

# A hullám-részecske kölcsönhatás tanulmányozása a Föld körüli térségben

BENCZE PÁL<sup>1</sup> (témavezető), FERENCZ CSABA<sup>2</sup>, HAMAR DÁNIEL<sup>2</sup>, HEGYMEGI LÁSZLÓ<sup>3</sup>, KOVÁCS KÁROLY<sup>1</sup>, KÖRMENDI ALPÁR<sup>3</sup>, LICHTENBERGER JÁNOS<sup>2</sup>, MÁRCZ FERENC<sup>1</sup>, SÁTORI GABRIELLA<sup>1</sup>, TARCSAI GYÖRGY<sup>2</sup>

P. BENCZE, CS. FERENCZ, D. HAMAR, L. HEGYMEGI, K. KOVÁCS, A. KÖRMENDI, J. LICHTENBERGER, F. MÁRCZ, G. SÁTORI, G. TARCSAI: The study of the wave particle interaction in the Earth's environment

*In this paper the results of a project are described which aimed at the study of the wave-particle interaction in the Earth's environment. The investigations are carried out by means of the study of the storm after effect observed in ionospheric absorption of radio waves, by the recording of the Schumann resonance frequencies, by the recording of Trimpfi effects and whistlers. The effect of wave-particle interaction due to the precipitation of energetic charged particles is shown by all these methods and enable the detailed study of the wave-particle interaction.*

OTKA nyilvántartási szám: TO 3091

A Föld körüli térségbe a Napból energia két úton kerülhet. Az egyik a Nap elektromágneses sugárzása, tehát sugárzási energia. A másik a Nap részecske sugárzása, amely korpuszkuláris energiaként kerül a légkörbe. Az elektromágneses sugárzás hatása a légkörben többé-kevésbé tisztázott. Nem mondhatjuk el ugyanezt a részecske sugárzásról. A korpuszkuláris energia a részecskék energiájától függően vagy közvetlenül, a Föld Nap felé néző oldalán, vagy a magnetoszféra napszél és a geomágneses tér közötti kölcsönhatás eredményeként kialakuló csóvája felől kerül a Föld körüli térségbe. Az így bejutott energia a csóva tengelyének síkjában kialakuló plazmarétegben időlegesen tárolódik, ahonnan az energiát hordozó részecskék részben közvetlenül a sarki fényövebe, részben a geomágneses egyenlítő síkjában kialakuló gyűrűáramba kerülnek. Időlegesen tárolódik korpuszkuláris energia a sugárzási övezetekben is. Az időlegesen tárolódó energia a gyűrűáramból alacsony szélességeken a gyűrűáramot alkotó  $O^+$ ,  $He^+$  és  $H^+$  ionok, valamint a külső légkör hidrogénatomjai közötti töltéscsere reakció

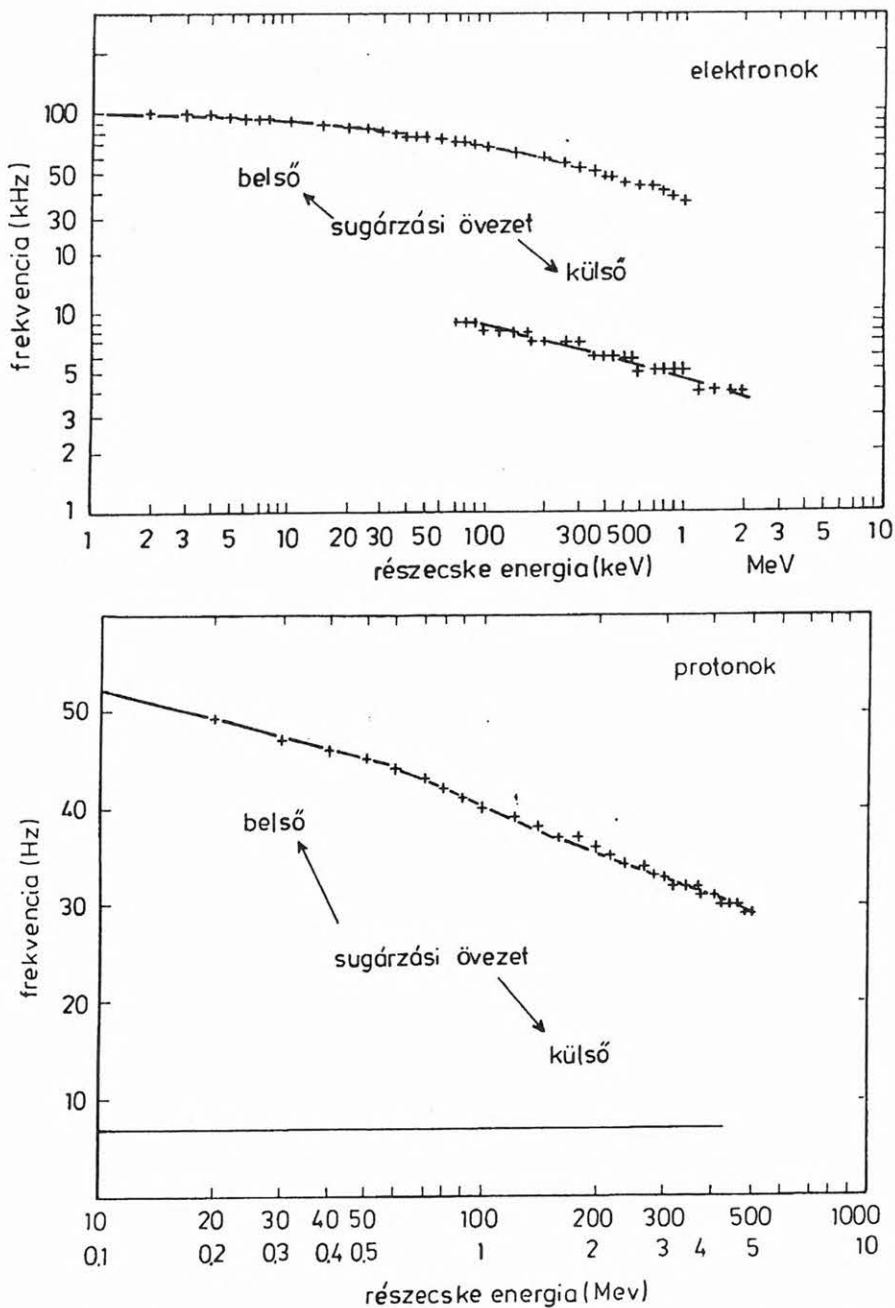
útján, a sugárzási övezetekből a geomágneses tér zárt erővonalainak térségében hullám-részecske kölcsönhatás útján kerülhet a légkörbe. A Föld körüli térségbe bejutott korpuszkuláris energia egy része el is távozik, más része az utóbb említett folyamatok közvetítésével a légkörbe kerül.

A hullám-részecske kölcsönhatás plazma-, illetve elektromágneses hullámok és az elektromos töltéssel rendelkező részecskék jelenlétét feltételezi. Ilyen plazmahullámok pl. a geomágneses pulzációk, elektromágneses hullámok pl. a légköri elektromos kisülések, a villámok sugárzása. A hullám-részecske kölcsönhatás akkor jön létre, ha a hullámok periódusa, illetve frekvenciája megegyezik a részecskék karakterisztikus periódusával (pl. erővonal körüli giromozgásának periódusával), vagy annak egész számú többszörösével. Ebben az esetben ion, vagy elektron ciklotron rezonanciáról beszélünk (1. ábra). A folyamatban az ion vagy elektron energiát ad át a hullámnak. Ennek következtében a részecske sebességének erővonal menti komponense az erővonalra merőleges komponenshez viszonyítva megnő, behatolási mélysége és így semleges molekulával való ütközésének valószínűsége is növekszik. Az ütközés eredményeként a részecske a geomágneses tér által korlátozott állapotából kiszabadulva a légkör sűrűbb rétegeibe csapódik, ott adja le energiáját. A részecske precipitáció hatásának tanulmányozása az ionoszférában a pályázat keretében a rádióhullámok

<sup>1</sup>MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, H-9400 Sopron, Csatka u. 6-8.

<sup>2</sup>ELTE Geofizikai Tanszék, H-1083 Budapest, Ludovika tér 2.

<sup>3</sup>Magyar Állami Eötvös Loránd Geofizikai Intézet, H-1145 Budapest, Kolumbusz u. 17–23.



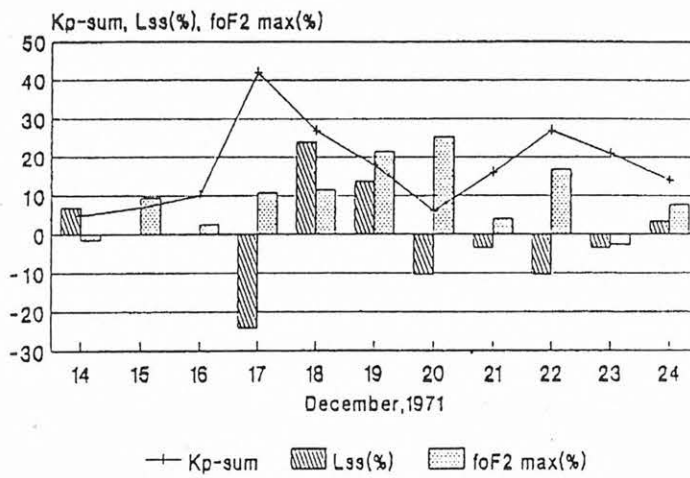
1. ábra. Az ion-, illetve elektron-ciklotron rezonancia létrejöttéhez szükséges hullámfrekvencia és a részecske-energia közötti összefüggés

Fig. 1. Relation between the wave frequency necessary for the formation of ion-, and electron resonance, respectively and the particle energy

terjedésének segítségével, a geomágneses vihar utóhatás (MTA GGKI), a Schumann-rezonancia frekvenciák (MTA GGKI) és a Trimpfi-effektus, valamint whistlerek (ELTE, ELGI) megfigyelése útján történt.

1971. december 18-án viszonylag nagy volt a mágneses tevékenység ( $\sum K_p = 27$ ), azt követően december 19-én és 20-án viszont jelentősen csökkent. Megállapítható, hogy a nagy mágneses tevékenységű napon (december 18-án) a plazmaszférikus elektron-

sűrűség az  $L > 2$  tartományban megnövekedett értékekkel jelentkezik a kicsi mágneses tevékenységű napokra meghatározott értékekhez viszonyítva. A 2. ábra 11 napos időszak folyamán mutatja be a geomágneses tevékenység ( $\sum K_p$ ), a Kühlungsbornban (Németország) napnyugtakor mért ionoszférikus abszorpció ( $L_{SS}$ ), valamint a Juliusruhban (Németország) meghatározott  $f_oF2_{max}$  változását. A geomágneses tevékenység december 17-én megjelenő maximumát ( $\sum K_p = 42$ ) követően utóhatás lép fel az



For sunset absorption and foF2 max:  
departures from the actual monthly  
medians are in percents

2. ábra. A napnyugtakor mért ionoszférikus abszorpció ( $L_{ss}$ ),  $foF2_{max}$  és a  $K_p$  geomágneses index változása

Fig. 2. Variation of the ionospheric absorption measured at sunset ( $L_{ss}$ ),  $foF2_{max}$  and the geomagnetic activity index  $K_p$

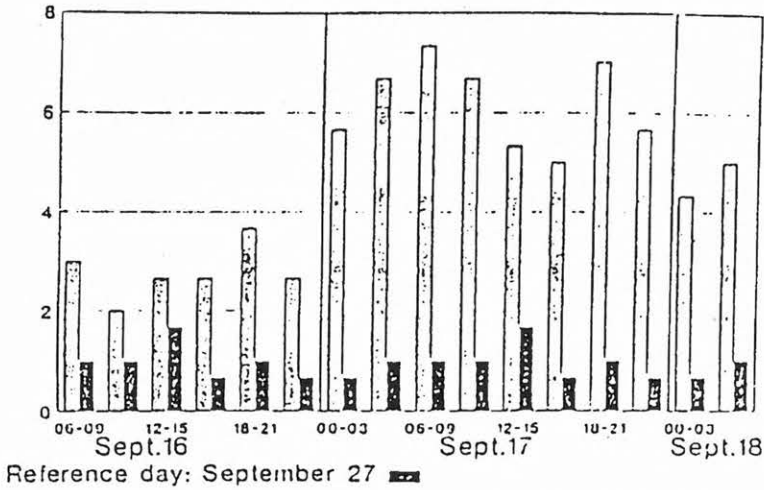
alsó ionoszférában, amit az abszorpció növekedése jelez december 18-án és 19-én. A hullám-részecske kölcsönhatás eredményeként a plazmaszférából az ionoszférába kicsapódó elektronok hatásának tulajdonítható abszorpció-növekedés szempontjából a plazmaszférikus elektronsűrűség széles L-tartományban jelentkező növekedése december 18-án, ténylegesen kedvező feltételt teremthetett az alsó ionoszférában az utóhatás kialakulására. az  $foF2_{max}$ -nak a geomágneses háborgás utáni néhány napos növekedése pedig azt jelzi, hogy az utóhatás a felső ionoszférában is megjelent.

A nagyeceni obszervatóriumban Schumann-rezonanciák alapmódusának frekvenciáját esetenként befolyásolja a geomágneses aktivitás. A 3. ábrán bemutatott két esetben a Nagyecenen mért aktuális napi frekvenciamenet mintegy 0,1–0,3 Hz-nyi elcsúszást mutat a nagyobb frekvenciák irányába a  $K_p \geq 4$  geomágneses indexszel jellemzett napokon. A tapasztalt frekvenciacsúszást a középső légkörbe (50–60 km-es magasságba) kiszóródott magnetoszférikus relativisztikus elektronokkal hoztuk összefüggésbe, amelyet műholdas mérések megerősítettek. Ezek az elektronok esetenként uralkodó ionizációs összetevőt jelentenek a középső légkörben közepes és magas szélességen. A  $K_p$ -index jó indikátora a relativisztikus elektronok külső magnetoszféra-beli jelenlétének, míg az első rezonancia-módus frekvenciacsúszása jó indikátora a középső légkörbe (az ionoszféra aljába) kiszóródott relativisztikus elektronoknak.

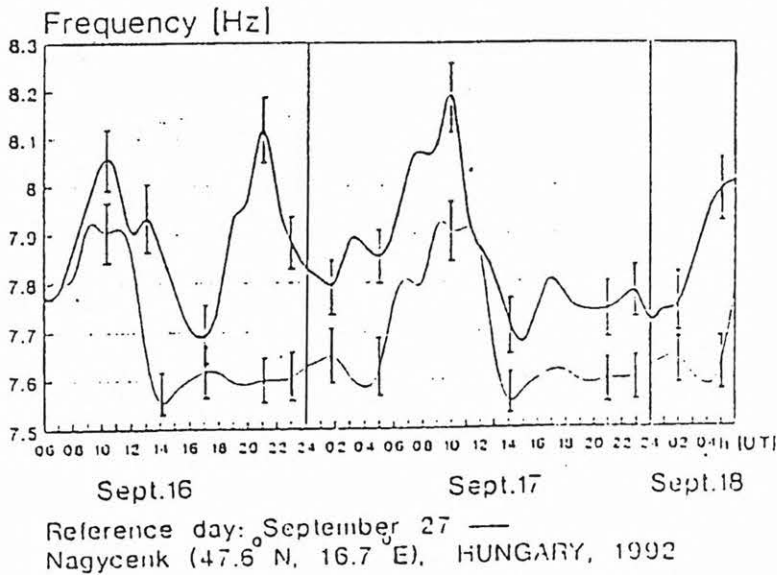
Trimpi-effektusnak azt a jelenséget nevezzük, amikor légköri elektromos kisülések, villámok által

kisugárzott elektromágneses hullámok hoznak létre olyan részecskekicsapódást, amely földi adók VLF rádióhullámainak terjedésében észlelhető. Ez csak úgy képzelhető el, hogy a fővillámnak megfelelő elektromágneses impulzus whistler módon, tehát a geomágneses erővonalak mentén terjedő része a hullám-részecske kölcsönhatás útján elektronok kiválását idézi elő dipól mágneses térben létrejövő befogott helyzetükből. A geomágneses térből szabadra váló elektronok a légkör 60 és 90 km közötti magasságtartományában az ionizáció növekedését okozzák. A Trimpí-effektus a VLF rádióhullámok amplitúdójának kb. egy percre tartó növekedéseként, vagy csökkenéseként nagyrészt csak a késő délutáni óráktól kora hajnalig tartó időszakban észlelhető (4. ábra). Általában a rádióhullámok fázisában is kimutatható. A hullámterjedés törvényei alapján arra a következtetésre lehet jutni, hogy azoknak a trimpiknek az esetében, amelyek a rádióhullámok amplitúdójának a növekedéseként jelentkeznek, a rádióhullámok a részecske kicsapódás által okozott megnövekedett ionizációjú rétegről verődnek vissza. Azoknak a trimpiknek az esetében viszont, amelyek a rádióhullámok amplitúdójának csökkenéseként észlelhetők, a rádióhullámok a részecskekicsapódás által okozott, megnövekedett ionizációjú rétegben, vagy e réteg felett verődnek vissza. Így a megnövekedett ionizációjú réteg a rádióhullámok abszorpcióját és a rádióhullám amplitúdójának a csökkenését idézi elő. Az Érden elkezdett mérések során sikerült olyan Trimpí-effektusokat is regisztrálni, amelyek fázisváltozással is jártak és fenti állításaink helyességét erősítik meg. Ezek az esetek a fázis

Kp-indices  
September 16-18, 1992



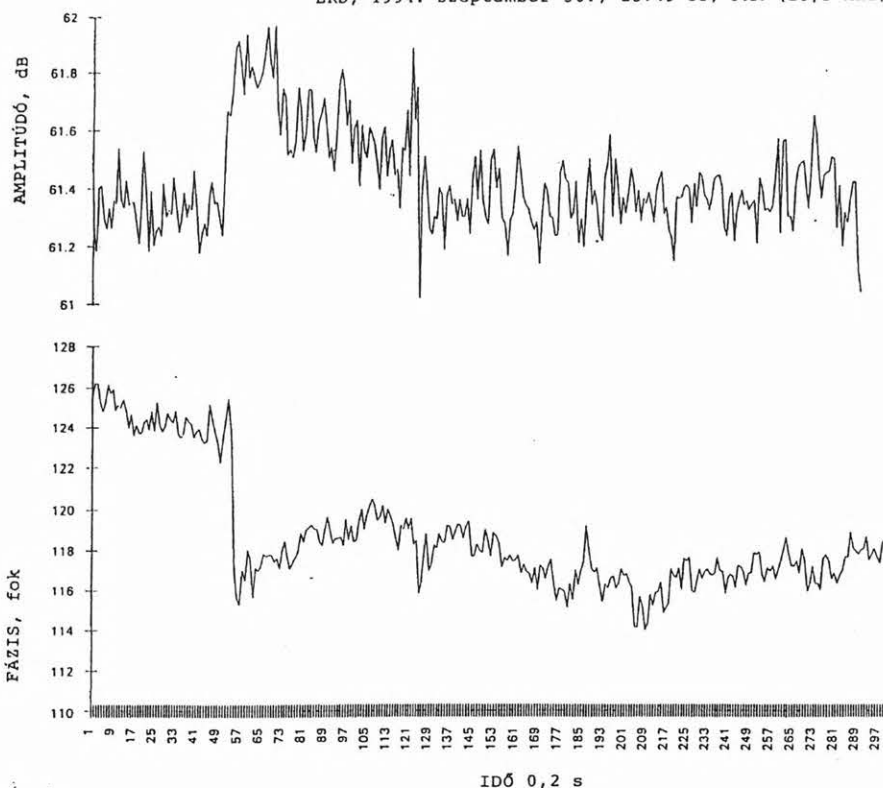
Variations of Schumann-resonances  
First mode - Vertical electric component



3. ábra. Schumann-rezonanciák alapl módusa frekvenciájának változása a geomágneses tevékenységgel  
Fig. 3. Variation of the first mode of the Schumann resonances with geomagnetic activity

néhány foktól néhányszor tíz fokig terjedő csökkenését vagy növekedését, az amplitúdó néhány tízed dB-től néhányszor tíz dB-ig terjedő növekedését vagy csökkenését mutatták. Mivel az amplitúdó növekedéssel egyidejűleg a fázis csökken, ami a terjedési út rövidülését jelzi, a rádióhullámok az ionizáció növekedés által érintett magasságtartományról verődnek vissza. Így az abszorpció csökken, a rádióhullámok amplitúdója növekszik. A pozitív fázis-perturbációhoz legtöbbször negatív amplitúdó perturbáció társult (5. ábra). A rádióhullámok az ioni-

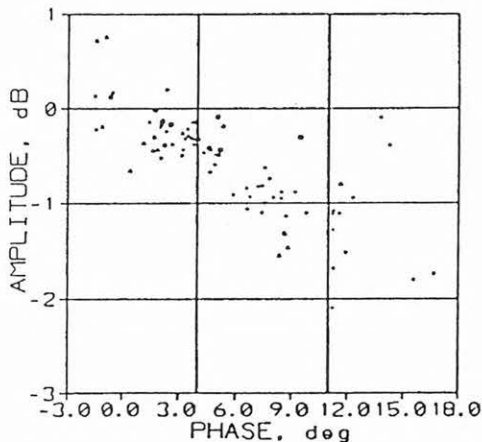
záció növekedés által érintett magasságtartományon belül, vagy felette verődnek vissza. A fázisnövekedés ugyanis a terjedési út növekedését, az amplitúdó csökkenés a rádióhullámok abszorpciójának növekedését jelzi. Ami a Trimpfi-effektus nagyrészt éjszakai észlelhetőségét illeti, abban nappal a jel/zaj viszony csökkenésén kívül az ionoszféra állapotában bekövetkező változásoknak is szerepe van. Napkeltével ugyanis a Nap elektromágneses sugárzásának hatására megindul az elektronleválás és ezzel az elektronsűrűség növekedése a 60–90 km-es ma-



4. ábra. Trimpi-effektus a VLF rádióhullámok amplitúdójában és fázisában

Fig. 4. Trimpi-effect as shown by the amplitude and phase of VLF radio waves

PHASE AND AMPLITUDE PERTURBATIONS  
 Transmitter: NAA,  $f=24$  kHz  
 Erd (Hungary), 19-20 December 1992 \*  
 4-5 February 1992  
 19 February 1992



5. ábra. A Trimpi-effektussal összefüggő amplitúdó- és fázisperturbáció közötti kapcsolat

Fig. 5. The relation between amplitude and phase perturbations due to the Trimpi effect

gasságtartományban. Ilyen erős elektronsűrűség növekedés mellett a Trimpi-effektus által előidézett ionizáció növekedés elhanyagolhatóvá válik.

A whistlerek regisztrálásával kapcsolatban a tihanyi obszervatóriumban egy új whistler vevőberendezés kialakításán fáradoztak. A feladat a régi berendezés elöregedése, korszerűtlenné válása miatt vált aktuálissá. A regisztrálás részben analóg, részben digitális formában történt. Kísérleteket végeztek a whistlerek 20 kHz-nél magasabb frekvenciájú részének az észlelésére, azonban a whistler jelet a VLF adók sávján át már nem tudták követni. Ehhez erre a célra kifejlesztett digitális technikára van szükség. A hasznos jelek tanulmányozása tehát szükségessé teszi a zajok vizsgálatát. A whistlerek és a hullám-részecske kölcsönhatással összefüggő, az elektromágneses hullámok paramétereiben mutatkozó változások észlelése szempontjából számításba jövő VLF tartományban az elvégzett vizsgálatok szerint a zajok három csoportra oszthatók. Ezek a hálózati frekvenciának megfelelő 50 Hz-es zaj, amely a földhurkok kiküszöbölésével, lyukszűrők alkalmazásával kiküszöbölhető. A második zajforrást 10 és 25 kHz között maguk a VLF adók jelentik. Ezek amplitúdója egy markáns whistler amplitúdójánál 5–20-szor nagyobb lehet. A harmadik zajforrás a VLF adók jeleinek interferenciájától származik, 1 és 5 kHz között jelentkezik, tehát beleesik a whistlerek frek-

venciatartományába. A VLF és egyéb műsorszóró adók interferenciái a túlvezérlés és a nemlineáris átviteli tartomány elkerülésével nagymértékben csökkenthetők.

A zajok egyidejű csökkentésének lehetősége, a jel/zaj viszony növelése nemcsak az alkalmazott vevőberendezés konstrukcióján múlik. Az előbbieken felsorolt zajforrások lehetőséget nyújtanak arra, hogy azok hatását a saját terjedési viszonyaik figyelembevételével csökkentsük. A zajforrások közül a VLF adók jelei és így jeleik interferenciája útján keletkezett „zajra” is ez vonatkozik, más úton terjednek, mint a whistlerek, illetve a whistler módon

terjedő más elektromágneses hullámok. A VLF adók jelei a Föld-ionoszféra hullámvezetőben terjednek. Ha a rádióhullámok az alsó ionoszférában megnövekedett elektronsűrűségű rétegben vagy réteg felett verődnek vissza, a rádióhullámok amplitúdója csökken. Ilyen eset áll elő napközben, a D tartomány elektronsűrűségének növekedésével vagy a részecske precipitáció eredményeként keletkező, megnövekedett elektronsűrűségű réteg megjelenésével. Ha a rádióhullámok a megnövekedett elektronsűrűségű rétegről verődnek vissza, az amplitúdó növekszik. Ugyanakkor ezek a változások a whistlerek terjedését alig befolyásolják.

