legfelső rétegeiben elnyelődő ultraibolya és extrém ultraibolya tartományokban valóban sokkal nagyobb, mint a felszínre is lejutó, látható fényben. A felsőlégkör sűrűségében ezt a 27 napos változást a Nap 10,7 cm-es rádiósugárzásával arányos taggal vették figyelembe, mert ez a rádiósugárzás szintén változik, és földfelszíni mérésekből rendelkezésre állt – ellentétben az ultraibolya és az extrém ultraibolya sugárzással kapcsolatos mérésekkel.

Szerencsés módon mindjárt 1959-ben nagyon pregnáns változásként észre lehetett venni a *geomágneses viharokkal* kapcsolatban fellépő erős sűrűségnövekedéseket is (1959-ben voltak az azóta is legnagyobb geomágneses viharok). Miután a geomágneses viharokat kiváltó napaktivitási változások random módon fordulnak elő, az általuk kiváltott sűrűségnövekedések sem periodikusan jelentkeznek, ezért sokkal nehezebb őket modellezni, mint a periodikus változásokat.

A modellezés pedig szükséges, egyrészt, hogy előre lehessen jelezni, hogy másnap hol és mikor vonul át a műhold, másrészt, hogy meg lehessen becsülni, egy felbocsátott mesterséges hold milyen hosszú ideig képes földközeli pályán maradni, esetleg mikor kell pályáját módosítani, hogy még ne essen le. Vagy pedig azért, hogy pontosan meg lehessen adni azt a pozíciót, ahol a hold egy bizonyos mérést végrehajtott. A légköri fékeződés miatt ugyanis pályájának fél nagytengelye egyre csökken, pályája egyre hasonlóbba válik a körhöz. Amikor a pálya már kör alakú, akkor nemcsak a perigeum környékén, hanem az egész pálya mentén fékeződve, spirális pályán egyre sűrűbb légrétegekbe süllyed. A 180 km körüli magasságban a hold ilyen körpályán már kétszer sem tudja megkerülni a Földet,

mert a sűrűdástól felizzik, és elég. Például a 70-es években a Skylab űrüllomás élete folyamán fellépő sok geomágneses vihar hatására a légsűrűség a Skylab pályájának magasságában is nagyobb lett, mint ahogy az akkor helyesnek hitt légköri modellek alapján gondolták, ezért az űrüllomás gyorsabban fékeződött le és égett el, mint ahogy arra számítottak. Ekkor döböntek rá igazán, hogy a felsőlégkörben milyen lényeges ez a geomágneses fűtés, és a hatására létrejövő geomágneses sűrűségrövidülés. Vagyis nagyon fontos a jelenség vizsgálata és modellezése.

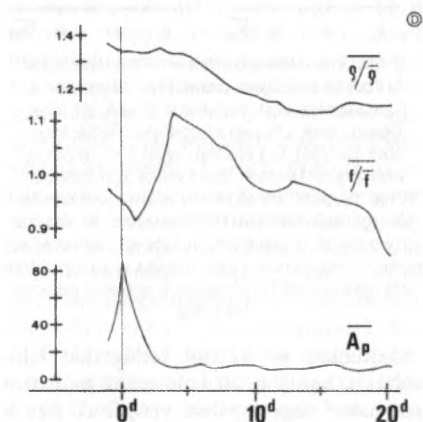
A 70-es évek elejére létrejött légköri modellek már tudni vélték a geomágneses effektusról, hogy a Napból kiáramló, elektromosan töltött részecskék árama, a napszél szállítja azt az energiát, amely geomágneses viharok idején néhány óráig, vagy extrém esetben egy-két napig a Föld mágneses pólusainak környékén, a sarkifény-övezetben fűti a légkört. A fűtés hatására létrejött sűrűségrövidülés mindkét mágneses pólus irányából erős szeleket indít el az egyenlítő felé, és amikor ezek az egyenlítőnél összehúzódnak, ott egy úgynevezett kompressziós fűtést hoznak létre. A sűrűségrövidülést 6-7 órányi késési idővel az A_p (vagy K_p) geomágneses index segítségével próbálták a modellekbe beépíteni. Ezt az A_p indexet a sarkifény-övezet alatti földrajzi szélességeken elhelyezkedő állomások mágneses méréseiből vezetik le, és a mágneses viharok erősségét jellemzi.

Mivel járultunk hozzá a Csillagászati Kutatóintézetben légkörünk jobb megismeréséhez?

A gyűrűáramfűtés felfedezése. Almár Iván vezetésével mi már a hatvanas évek végén a geomágneses effektus vizsgálatát tűztük ki célul. Azt reméltük ugyanis, hogy az ilyen nagyon nagy változásokat a nem túl pontos ($0,1^\circ$) vizuális mérések alapján is vizsgálni lehet. Egy mesterséges hold egymás után megfigyelt átvonulásaiából kiszámoltuk a vizualizációs periódust, annak változásából pedig

a hold fékeződését. A fékeződés mértékéből és a hold méreteiből, alakjából pedig ki lehetett számítani a légkör sűrűségét a hold perigeuma környékén. Ezek a sűrűségértékek és a hold akkori perigeum-helyezetei képezték az adatbázist az időadattal együtt.

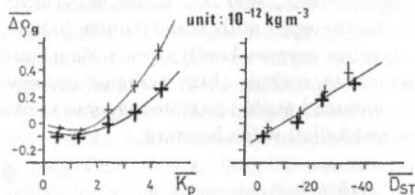
Legelőször is minden „mért” sűrűségérték idejéhez és helyéhez kiszámoltuk, hogy mit adnak a modellek. A továbbiakban a mért és a modell értékek közötti különbséget vizsgáltuk. Ha a modellek mindenütt jól írták volna le a valóságos légkör sűrűségét, akkor a maradékértékeknek akármilyen paraméter függvényében „fehér zajt” kellett volna haladói, vagyis egy, a nulla vonal mentén haladói, vízszintes egyenes körüli szórását. Ha a kettő arányát vizsgáltuk, akkor pedig az egy egyenes mentén haladói vízszintes egyenes körüli szórását kellett volna kapnunk.



1. ábra: Az általunk „semleges légköri geomágneses utóhatás”-nak nevezett jelenség (a középső görbe csúcsa), amelyről később kimutattuk, hogy a gyűrűáramból kiszóródó részecskék hozzák létre. A viharokra közepelt A_p görbén látható, hogy a geomágneses vihar a második-harmadik napra lecseng, a mért magas értékről csak a 10-15. nap tájára, lassan, fokozatosan tér vissza a nyugalmi szintre

Ehhez képest geomágnesesen nyugodt napokon is, de főleg viharos napokon nagy eltéréseket tapasztaltunk. Például azt találtuk, hogy geomágneses viharok után a mért és modell-maradékok arányai több napon keresztül is sokkal nagyobbak 1-nél (1. ábra középső görbe), ami azt jelentette, hogy a

mérések sokkal nagyobb sűrűségértékeket jeleztek, mint a modellek. Vagyis a mért sűrűség a vihar után nem megy olyan gyorsan vissza a nyugalmi szintre (1. ábra felső görbéje), mint ahogy azt az indexként használt A_p görbe teszi (1. ábra alsó görbe). Így az A_p függvényében kértékű függvényt kaptunk, ha az A_p görbének a vihar előtti és a vihar utáni „nyugalmi” idejére rajzoltuk fel a sűrűségeket (2. ábra bal oldala). Ez azt jelenti, hogy az A_p -vel nem írható le jól a sűrűség változása. Más vagy további paraméter után kellett nézni.



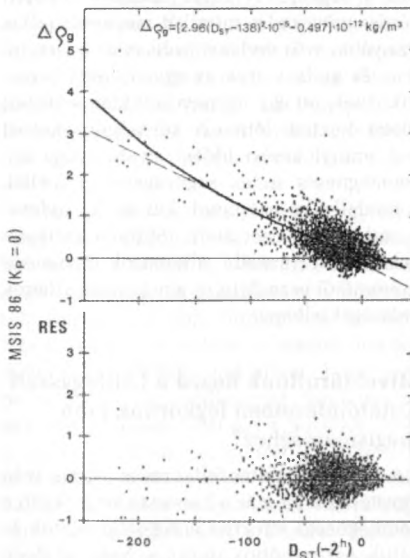
2. ábra: A geomágneses kivételével minden más effektust a modellek segítségével levonva a mért sűrűségekből a „geomágneses tagot” vizsgálhattuk. Ez az A_p -nek (vagy logaritmusának, a K_p -nek) a függvényében kétféle értéket adott (bal oldal), ha a viharokat megelőző 10 nap (vastag vonallal rajzolt kereszték), vagy a viharok lecsengése utáni 10 nap „nyugalmi” időszak (vékony vonallal rajzolt kereszték) sűrűségértékeit külön-külön közepelve rajzoltuk fel. Vagyis az A_p nem mondja meg egyértelműen, hogy egy bizonyos A_p -hez mekkora sűrűség tartozik. A jobboldali ábra szerint a gyűrűáram erősségére jellemző D_{ST} önmagában is jobb paraméter lenne erre a célra

Geofizikus és fizikus kollégákkal kontaktálva legalább 20 különböző geofizikai paraméter függvényében vizsgáltuk meg a maradékokat, mígnem a D_{ST} nevű paraméter érdekes eredményt adott: határozott függés mutatkozott (3. ábra felső görbéje). Felrajzolva a maradékokat a D_{ST} függvényében, a kétértékűség eltűnt – vagy legalábbis sokkal kisebb lett (2. ábra jobb oldala). Tehát a D_{ST} önmagában is alkalmasabbnak látszott a sűrűségek leírására, mint az A_p , de arra gondoltunk, hogy esetleg az A_p -vel együtt még jobban használható modellt kapunk.

Mit jelent mindez? Az A_p paraméterrel ellentétben a D_{ST} paramétert nem a magas szélességeken, hanem a mágneses egyenlítő közelében felállított állomások méréseiből

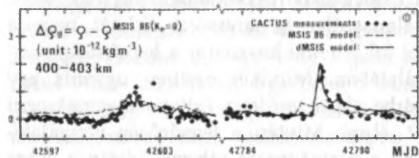
vezetik le, és a geomágneses viharok idején a Föld mágneses egyenlítője körül felépülő, úgynevezett gyűrűáram erősségét jellemzi.

Hogy a D_{ST} valóban jó kiegészítő paraméter, az később bizonyosodott be. A 80-as évekre ugyanis olyan, mesterséges holdakon elhelyezett gyorsulásmérők, ún. akcelero-méterek adatai is elérhetővé váltak, amelyek nagyon nagy időfelbontással, folyamatosan mérték a levegő sűrűségét azokon a helyeken, amerre a hold járt. A francia CACTUS például tíz másodpercenként, az olasz San Marco V holdon elhelyezett akcelero-méter másodpercenként mért. Ezek a mérések igazolták, hogy a pontatlanabb vizuális megfigyelések alapján kapott eredményeink reálisak (a 3. ábrán a pontosabb CACTUS-mérések vannak felrajzolva). Hogy mennyivel jobb a D_{ST} paramétert is figyelembe vevő modellünk a csak az A_p paramétert használó nemzetközi modellhez képest, azt két, időben közeli geomágneses vihar eseté-



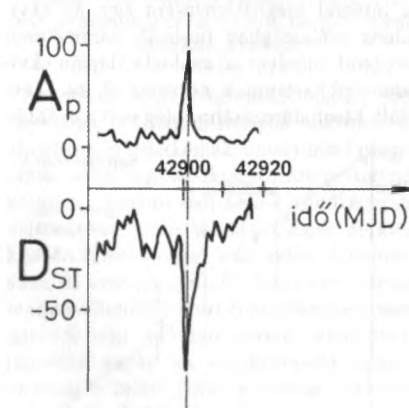
3. ábra: A francia CACTUS hold pontos sűrűségméréseiből kapott geomágneses tag egyértelmű függést mutat a D_{ST} -lől (felső ábra). Levonva a függést leíró tagot, a maradékok már „fehér zaj”-adnak, vagyis a nulla vonal körül szóródnak. A pontosabb mérések tehát igazolták a vizuális megfigyelések alapján sejtett eredményeket (1. és 2. ábra)

re szintén a CACTUS mérések alapján a 4. ábrán mutatjuk be.



4. ábra: Két, időben közeli geomágneses vihar időszakára láthatjuk, hogy a CACTUS akcelerométer megfigyeléseiből kapott geomágneses tagot (pontok). A szaggatott vonal a nemzetközileg elfogadott ún. standard modell (MSIS 86) számolásait mutatja, a folytonos vonal a mienkét (dMSIS). A nemzetközi modell már a vihar előtt felemelkedve és sokkal laposabban képes csak a vihar alatti mérések leírására, míg a mi dMSIS modellünk nagyon jól követi a meredeken felütő és lassabban lefutó sűrűségértékeket. Nyugalmomban a két modell ugyanazt adja, mert mi csak a geomágneses tagot javítottuk

Ez az eredmény pedig a Föld magnetoszféraján keresztül bejövő napszél-fűtés fizikai hátterére mutat rá. Nevezetesen arra, hogy mágneses viharok idején nemcsak a sarkifény övezetben érkezik fűtés, hanem a gyűrűáramból is van energia betáplálás. Ezt az is alátámasztotta, hogy a Dst és az egyenlítő közelében mért sűrűség növekedés között nem 6–7 órás, hanem csak 2 órás késési idő adódott. Tehát – ellentétben a



5. ábra: A geomágneses vihar erősségét és letűnését a mágneses pólusok környékén az A_p (felső görbe), a vihar hatására létrejövő gyűrűáram erősségét a D_{st} (alsó görbe) mutatja. A D_{st} sokkal lassabban tér vissza nyugalmi szintre, mint az A_p

korábbi felfogással – az egyenlítő környéki sűrűség növekedésnek nemcsak egy, hanem két forrása van: a sarkifény-övezetből elinduló szelek kompressziós fűtése mellett közvetlenül az egyenlítő környezetében az ún. gyűrűáram is fűt, annak következtében, hogy a töltött részecskék a gyűrűáram felbomlása idején a gyűrűáramból kiszóródnak, és a légkörre csapódnak. Amíg a kompressziós fűtés csak 1–2 napig tart – ahogy ezt az A_p görbe mutatja (5. ábra felső görbéje) – addig a gyűrűáram-fűtés, vagyis a töltött részecskék kiszóródása a geomágneses vihar lecsengése után 5–10 napig vagy még tovább is eltart – ahogy ezt a D_{st} görbe mutatja (5. ábra alsó görbéje).

Melegebb a légkör az északi félgömb felett: É–D aszimmetria a felsőlégkörben.

A Föld tengelyhajlása miatt létrejövő szezonális változás azt jelenti, hogy az egyik félgömbben az egyik, a másik félgömbben a másik félgömb kap több besugárzást. Vagyis amikor az egyik melegebb, akkor a másik félgömb hidegebb. Ez a teljes Föld éves átlagában nem jelent változást, csak a beérkező energia szélességi eloszlása változik az év folyamán. A légköri modellekbe ez be is van építve. A maximális hőmérséklet egy-egy helyen némi késéssel követi a legerősebb fűtés idejét (nem pontosan június 21-én van a legmelegebb északon és a leghidegebb délen, hanem kb. 1 hónapos késéssel, és a napi változásban sem 12 óra helyi időben van a legmelegebb, hanem 14–15 óra felé). Az ok mindkét esetben ugyanaz. Nem a légkör kapja közvetlenül a fűtést, hanem a talaj melegszik fel a besugárzás hatására, és a levegőnek a felmelegedett talaj adja át a hőt. Attól függően, hogy milyen a felszíni anyag hőkapacitása, gyorsabb vagy lassabb ez a felmelegedés, és hosszabb vagy rövidebb ideig tartja a felszíni anyag a hőt. A beton vagy a sivatagok talaja gyorsan felforrósodik, és gyorsan le is hűl, és gyorsan tudja átadni a hőt a levegőnek. Ilyen helyeken a levegő maximális hőmérséklete rövidebb időközéssel és meredekebben követi a besugárzás változását. A víz ugyanezt lassabban teszi, itt a levegő hőmérséklete nagyobb

időkéséssel és elnyújtottabban követi a besugárzás változását. A tengerpartokon soha sincs olyan forróság, és nincs olyan hideg, mint a sivatagban.

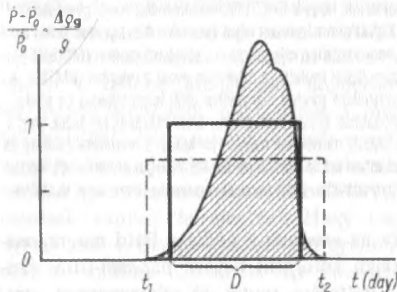
Talán ez lehet a magyarázata annak az eredménynek is, amit 2004-ben kaptunk a régi, vizuális észlelési anyag újrafeldolgozásakor. Nagyon meglepő, hogy az óceánok vízfelülete még 300–500 km magasságban is éreztetheti a hatását.

A megfigyelési anyagot ehhez a vizsgálatához egyrészt az Euráziában 15 éven keresztül végrehajtott összes vizuális szputnyikészlelésből a PERLO számítógépi programunkkal levezett, mintegy 30 ezer légsűrűség érték, másrészt az előrejelző központok által akkor már publikált pályaelem-táblázatok szolgáltatták. A felsőlégköri modellekkel kiszámítottuk a mérés helyéhez és idejéhez tartozó modellsűrűséget is, és ennek a modellértéknek a levonásával minden, addig ismert effektus hatását kivonhatuk a mért sűrűségből (tehát a napszakost, a szezonálit, az éveset, a geomágnesest stb.). A maradéknak a nulla vonal körüli szórását kellett volna mutatnia, azonban mi a szélesség függvényében egy ferde egyenes körüli szórást kaptunk. Ez azt jelenti, hogy a légsűrűség 10–15 éves átlagban az északi félgömb felett nagyobb, mint a déli felett – annak ellenére, hogy ennyi éves átlagban ugyanannyi besugárzást kap a két félgömb. Hogy ez a különbség milyen magasságban és milyen fizikai folyamatok következtében jön létre a légkörben, még további légkörfizikai vizsgálatoknak kell tisztáznia. Szerintünk okként elsősorban a vízzel borítottság óriási különbsége említhető, hiszen az északi félgömbön sokkal nagyobb területet borítanak a jobban felmelegedő szárazföldek, mint a délin (l. a színes képmelléklet).

Euráziában a geomágneses viharok után megnő a felhőborítottság?

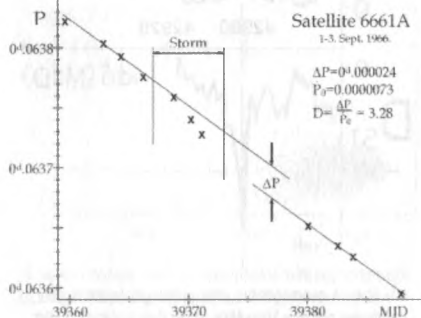
A másik nagyon érdekes eredményt szintén a 60-as, 70-es évek vizuális szputnyikészleléseinek újrafeldolgozása adta 2002-ben. Mint korábban már említettem, a Csillagászati Kutatóintézetben a 60-as évek vége felé kezdtük vizsgálni a geomágneses

effektust. Almár Iván, aki korábban spektroszkópiával is foglalkozott, felismerte, hogy a csillag-spektroszkópiában használt ekvivalensszélesség-paraméter ötletét nagyon jól fel lehetne használni a légsűrűség vizsgálatában. Mindkét esetben ugyanis egy görbe alatti területet kellene meghatározni (7. ábra). Miután a légsűrűség vizsgálatában a geomágneses viharok idején a gyors



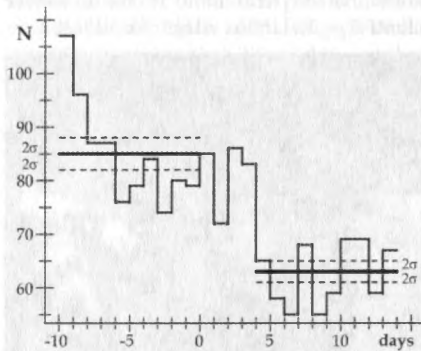
7. ábra: Az „ekvivalens tartam” (D) definíciója. Geomágneses viharok idején a sűrűség hirtelen megnő. A sűrűséggörbe alatti terület nagysága a vihar erősségére jellemző

változások miatt a sűrűségi görbe pontos kirajzolását (és közvetlen integrálását) nem teszi lehetővé a nagyon jó esetben is csak egynapos időfelbontású mérésorozat, Almár egy egyszerű módszert dolgozott ki az integrál meghatározására egy, az ekvivalens szélességhez hasonló paraméteren keresztül, amelyet az analógia alapján ekvivalens időtartamnak nevezett el, és D-vel jelölt. Meghatározásához elég volt a 8. ábrán



8. ábra: A 6661A COSPAR jelzésű mesterséges holdnak az 1966. szeptember 1–3-án lezajlott geomágneses vihar által elszenvedett perióduscsökkenése (ΔP)

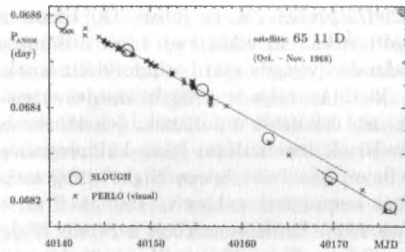
látható módon megmérni a mesterséges hold fékeződésében bekövetkező ugrást a geomágneses viharok idején. Ehhez egy-egy holdra vonatkozóan össze kellett gyűjteni a megfigyeléseket kb. egy hétig a geomágneses vihar előtt és kb. egy hétig a vihar után. Meglepő volt, hogy a viharok előtt végrehajtott észlelések számához képest a viharok után milyen kevés megfigyelést találtunk. Tréfából mondtam is, hogy a viharok felhősödést okoznak, de ezt magam sem vettem komolyan.



9. ábra: A geomágneses viharok idejét tekintve nulladik napnak látható, hogy viharok előtti és viharok lecsengése utáni tíz napban átlagban hány derült alkalom volt Euráziában, a brit szigetektől a volt Szovjetunió legkeletibb vidékeiig. A 10. ábrán egy pregnáns példát látunk a derült alkalmak számának a csökkenésére viharok után

Az ezredfordulóra azonban másféle megfigyelések is hasonló irányba mutattak, sőt elméletek is keletkeztek, amelyekkel magyarázták, hogy a galaktikus kozmikus sugárzás változása hogyan szól bele a felhőképződés változásába. Ezen témájú cikkek olvasása közben jutott eszembe az akkori benyomásom, és arra gondoltam, hogy ezt érdemes lenne leellenőrizni a régi megfigyelési anyagon. A régi adathordozókra felvitt megfigyelési anyag az adathordozók gyakori változásai miatt 2002-re sajnos már nem volt elolvasható. Megvoltak azonban még az akkori naptárak, amelyekre annak idején bejelöltem, hogy 15 éven keresztül melyik napon, melyik állomáson, milyen holdra vonatkozóan kaptunk megfigyeléseket. Ezen

kutatás szempontjából pedig csak az volt a fontos, hogy egyáltalán volt-e megfigyelés, mert ha igen, akkor látták az eget, tehát nem volt felhős idő.



10. ábra: Példa a megfigyelések számának drasztikus csökkenésére az 1968. október végi geomágneses vihar követő időszakban

Eurázsia összes szputnyikmegfigyelő állomására, és 15 év összes geomágneses viharára minden holdat figyelembe véve külön-külön összeszámoltam, majd összesítettem, hogy a viharok előtti héten, illetve a viharok utáni héten naponta hány állomás tudott észlelni. Az eredmény a 9. ábrán látható, és a 10. ábra jól példázza az eseteket. Eszerint a viharok után átlagban 25%-kal kevesebb alkalommal látták a szputnyikészlelők derülni az eget, mint a viharok előtti héten, és ezzel a mi adatbázisunk is igazolta, hogy – legalábbis Euráziában – geomágneses viharok után sokkal nagyobb a felhőborítottság, mint viharok nélkül.

Ezen két utóbbi vizsgálatot mintaértékűnek érzem három szempontból is. Egyrészt ez is igazolja, hogy soha nem tudhatjuk, hogy egy megfigyelési anyag nem tartalmaz-e még fontos információt, amire eddig még nem gondoltunk. Tehát a megfigyeléseket mindig gondosan, olvasható formátumban meg kell őrizni. Másrészt azt, hogy a már a 70-es években pontatlannak ítélt vizuális megfigyelésekből még ma, 35 év után is lehet új és fontos tudományos eredményekhez jutni. Harmadrészt, hogy a meteorológianak is érdemes lenne komolyan foglalkoznia a geomágneses viharok és az időjárás kapcsolatával.

Illés Erzsébet