

ÚJABB EREDMÉNYEINK A FELSŐLÉGKÖR KUTATÁSÁBAN

Illés Erzsébet

MTA Csillagászati Kutató Intézete

Bevezetés

A francia CACTUS mikroakcelerométer [1] mérései máig is a legjobbak közé tartoznak a földi felsőlégkör sűrűségváltozásának vizsgálatában. A mérési sorozat hosszúságának szempontjából pedig szinte egyedülálló. Jelen dolgozatban arról a vizsgálatról szeretnék beszámolni, amelyet ezen anyag alapján két diszkusszió inspirált.

Az egyik diszkusszió 1991-ben az IUGG bécsi kongresszusán, W. Prölls előadását követően zajlott le az előadó, valamint Bencze Pál, Almár Iván és köztem. A gyűrűáramfűtésről szóló előadásunk [2] után Prölls (Németország) egy a geomágneses effektust bemutató, áttekintő előadásában továbbra is [3] azt fejtegette, hogy az egyenlítőn jelentkező geomágneses sűrűség-növekedés egyedüli oka az aurora övezetben jelentkező fűtés. Miközben én annak a véleményemnek adtam hangot, hogy párhuzamosan mindkét fűtés működhet, eszembe jutott, hogy a kitűnő CACTUS megfigyelési anyag alapján meg lehetne kísérelni a kétféle fűtés szétválasztását a napszakos effektusban jelentkező sűrűségi járulékok alapján. Különösen ígéretes lehet a vizsgálat, ha a zavart napokra vonatkozó észleléseket szélesség szerint szétbontva elég sok pont marad egy-egy csoportban ahhoz, hogy a napi menet kirajzolódjék, és így az aurora fűtés által okozott többletet nyomon lehetne követni az egyenlítő felé.

A másik diszkusszió egy évvel később a fenti vizsgálat eredményeit bemutató washingtoni előadásom (World Space Congress) után következett. Ekkor R. Raghavarao (Ahmedabad, India) felvetette, hogy a zavart időszakokra vonatkozó vizsgálataimat érdemes lenne megismételni nyugodt időszakokra is. Ő ugyanis munkatársaival együtt a Dynamic Explorer hold mérései alapján geomágnesesen nyugodt időszakokban szél és hőmérsékleti anomáliákat talált az egyenlítő környékén (ETWA, Equatorial Temperature and Wind Anomaly), amely az ismert EIA (Equatorial Ionospheric Anomaly) jelenséggel párhuzamosan jelentkezett [4].

A vizsgálat módszere

Az MSIS'86 modell maradékait vizsgáltuk 400-600 km között, vagy az $f = \zeta^{\text{CACTUS}} / \zeta^{\text{MSIS'86}}$ vagy az $f-1 = (\zeta^{\text{CACTUS}} - \zeta^{\text{MSIS'86}}) / \zeta^{\text{MSIS'86}}$ értékekkel a helyi idő (LST) függvényében. Néha magukat a momentán értékeket, néha csúszóközép görbéket vizsgáltunk, ezen utóbbi esetben helyi időben 2 órára közepeltünk 0,2 óra lépéssel.

Megfigyelési anyag a zavart napok vizsgálatánál

Az első vizsgálatához a geomágneses viharok környékéről gyűjtöttük össze a megfigyeléseket. A napi átlagos Dst-t ábrázoló görbe alapján kiválasztottuk azon gyors viharokat, amikor a Dst a korábbi nyugalmi értékről egy-két napon belül elérte a minimális értékét, és a csökkenés mértéke meghaladta az 50 γ -t. A vizsgálatot először az 1975-77-es időszakra végeztük el [5] (ekkor 21 gyors vihar állt rendelkezésre), majd megisméltük a teljes 1975-79-es anyagon (összesen 44 viharra). A viharok listáját az I. Táblázat tartalmazza.

Az anyagválogatáshoz és a szuperponált epochák módszeréhez kulcsidőnek a Dst-minimum időpontját tekintettük, ettől számított 24-órás anyagát külön-külön vizsgáltuk, illetve az első 24-órát még 3-órás intervallumokra is bontottuk. Így a negatív sorszámú napok, illetve órák a Dst görbék leszálló ágán, míg a pozitív sorszámú napok, illetve órák a Dst görbék felszálló ágán mutatják, hogy a vihar előrehaladtával hogyan változik a maradékok napi menete.

Egy viharhoz a -3.-tól a 18. napig gyűjtöttük ki az anyagot, ha ezt az időszakot nem zavarta az előző vagy a következő vihar "belógása". Miután a viharok elég gyakran követték egymást, végülis csak a -2. és a 10. nap között gyűlt össze megfelelő mennyiségű észlelési anyag egy-egy csoportban. Megpróbáltuk az egyes napok anyagát geomágneses szélesség szerint is bontani, ekkor azonban már nem minden helyi időben állt rendelkezésre elegendő számú pont a napi menet megbízható kirajzolásához.

Megfigyelési anyag a nyugodt napok vizsgálatánál

A második vizsgálatához [6] a geomágnesesen nyugodt időszakokat választottuk ki, szintén a napi átlagos Dst-eket ábrázoló görbéről. Akkor tekintettünk egy időintervallumot nyugodtnak, ha a Dst értékek legalább 3 napig nem mutattak felszálló vagy leszálló menetet, hanem a maximális érték közelében maradtak. E feltételeknek megfelelő intervallumokat csak 1975-77 között találtunk (29 esetet mintegy 100 nap összhosszban), ugyanis 1977 után a növekvő naptevékenység miatt már nem volt három

napnál hosszabb ideig tartó nyugalmi időszak. A felhasznált időintervallumokat a II. Táblázat tartalmazza.

Eredmények a zavart időszakok feldolgozásánál

Az 1. ábra baloldalán a maradékérték csúszóközepelt görbék mutatják, hogy az MSIS modell a Dst minimum elérése előtt általában a mérések-nél nagyobb sűrűségértékeket ad (-1., -2. nap), de lényegesen alulbecsli azokat a Dst-minimum után — különösen az első napon. A vihar előtti görbealak az 5., 6. nap környékén áll újra helyre. Az 1. ábra jobboldalán ugyanezeket a helyi idő szerinti napi meneteket három-órás felbontásban látjuk. Nyilvánvaló, hogy a fenti állítás igaz három-órás felbontásban is. A 2. ábra a -2., 1. és 2. nap anyagát geomágneses szélesség szerint bontva mutatja be. Látható, hogy az állítás minden szélességre is igaz. Ha az 1. ábra jobb és baloldalát vizsgáljuk, akkor nyilvánvaló, hogy a sűrűségi többlet nem azonos nagyságú különböző helyi időknél, hanem legalább öt elkülönülő mellékmaximum formájában jelentkezik. Ezen sűrűségi mellékmaximumok a vihar előrehaladtával nem ugyanakkor jelennek meg, némelyek korábban, némelyek pedig később. (Például a 2. mellékmaximum már a -2. naptól kezdve jelen van, míg az 5. csak a -3 órától kezdve.) Az 5 mellékmaximum tulajdonságai:

1. Az éjfél melletti mellékmaximum (22-1 óra helyi idő között) a Dst minimum utáni 4.-6. órában jelenik meg, és 3 nap után tűnik el. Mágneses szélesség szerinti bontás mutatja, hogy amplitúdója nő az egyenlítő felé.
2. A hajnali mellékmaximum (2-5 óra helyi idő között) már néhány órával a Dst minimum előtt megjelenik, és 4-5 nap után tűnik el.
3. A reggeli mellékmaximum (6-7 óra helyi idő körül) a Dst minimum után 4-6 órával jelenik meg, és már az első nap után eltűnik.
4. A déli mellékmaximum (10-14 óra helyi idő között) szintén megelőzi a Dst minimumot, és legalább 6 napig követhető utána is. Geomágneses szélesség szerint bontott anyagon látszik, hogy amplitúdója 40° -ig nő a szélességgel.
5. Az esti mellékmaximum (17-21 óra helyi idő között) megjelenésében hasonló a hajnalihoz, de amplitúdója a mágneses szélességgel a délihez hasonlóan nő.

A 3. ábra, ahol az 1. 2. és 3. 24-óra anyagát nem csúszó közepelt görbén, hanem momentán értékeivel mutatjuk be, bizonyítja, hogy a mellékmaximumok jelentkezésének oka a maradékok varianciájának a megnövekedése bizonyos szélesebb LST sávokban. A 4. ábra azt szemlélteti, hogy ez nem a Dst eloszlás egyenetlenségének következménye a különböző helyi időkben, hanem valóban a függés meredeksége változik a helyi időben. Érdekes, hogy

az f értékek meredeksége a Dst-vel is és a Kp-vel is hasonlóan változik a nap folyamán. Az 5. ábra a meredekségeket a helyi idő függvényében mutatja. Az ábrára szaggatott vonallal rárajzoltuk a geomágneses tér horizontális komponensének Honoluluban mért értékeit. Bencze Pál szerint [7] ugyanis a meredekség napi változása, vagy legalábbis annak egy része, a gyűrűáram helyi idő függését tükrözheti. (A két kiugróan nagy meredekség a 4-5 és a 6-7 óra között különösen érdekes, de léte még további bizonyításra szorul.) Mindenesetre érdekes, hogy a Canadian Electrical Association az elektromos hálózatoknak a geomágneses viharokkal kapcsolatos veszélyeztetettségét a nap bizonyos óráiban (délután 16 és éjjel 1 óra között valamint hajnali 3 és 11 óra között) erősebbnek tartja, minthogy a mágneses tér változásának az üteme ilyenkor maximális [8]. A 3. ábrán látható, hogy ez a két időszak elég jól egybeesik a variancia megnövekedésének az időszakával.

Az öt mellékmaximum tulajdonságait áttekintve úgy tűnik, hogy azok egyik esetben sem egyeztethetők össze egy aurora fűtés maradékától várhatóakkal (a reggeli mellékmaximum a késésidejével és élettartamával kivétel, de zavaró a meredek függése a Dst-től — ha bebizonyosodik, hogy ez reális). Ezért arra következtethetünk, hogy az MSIS modell jól írja le az aurora fűtésből származó sűrűsénövekedést, hiányossága a geomágneses effektus leírásában csupán az, hogy a magnetoszférafűtés egyenlítői forrását nem modellezi. Mindenesetre a gyűrűáramfűtést is leíró modellnek számot kell tudni adnia azokról a "nyalábszerű" fűtésekről, amelyet a 3. ábra sugall (akár szélesebb LST-intervallumokra, akár keskeny LST-sávokra gondolunk). Ezek létét Bencze Pál [7] a plazmaszféra és a gyűrűáram közötti lokalizált kölcsönhatással magyarázza, vagy mert kölcsönös helyzetük rövid idő alatt megváltozhat, és/vagy mert határaik "tépett szerkezetűek" lehetnek.

Geomágneses szélesség szerint bontva látjuk a 6. ábrán a Dst-minimum utáni első 24-óra anyagát, amely bontás nélkül a 3. ábra alsó mezejében volt szemlélhető. A délelőtti és a délutáni mellékmaximumok helyei helyi időben kb. 2 órával későbbre tolódnak, ahogy a szélesség 0-tól 40 fokig nő.

Eredmények a nyugodt időszakok feldolgozásánál

A 7. ábrából nyilvánvaló, hogy az MSIS modell nyugalomban gyakorlatilag minden helyi időben és minden szélességen túlbecsli a mért sűrűséget. Ez alól két kivétel van kis szélességen éjjélkor, és 25 fok felett 2 óra körül. A 8. és 9. ábra tanúsága szerint ez a megállapítás minden magasságon igaz 400-500 km között. Ha szélesség szerint nem bontjuk fel

az anyagot, akkor az előbb említett két sűrűségi többlet egy széles, 0-3 óra közötti mellékmaximumként jelenik meg a helyi idő szerint csúszóközpelt görbén (1. ábra bal oldali mező felső görbéje). E mellékmaximumok jelenléte nyugalmi időben az MSIS modell egy további hiányosságára hívja fel a figyelmet, nevezetesen arra, hogy az éjszakai dinamikai fűtés figyelembe vétele is hiányzik a modellből. Raghavarao szerint [9] azonban az a tény, hogy nyugalomban az éjszakai mellékmaximum 20-25 fok geomágneses szélesség körül hiányzik (8., 9. ábrák), az ionoszférával való kölcsönhatásra utal. Az EIA szélességeken ugyanis, ahol az ionok száma nagyobb, az ionfékezés mechanizmusa lelassítja a zonális szeleket, amelyek ennek következtében éjszaka ezeken a szélességeken kisebb kompressziós fűtést tudnak létrehozni, mint a szomszédosokon.

A nyugalmi momentán méréseket tekintve meglepő, hogy a zavart időszakoknál talált "felfutások" nyugalomban is jelentkeznek nagyjából ugyanakkora amplitúdóval, és néha azonos helyi időknél (10. ábra). A nyugalmi anyagot mágneses hosszúság szerint bontva (11. ábra) meglepő, hogy a felfutások ugyan mind a négy szektorban jelentkeznek, de a déli felfutás az indiai és a csendes-óceáni szektorban nagyobb amplitúdójú, mint az amerikai-európai szektorban, az éjszakai felfutásnál fordított a helyzet.

Miután az f -érték a helyzetet aszimmetrikusnak mutatja (kétszer nagyobb mért értéket 2-nek, de kétszer kisebb értéket csak $1/2$ -nek érzékel) és az f -görbén mindenütt csak felfutásokat látunk, Almár Iván javaslatára a 10. és 12. ábrán a $\log f$ értékeket is ábrázoltuk annak eldöntésére, hogy a növekedés, illetve felfutás milyen mértékben látszólagos, illetve valóságos.

Az f és $\log f$ görbék együttes vizsgálata négyféle jelenség megállapítását tette lehetővé:

1. A nagy felfutásokon kívül ugyanolyan nagyságrendű "lefutások" is jelentkeznek, tehát nemcsak sűrűség növekedések, hanem ugyanolyan amplitúdójú csökkenések is fellépnek. A jelenséget tehát nagy, esetenként többszáz százalékos amplitúdójú sűrűségi hullámok áthaladásával magyarázhatjuk, amelyek főképp bizonyos helyi időknél fordulnak elő.
2. A szórás egy közép görbe körüli egyenletes "kiszélesedését" (amely a 12. ábra felső négy mezejében jól látható) állandóan jelenlévő, kisebb amplitúdójú hullámokkal magyarázhatjuk, amely hozzáadódva a maradékok szórásához, lehetetlenné teszi a pontosabb modellezést. Ez magyarázhatná, hogy még a legjobb modelleknél is miért fordul elő nyugalomban is 10-15% -os hiba.
3. Különösen feltűnő a viharokra vonatkozó anyag első 24 órájában a variancia megnövekedése néhány LST intervallumban. Ennek nincs megfelelője

a log f görbék negatív oldalán, vagyis ez valóban többlétsűrűségre utal, amelyet járulékos fűtés hoz létre. Eddigi munkáinkban lényegileg ezt a jelenséget tulajdonítottuk a gyűrűáramfűtésnek, és modelleztük a Dst segítségével.

4. A 12. ábrán a 4. 5. és 6. 24-óra középgörbéin délben és délután megjelenő mellékmaximumok még a modell további hiányosságaira hívják fel a figyelmet.

Köszönetnyilvánítás

Köszönetemet szeretném kifejezni a CNESnek — személy szerint F. Barliernek és C. Bergernek — a CACTUS anyag átadásáért, Almár Ivánnak, Bencze Pálnak, W. Prölssnek, R. Raghavaraonak a hasznos diszkusszióért, Nagy Máriának és Decsy Pálnak a munkák elvégzésében nyújtott segítségükért.

Irodalom

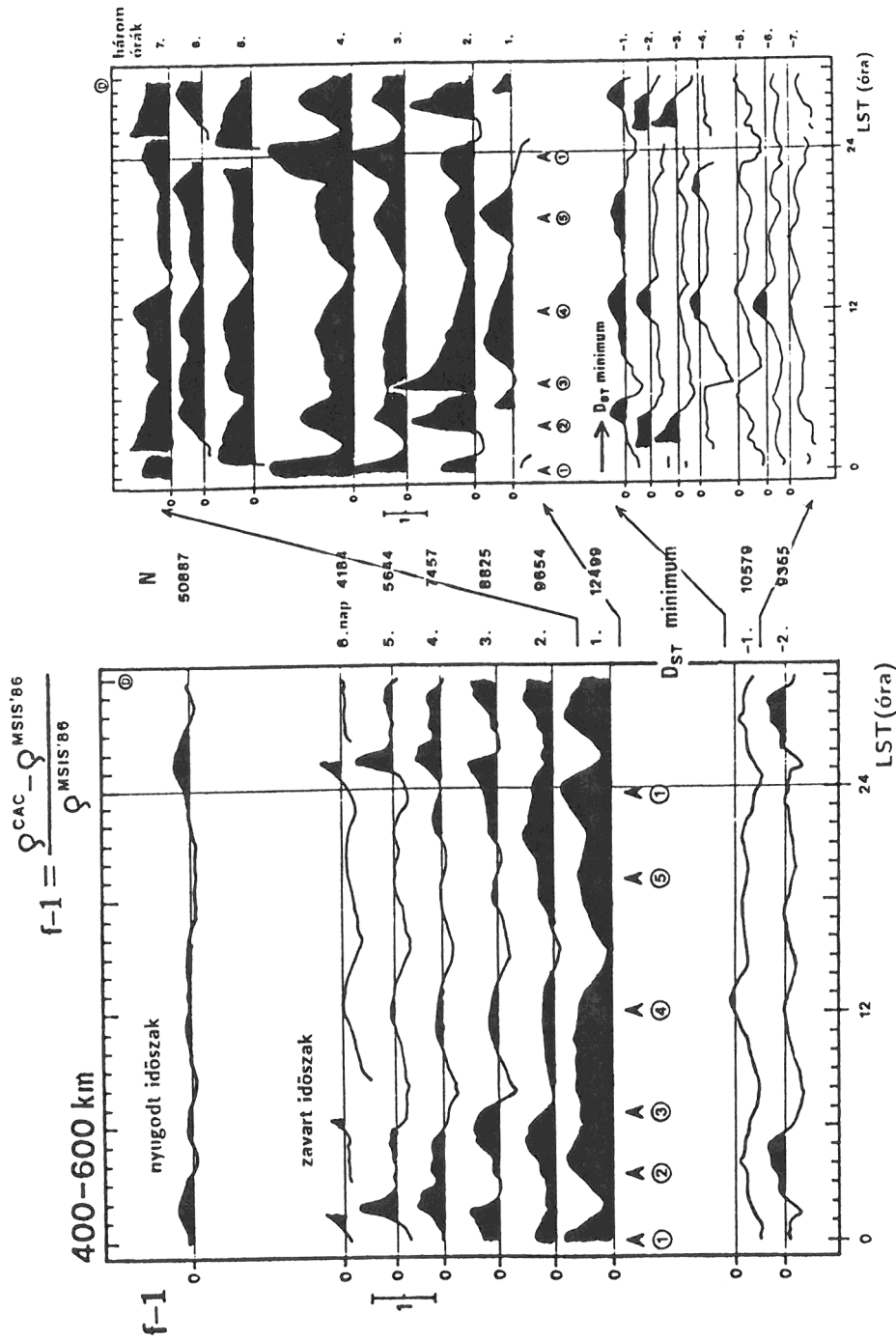
1. F. Barlier, J. Bouttes, M. Delattre, A. Olivero, P. Contensou, .
Experimentation ou vol sur satellite d'un accelerometre de tres haute sensibilite. Compt. Rend. Acad. Sc. Paris, 281 B, 145, 1975.
2. E. Illés-Almár, I. Almár, P. Bencze, Further investigation concerning the effect of geomagnetic disturbances in the neutral upper atmosphere. IUGG XX. General Assembly, Vienna, IAGA Program and Abstracts p. 197, 1991.
3. G. W. Prölss, M. Roemer, J. W. Slowey, Dissipation of solar wind energy in the Earth's upper atmosphere the geomagnetic activity effect. Adv. Space Res. 8, (5)215-(5)216, 1988.
4. R. Raghavarao, L.E. Warton, N.W. Spencer, H.G. Mayr, L.H. Brace, An equatorial temperature and wind anomaly (ETWA). Geophys. Res. Lett., 18, No 7, pp. 1193-1196, 1991.
5. E. Illés-Almár, Separation of the atmospheric geomagnetic effect of auroral and ring current origin on the basis of their diurnal course I., Paper C.5-M.3.17X presented on the XXIX. Plenary Meeting of COSPAR, Washington, D.C., 1992.
6. E. Illés-Almár, Separation of the atmospheric geomagnetic effect of auroral and ring current origin on the basis of their diurnal course II., 7. Scientific Assembly of IUGG-IAGA Session Number 3.15+5.5, Buenos Aires, 1993
7. P. Bencze, privat communication.
8. Geomagnetic Application Bull. No. 11, p. 6., July 1993.
9. R. Raghavarao, Privat communication.

I. Táblázat
A zavart napok vizsgálatához felhasznált viharok

Vihar ideje	Intervallum, ahonnan adat gyűjthető	Vihar ideje	Intervallum, ahonnan adat gyűjthető
42593.1250	42590 42599	43479.8750	43478 43481
42601.2500	42599 42614	43488.5000	43487 43493
42618.3333	42615 42624	43513.0417	43511 43516
42682.3333	42680 42687	43538.5000	43537 43541
42714.3333	42712 42715	43554.5000	43553 43557
42719.3750	42716 42723	43566.9167	43564 43571
42725.7917	42723 42729	43575.9167	43575 43579
42733.8750	42730 42735	43594.3333	43592 43600
42738.7917	42735 42744	43609.1250	43608 43611
42745.9583	42744 42753	43612.5417	43611 43615
42788.0000	42785 42797	43622.1667	43621 43627
42863.3750	42862 42867	43630.5833	43628 43631
42869.3750	42868 42884	43637.4167	43636 43638
42901.0833	42899 42915	43649.9583	43648 43657
42918.2917	42916 42919	43658.2500	43657 43660
42940.4167	42939 42943	43689.0000	43688 43692
42954.0833	42952 42956	43693.7083	43692 43700
43039.4583	43037 43040	43703.6667	43702 43707
43067.1667	43065 43072	43726.6250	43723 43731
43082.3333	43079 43087	43748.4167	43746 43770
43252.4583	43251 43257	43780.4583	43778 43790
43353.2917	43352 43358	43800.3333	43798 43806
43360.3750	43359 43363	43808.3750	43807 43810
43405.9167	43405 43407	43811.6667	43810 43819
43428.3333	43427 43430	43837.7917	43835 43854
43444.2083	43442 43448	43857.3750	43854 43859
43473.0417	43472 43475	43860.7083	43859 43866

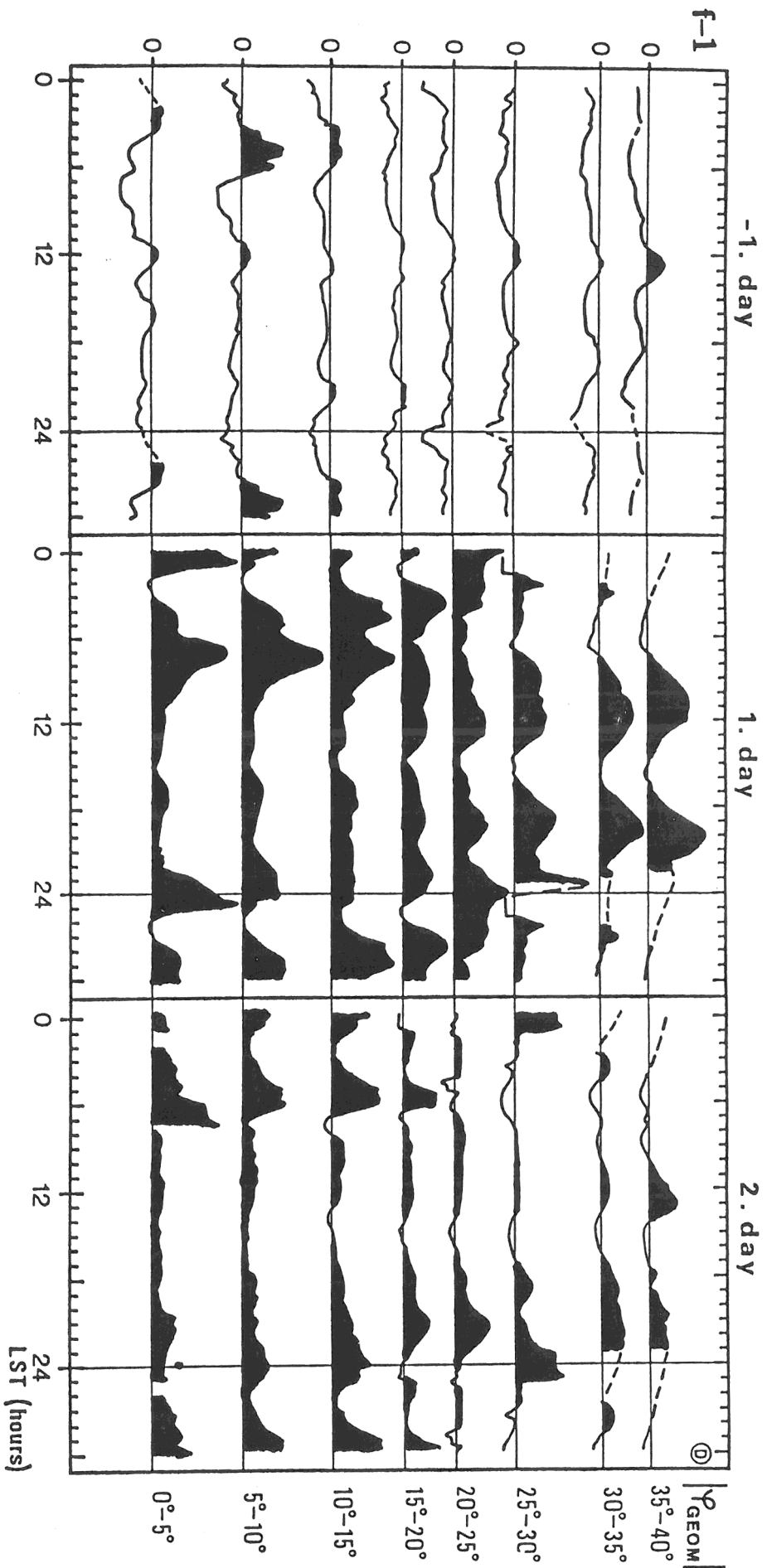
II. Táblázat
A nyugodt napok vizsgálatánál felhasznált időintervallumok

42597	42602	42884	42889	43087	43090
42614	42617	42922	42925	43101	43106
42624	42628	42944	42946	43134	43139
42704	42713	42952	42954	43151	43154
42729	42732	42971	42972	43233	43235
42735	42736	42994	42998	43260	43261
42758	42770	43034	43035	43271	43272
42805	42807	43037	43038	43291	43293
42813	42814	43059	43065	43319	43321
42832	42834	43072	43081		

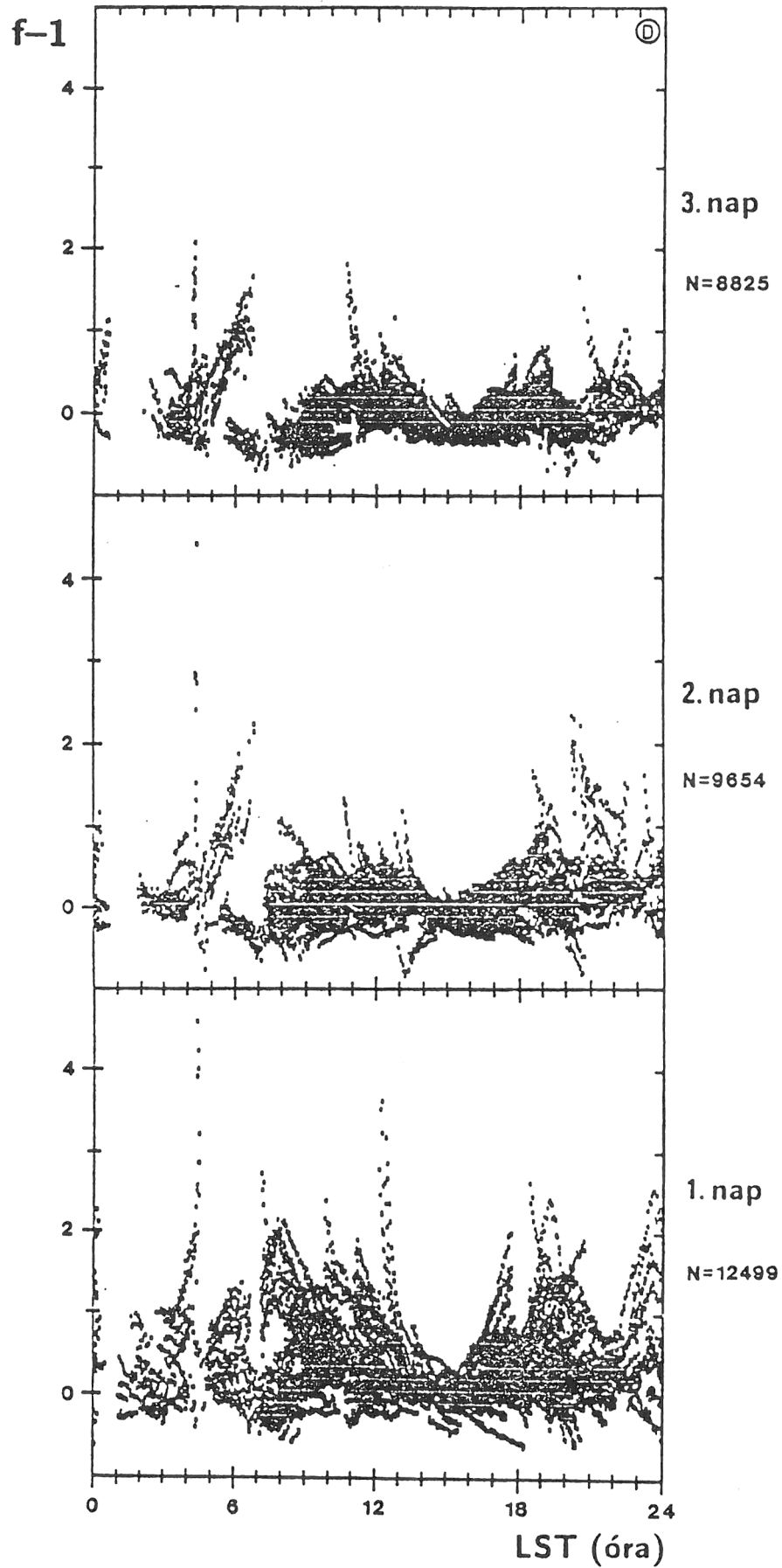


1. ábra 21 geomágneses vihar anyagából képzett csúszóközepelt görbék sorozata 24-órás (baloldalt) illetve 3-órás (jobbaldalt) felbontásban mutatja be, hogy hogyan változik a maradékok napi menete a vihar előrehaladtával (ϱ_{CAC} a mért, $\varrho_{MSIS'86}$ a modell sűrűség 10^{-12} kg/m^3 egységben).

N a görbe megkonstruálásához felhasznált momentán mérések száma. A nyílak a maradékokban jelentkező mellékmaximumok helyeit jelölik. Baloldalt legfelül a kb. 100 napnyi összhosszúságú nyugodt időszakok méréseiből kapott csúszóközepelt görbét láthatjuk összehasonlításként.

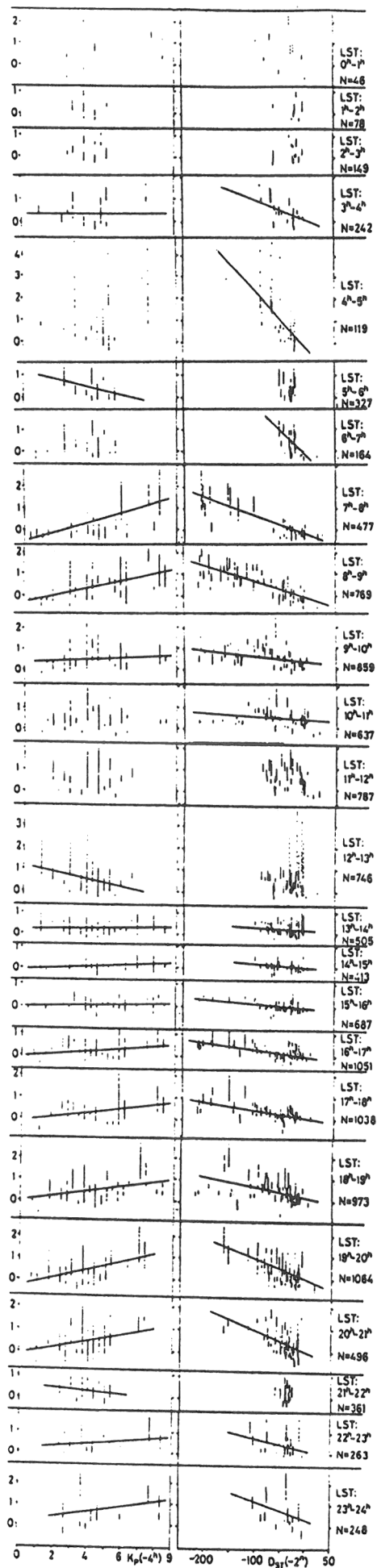


2. ábra A Dst-minimumot megelőző (-1. nap) és követő (1. és 2. nap) 24-óra anyagát geomágneses szélesség szerint bontva a maradékok napi menete csúsztatózot jelölt görbékben.

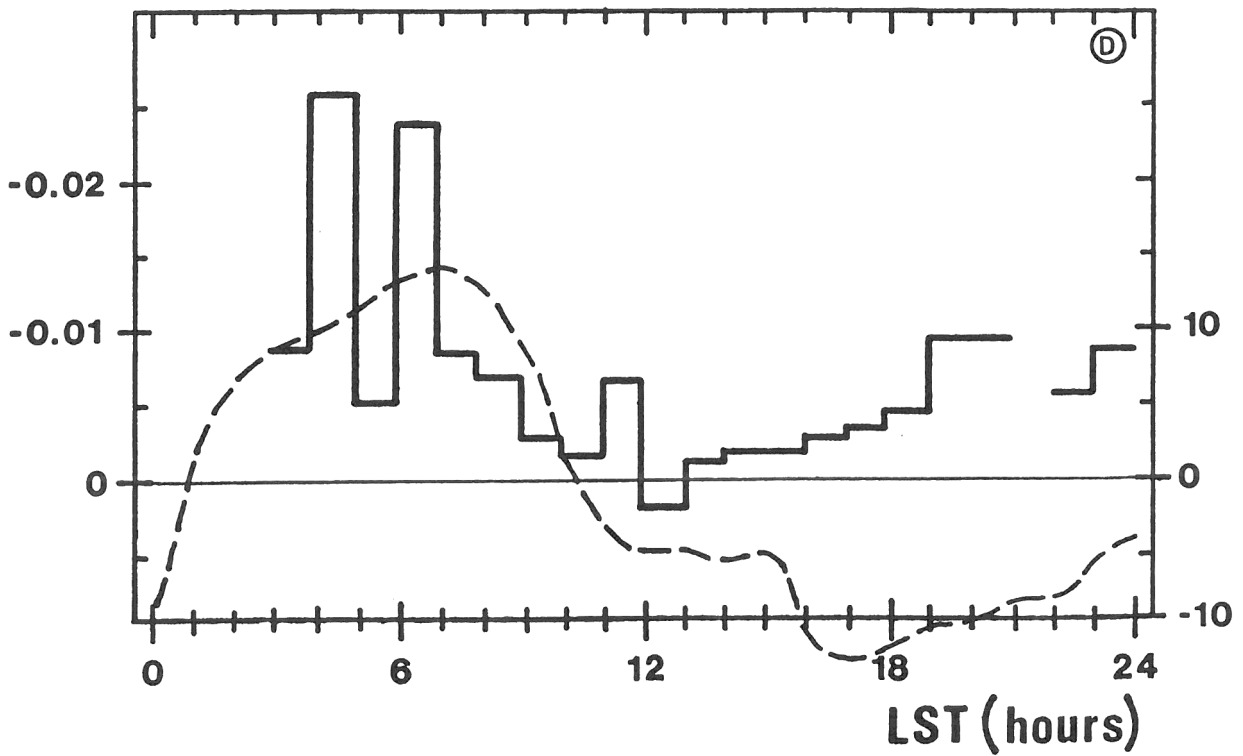


3. ábra A Dst-minimumot követő három 24-óra maradvékainak momentán értékei a helyi idő függvényében.

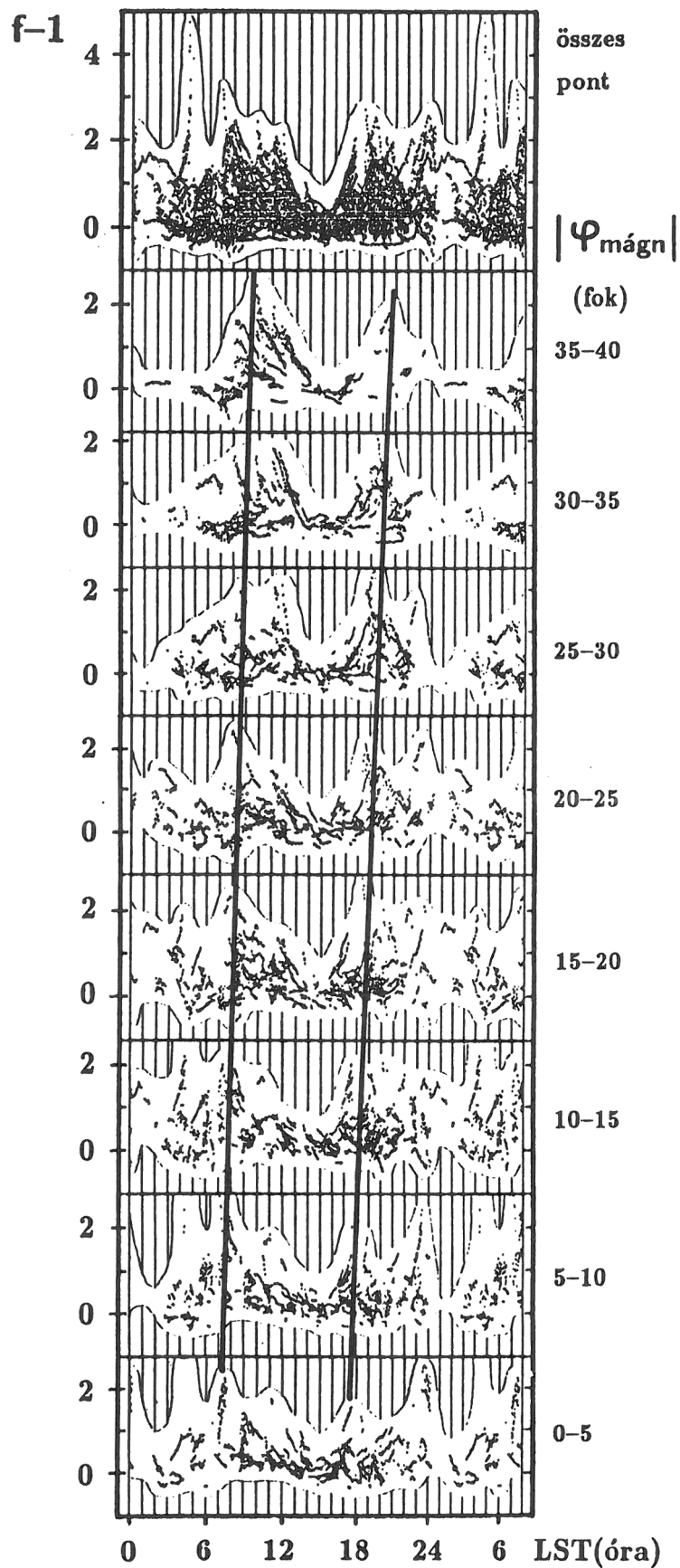
f-1



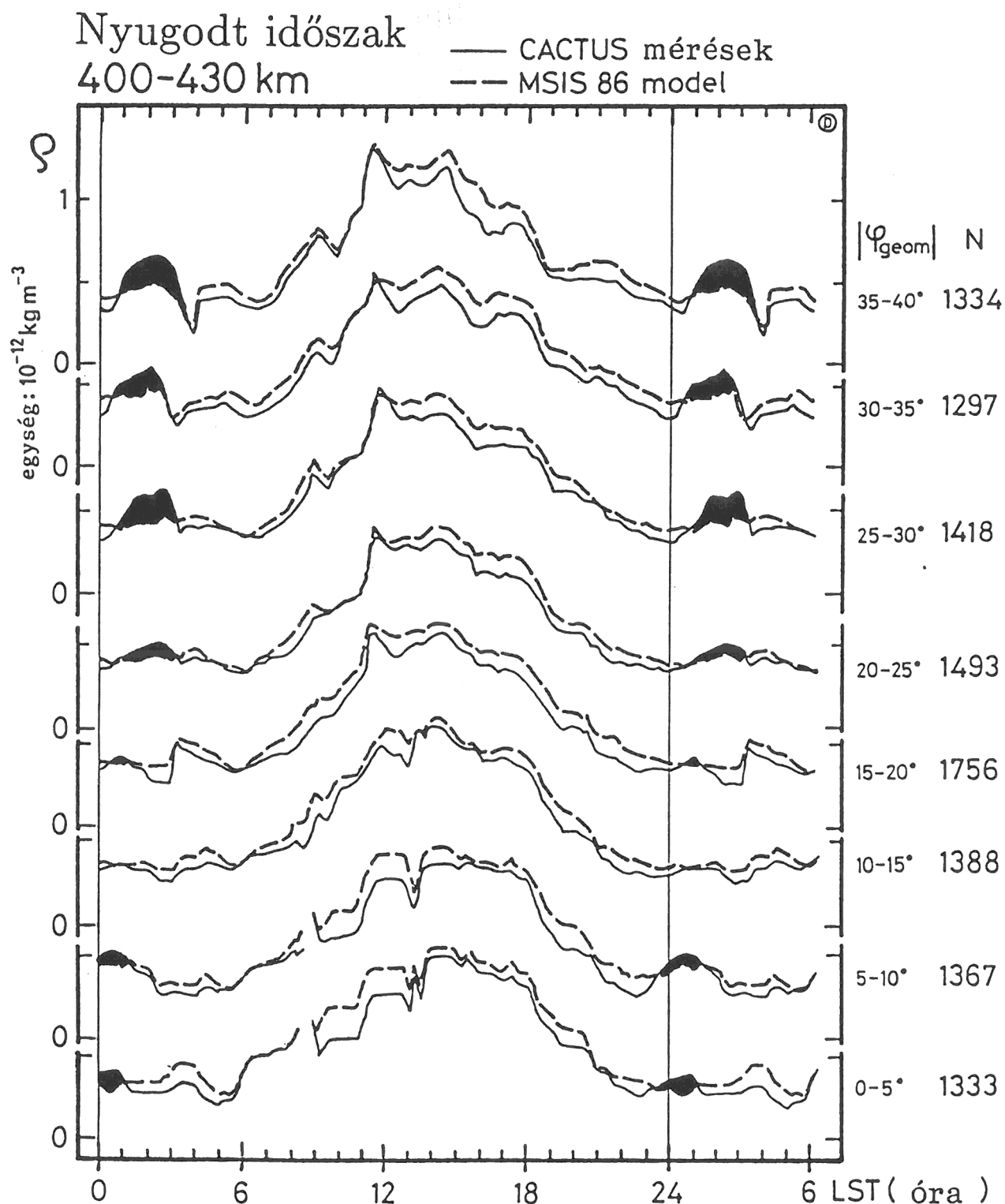
4. ábra A Dst-minimumot követő első 24-óra momentán maradékértékei egy órás helyi idő intervallumonként külön - külön a Dst és a Kp függvényében.



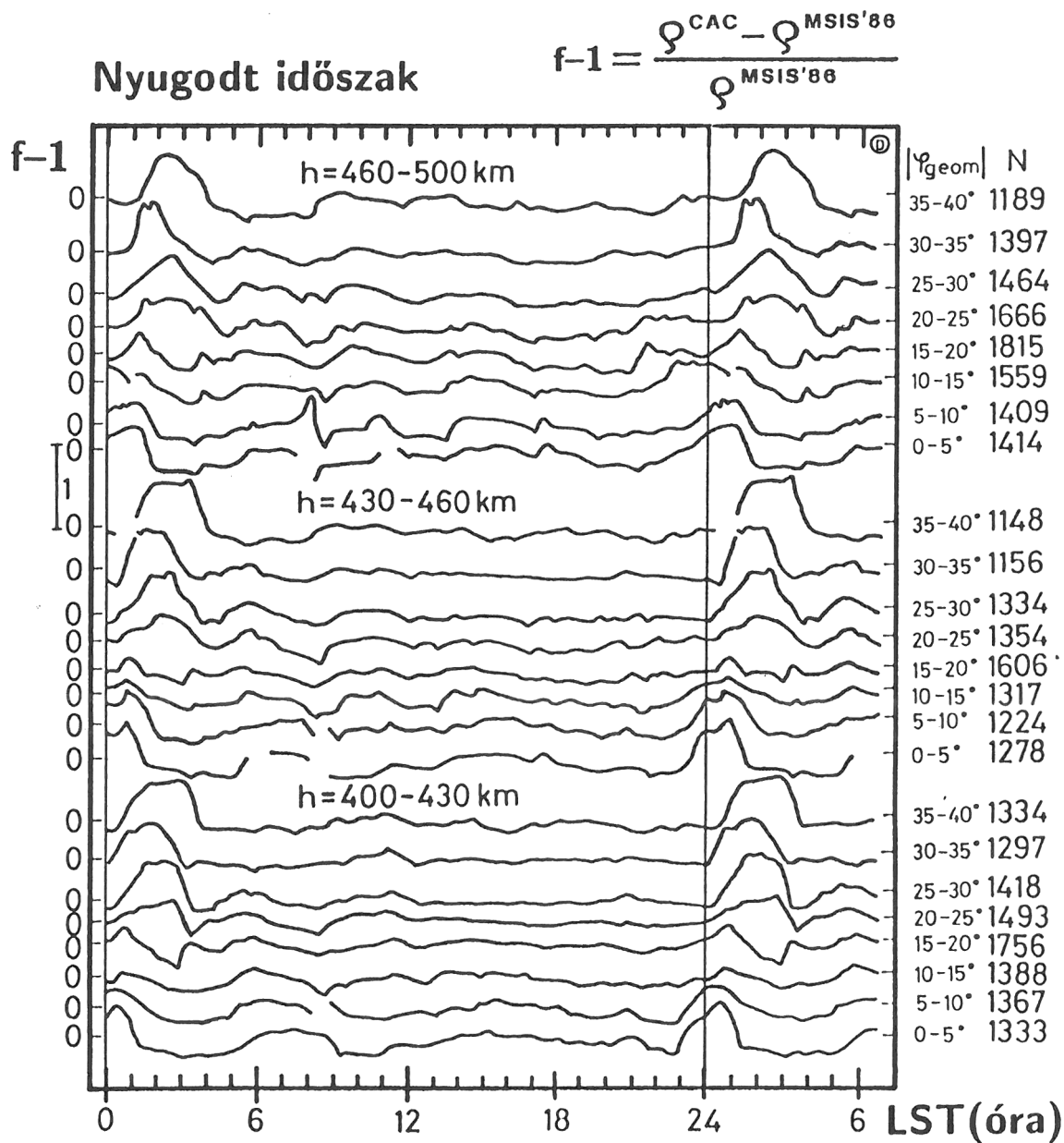
5. ábra A 4. ábra jobboldali meredekségei a helyi idő függvényében. Szaggatott görbével a geomágneses tér horizontális komponensének Honolulu-ban mért zavart napi menetét rajzoltuk fel (jobb oldali skála).



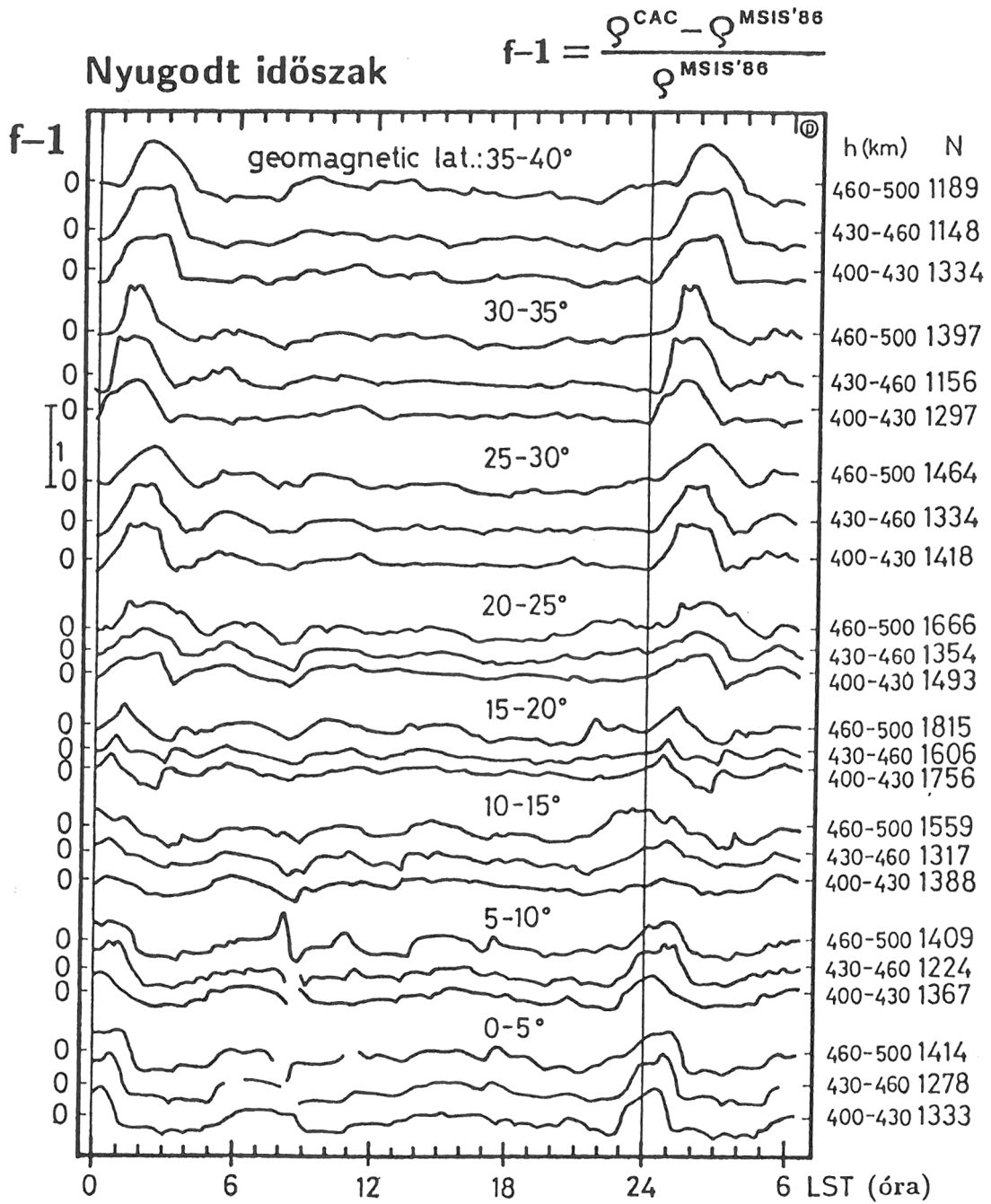
6. ábra A 3. ábra alsó mezőjén látható első 24-óra momentán maradékértékei geomágneses szélesség szerint bontva. Mindkét maximum helye későbbre tolódik két órával helyi időben, ahogy az egyenlítőtől 40° -ig haladunk geomágneses szélességben.



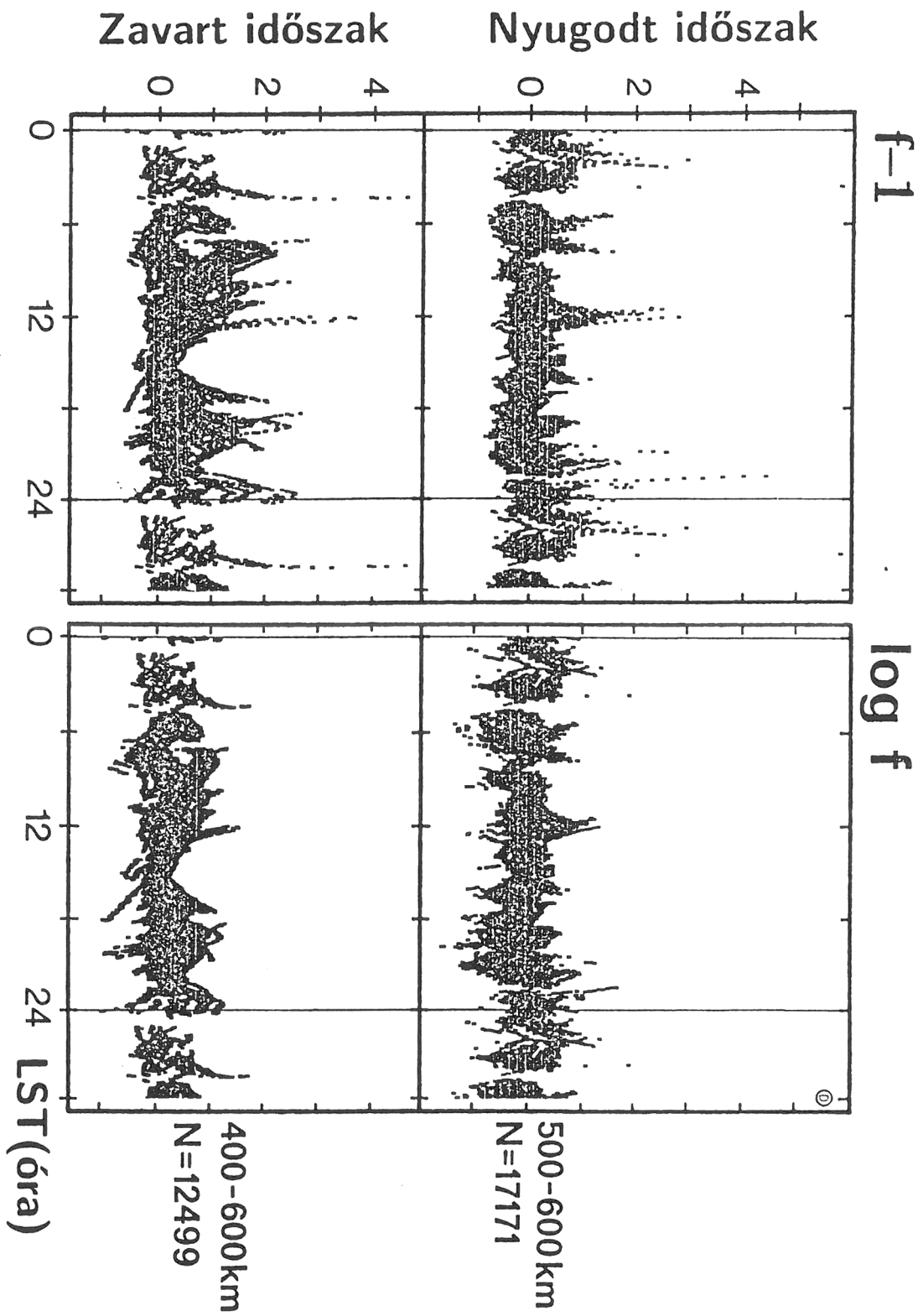
7. ábra Nyugodt időszakok méréseiből konstruált csúszóközepelt sűrűségértékek (Q) a helyi idő függvényében és geomágneses szélesség szerint bontva. Az MSIS'86 modell mindenütt nagyobb sűrűséget ad a méréseknél, kivéve éjjél környékét. Az ábra azt sugallja, hogy az éjszakai kompressziós fűtés leírása is hiányzik az MSIS'86 modellből.



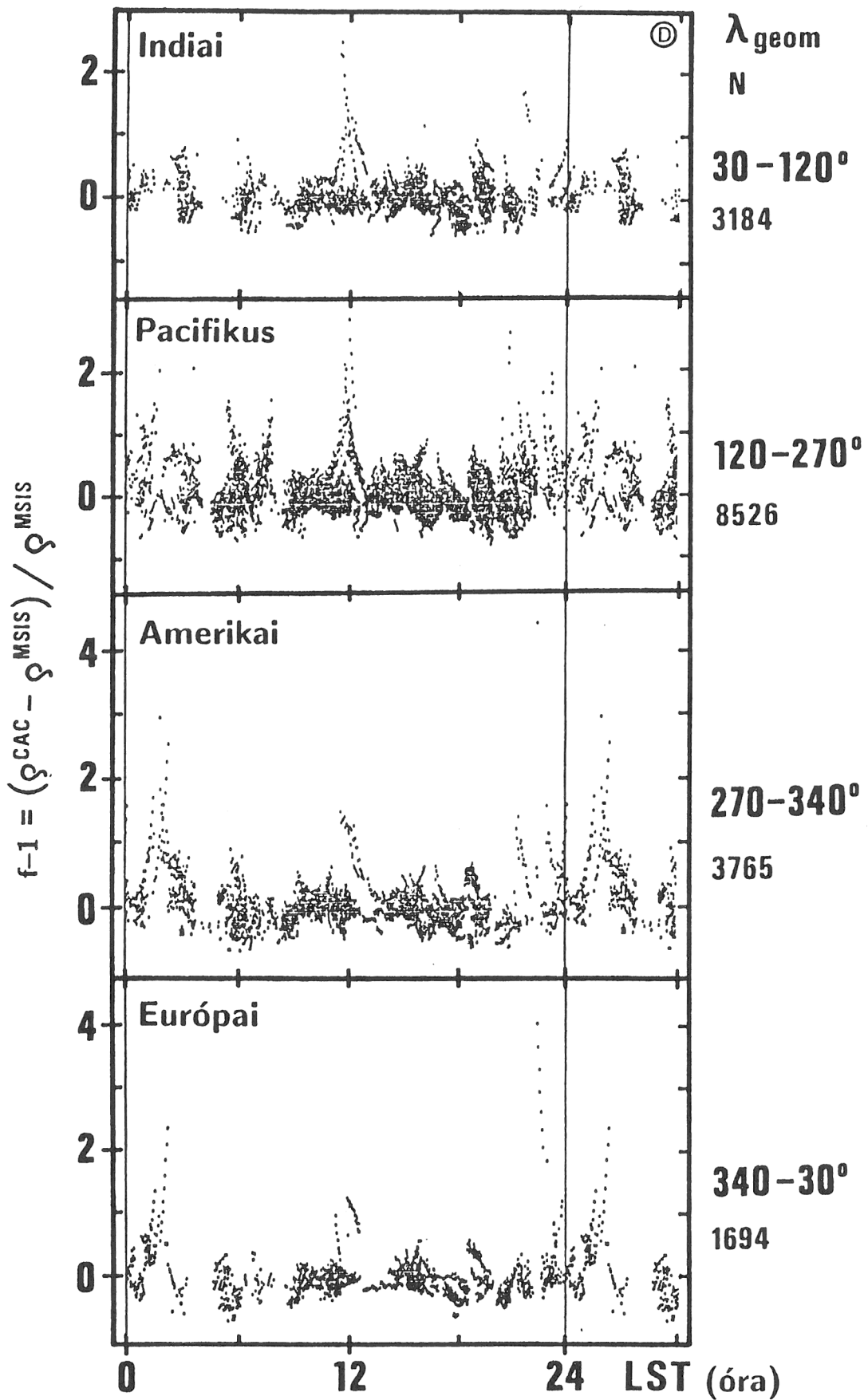
8. ábra Maradékokban mutatja ugyanazt, amit a 7. ábra magukon a sűrűségeken mutatott be, de még további három magasságintervallumra is magasságok szerint rendezve.



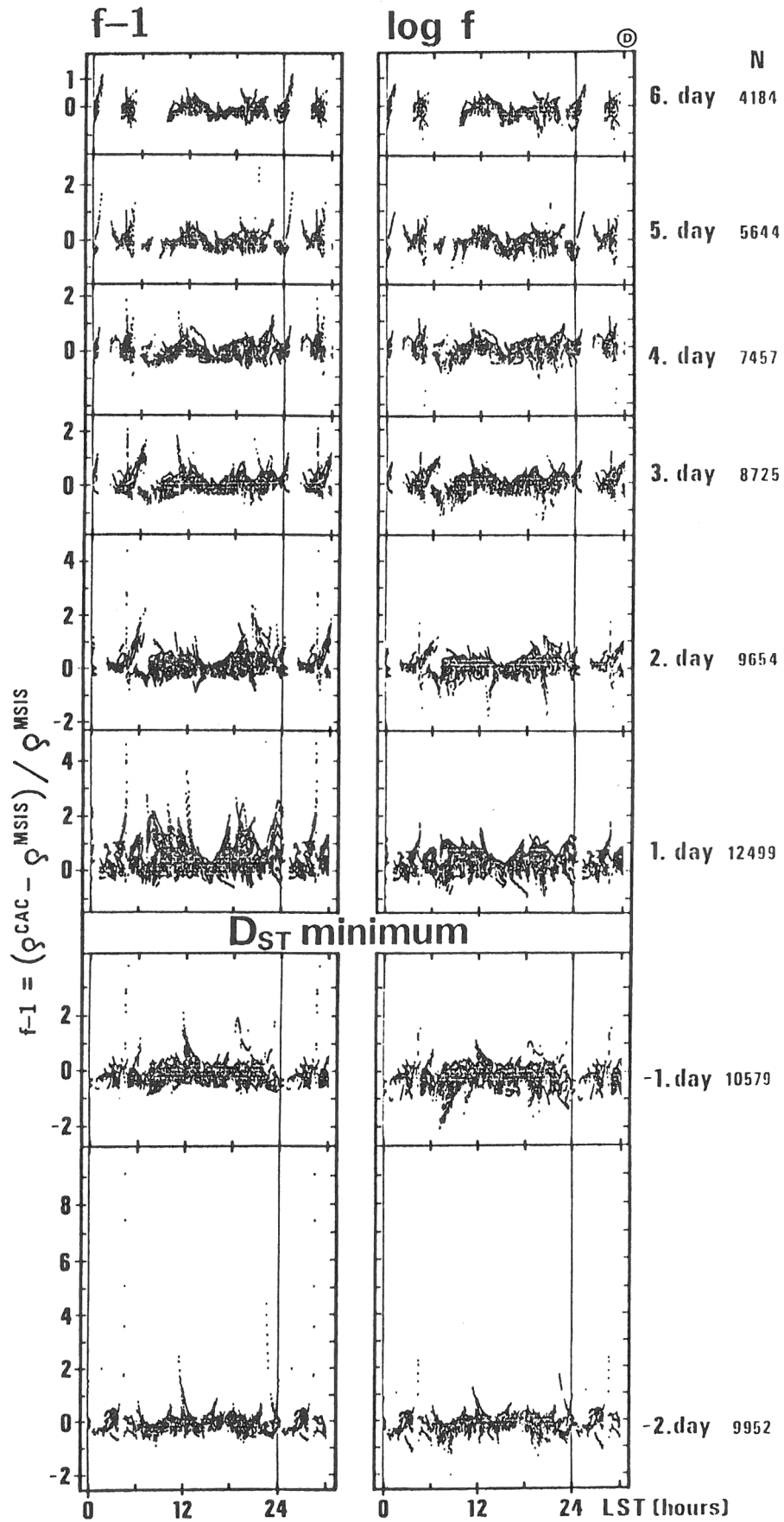
9. ábra Ugyanaz, mint a 8. ábra, csak mágneses szélességek szerint rendezve.



10. ábra A 3. ábra alsó mezőjén látható első 24-óra momentán maradékait (f és $\log f$) ábrázoltuk (alul) összehasonlításként a nyugodt napok momentán értékeihez (felül).



11. ábra A 10. ábra bal felső mezőjén lévő maradékok mágneses hosszúságok szerint bontva.



12. ábra A zavart napok momentán maradékai és azok logaritmusai a helyi idő függvényében a Dst-minimumot megelőző két, és az azt követő hat 24-órában.