

# Naptevékenység és a rádióhullámok terjedése

BENCZE PÁL, ny. tudományos tanácsadó

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron

bencze@ggki.hu

**Kulcsszavak:** hirtelen ionoszférazavarok, rádióhullámok ionoszférikus és tranzionszférikus terjedése

Az ionosféra a felső légkörnek az a része, ahol elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása által előidézett ionizáció következtében szabad elektronok vannak jelen olyan koncentrációban, hogy a rádiófrekvenciás (elektromágneses) hullámok terjedését befolyásolni képesek.

## 1. Bevezetés

Mivel egy elektronnak az elektromosan semleges atom, vagy molekula elektronburkából való leválasztásához, az ionizációhoz az atom, vagy molekula minőségétől függő energiára (ionizációs potenciál) van szükség, a Nap elektromágneses sugárzásában terjedő energiának ennek megfelelő nagyságúnak kell lennie. Mivel – mint ismeretes – a sugárzásban terjedő energia a hullámhosszúság csökkenésével növekszik, az ionizációhoz szükséges energiát hordozó sugárzásnak mintegy 160 nm-nél kisebb hullámhosszúságúnak kell lennie. Az ilyen hullámhosszúságú sugárzás az ultraibolya sugárzásnak megfelelő hullámhossz tartományánál lényegesen rövidebb, ezért extrém-ultraibolya (EUV) sugárzásnak szokták nevezni.

Mint ismeretes, a naptevékenység az időben változik és ezek a változások időbeli lefolyásukat tekintve egyrészt többé-kevésbé periodikus jellegűek, másrészt szabálytalan lefolyásúak és véletlen jellegű előfordulásúak. A naptevékenység többé-kevésbé periodikus időbeli lefolyású változásai a kvázi 11 éves naptevékenységi (napfolt) ciklus és a Nap tengely körüli forgásával összefüggő 27 napos változás. A Nap elektromágneses sugárzása által közvetített energiát kifejező

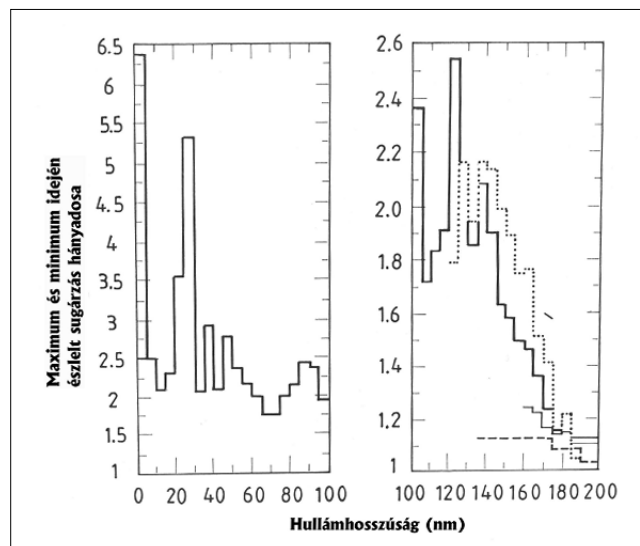
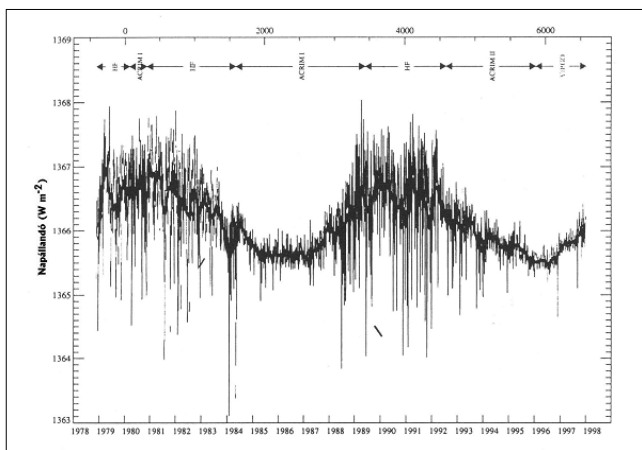
mennyiség a napállandó, azt az energiát fejezi ki, amely a Föld légkörének külső határán merőleges beesés esetén egységnyi felületre egységnyi idő alatt jut. Ennek a mesterséges holdak segítségével meghatározott 11 éves változását látjuk az 1. ábrán.

A változás nagysága mintegy 0,13%. A napállandóval kifejezett energia 51% az infravörös, 40% a látható, 9% ultraibolya sugárzás formájában jelenik meg. Szabálytalan időbeli lefolyásúak és véletlen jellegű előfordulásúak a napkitörések. A naptevékenység változásával a Nap elektromágneses sugárzása is változik. A változás azonban a sugárzás spektrumának csak egy részét érinti. A mesterséges holdakon elhelyezett sugárzásmérő eszközöknek köszönhetően ma már tudjuk, hogy a naptevékenység változásának a hatása csak a sugárzás spektrumának rövid hullámhosszúságú részében, az extrém-ultraibolya és a röntgen sugárzásban, illetve az igen nagy hullámhosszúságú, rádiófrekvenciás sugárzásban észlelhető.

2. ábra

A Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységi ciklus maximuma és minimuma idején a 200 nm-nél kisebb hullámhosszúságokon észlelt intenzitása hányadosának változása a hullámhosszúsággal (Bencze, 1994)

1. ábra A napállandó (besugárzás erőssége) változása 1979 és 1998 között (Pap és Fröhlich, 1999)



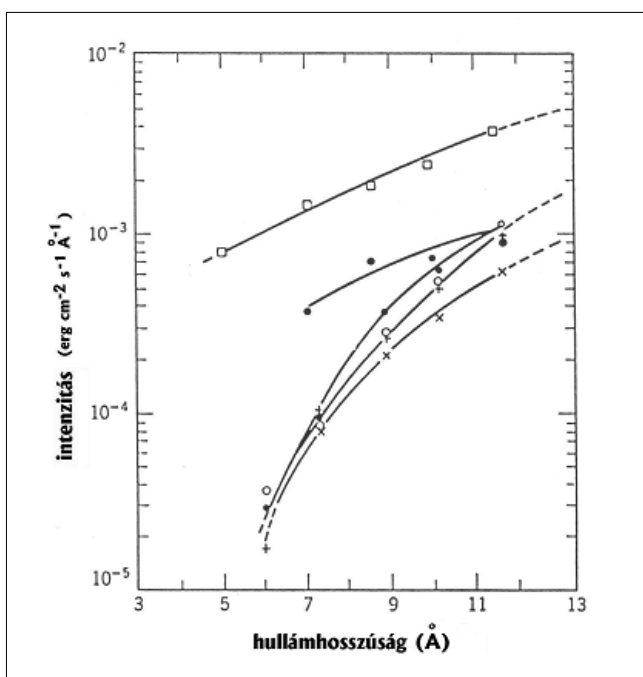
A Nap ugyanis rádiócsillag, rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzást is bocsát ki. Leegyszerűsítve a dolgokat azt mondhatjuk, hogy a naptevékenység változásának a hatása annál nagyobb, minél kisebb a hullámhosszúság. A naptevékenység növekedésével a sugárzás erőssége az extrém-ultraibolya hullámhosszúságú sugárzásnál kisebb hullámhosszúságoknál kezd el növekedni és a hullámhosszúság csökkenésével növekszik. A legnagyobb mértékű a sugárzás erősségének a növekedése a röntgensugárzás tartományában észlelhető (2. ábra).

Az eddig elmondottak értelmében tehát a naptevékenység kvázi 11 éves ciklusának és a 27 napos változásnak megfelelően a Nap elektromágneses sugárzásának az erőssége is változik, de csak az extrém-ultraibolya és a röntgensugárzásnak megfelelő hullámhosszakon. Ami a napkitöréseket illeti, a Nap elektromágneses sugárzásának a növekedése az extrém-ultraibolya és röntgen tartományban rövid időtartamú, csak mintegy 1 óráig tart (3. ábra).

Miután a fentiekben arról szó volt, hogy az ionizációt, a szabad elektronok koncentrációját elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása, illetve annak hullámhosszúsága és erőssége határozza meg, a naptevékenység változásai az ionoszférában is tükröződnek.

Az ionoszférában azonban nemcsak a Nap elektromágneses sugárzása idézi elő az ionizációt, hanem az elektromos töltéssel rendelkező részecskék fluxusa, a részecske, vagy korpuszkuláris „sugárzás” is, amely a Naptól és a tejútrendszerből (galaxisból) származik. A Nap korpuszkuláris sugárzását alkotó részecskék – főként protonok, elektronok – energiaspektruma elég széles, több GeV-től mintegy 100 eV-ig terjed (az eV az az energia, amellyel 1 V-nyi potenciálkülönbség egy elektron energiáját megnöveli).

3. ábra A Nap röntgen sugárzásának a változása egy napkitörés idején



A Nap esetében az energiaspektrumban a legnagyobb energiájú részecskék erős napkitörésekkel (ezeket proton fléreknek is szokták nevezni) vannak kapcsolatban, amelyek ritkák. Az ennél kisebb energiájú részecskék közepes, vagy a gyenge napkitörések idején észlelhetők. A legkisebb energiájú részecskék a Nap koronájából származnak és a korona magas (több millió K°) hőmérséklete által okozott állandó hőtágulással függenek össze. Mivel a Föld a Nap óriási kiterjedésű koronájában (a Nap légkörének külső részében) kering, az említett hőtágulást a Föld körüli térségben a Nap felől „fújó szélként” érzékeljük és napszélnek nevezzük.

A másik a Földet érő korpuszkuláris sugárzás a tejútrendszerből származik és részecskéinek energiája 10<sup>5</sup>eV-től 10<sup>20</sup>eV-ig terjed. A galaktikus kozmikus sugárzást protonok, hélium atommagok, továbbá könnyű, közepes és nehéz atommagok alkotják. Mind a Nap korpuszkuláris sugárzását alkotó, mind a galaktikus kozmikus sugárzásban terjedő részecskék bejutása a Föld légkörébe energiájuktól függ. Minél nagyobb a részecske energiája, annál nagyobb mélységig, akár a Föld felszínéig is eljuthat. Ezt a behatolást azonban a Föld mágneses terének mágneses dipólussal közelíthető belső része korlátozza. A behatolás lehetősége a Földrajzi szélességgel növekszik.

Az elmondottakból következik, hogy a Nap elektromágneses sugárzásán kívül a Nap korpuszkuláris és a galaktikus kozmikus sugárzás ionizáló hatása is érvényesül a légkörben. Átlagosan Egy levegő molekula ionizációjához átlagosan 24 eV energia szükséges.

## 2. Az ionoszféra szerkezete és a rádióhullámok terjedése

Mint azt a bevezetésben már említettük, a különböző gázok ionizációjához különböző energia szükséges. A levegő összetétele a magassággal változik. A magasság növekedésével mintegy 110 km magasságig a levegőt alkotó gázok koncentrációja egymáshoz viszonyítva nem változik. Erről a légkörben működő keverő mozgások (turbulencia) gondoskodnak. 110 km felett azonban ezek a keverő mozgások a magasság további növekedésével gyorsan háttérbe szorulnak, megindulhat a gázoknak a Föld nehézségi erőterében történő molekulasúly szerinti elkülönülése. Ennek következtében a nagyobb molekulasúlyú argon, oxigén és nitrogén molekulák koncentrációja a magassággal gyorsabban csökken, mint az ezeknél kisebb molekulasúlyú oxigén atomok, hélium és hidrogén molekulák koncentrációja. Így a magassággal változik a legnagyobb koncentrációjú gáz típusa.

Az ionoszféra kialakulása a Nap elektromágneses sugárzása és az elektromos szempontból semleges légkör közötti kölcsönhatás eredménye. Az ionoszféra tehát abban a magasságban jön létre, ahol a Nap elektromágneses vagy korpuszkuláris sugárzása még az ionizációhoz elegendő energiát hordoz és a légkör

magasság növekedésével csökkenő sűrűsége még elegendő a kölcsönhatás, vagyis az ionizáció létrejöttéhez. Ez a magasságtartomány kb. 60 km-től megállapodás értelmében 1000 km-ig terjed (4. ábra).

Az ionizáció következtében keletkező elektronok és ionok sűrűsége a magasság változásával rétegződést mutat. Az állandó rétegeket alulról felfelé az ABC betűivel jelölik. A legalacsonyabban fekvő, vagy ionoszféra alsó részében megkülönböztethető egyik rétegződés a D tartomány (60-90 km). A D tartomány kialakulását részben a galaktikus kozmikus sugárzás, részben a Nap kemény röntgensugárzása által okozott ionizáció idézi elő.

Ez azzal függ össze, ahhoz, hogy az ionizáló sugárzás ilyen mélyre, mintegy 60 km-ig hatolhasson be a légkörbe, nagy energiájúnak kell lennie. Az ionizáció eredményeként az elektronok mellett nagyrészt molekuláris oxigén ionok ( $O_2^+$ ) és nitrogénionok ( $NO^+$ ) keletkeznek. A D tartományban az elektronok és ionok koncentrációja a magasság növekedésével parabolaszerű növekedést mutat.

A D tartományban az elektronsűrűség az ionizáló sugárzás megszűnésével az éjszakai órákban nagyon alacsony szintre csökken. A D tartomány felett az elektronsűrűség magassággal történő változásában jól megkülönböztethető rétegződésként jelentkezik az E tartomány. Az E tartományban (90-150) az E réteg képezi a maximális elektronsűrűséget. Az E réteg felett, mintegy 110 és 150 km között az elektronsűrűség alig változik. Az éjszakai órákban itt az elektronsűrűség csökkenése (valley) is előfordulhat, amely az ionoszféra vizsgálatára még ma is leggyakrabban alkalmazott módszerrel, az ionoszféra függőlegesen kisugárzott változó frekvenciájú (1-20 MHz) rádióhullámokkal történő szondázásával nem mutatható ki. Az E tartományban a semleges légkör összetétel-változásának megfelelően a legnagyobb koncentrációban előforduló  $O_2^+$  és  $NO^+$  ionok mellett a magasság növekedésével növekszik az  $O^+$  ionok koncentrációja. Az E tartomány felett található F tartományban (150-1000 km) az elektronsűrűség tovább növekszik, a legnagyobb koncentrációban jelenlevő ion pedig az  $O^+$  lesz.

A nappali órákban a nyári hónapokban két rétegződés különböztethető meg az F tartományban. A 180 km körül fellépő F1 réteg a maximális ionizációnak megfelelő rétegződés, míg a magasabban 250 km körül ki-

alakuló F2 réteg az ionoszférában a maximális elektronsűrűséget képviseli. Mivel az F1 réteg kialakulása az ionizációval függ össze és az ionizációt előidéző, Napból érkező elektromágneses sugárzás a nappali órákra korlátozódik, a megvilágítottság megszűnésével az F1 réteg is feloszlik. Az F2 rétegben az elektronsűrűség éjszakai fennmaradása a töltésszemlegesítés (rekombináció) kis sebességével függ össze. Az F2 réteg felett az elektronsűrűség a magasság növekedésével exponenciális csökkenést mutat, amelyet az előbbiekben említett ionoszféraszondázással már nem lehet követni.

### 3. A naptevékenység hatásai az ionoszférára és a rádióhullámok terjedésére

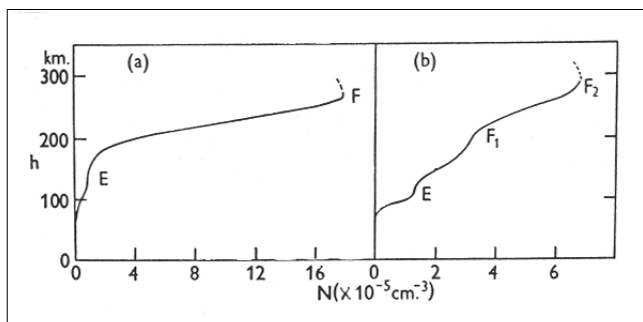
A naptevékenység hatásait két részre oszthatjuk, a Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő változásai és a Nap korpuszkuláris sugárzásának a naptevékenységgel történő változásai hatására.

#### 3.1. A Nap elektromágneses sugárzásának hatása a rádióhullámok terjedésére

Amint azt a bevezetésben már említettük, a Nap elektromágneses sugárzásának a változásai részben a naptevékenység többé-kevésbé periodikus változásaihoz kapcsolódnak, részben véletlen jellegű előfordulásúak. Az elektromágneses sugárzás többé-kevésbé periodikus változásai, mint a kvázi 11 éves naptevékenységi ciklus, vagy a 27 napos tengelykörüli forgással összefüggő sugárzás változás mindkét esetben a 2. ábra alapján az elektromágneses sugárzás extrém ultrabolya és röntgen sugárzásának a naptevékenységgel történő növekedését, illetve csökkenését idézi elő. Ennek megfelelően növekszik, illetve csökken az elektronsűrűség az ionoszféra minden tartományában.

Az elektronsűrűség naptevékenységgel összefüggő változásának kifejezésére empirikus formulák állnak rendelkezésünkre minden rétegződésre vonatkozóan. Az elektronsűrűség növekedése a rádióhullámok terjedésében a frekvencia és az elektronsűrűség egymáshoz viszonyított nagyságától függően a rádióhullámok erősödését és gyengülését is okozhatja. A rádióhullámok amplitúdójának változása, abszorpciója az ionoszférába való belépéstől a visszaverődés magasságáig, illetve visszaverődést követően az ionoszférából való kilépésig a rádióhullámok által az ionoszférában megtett úton előidézett abszorpcióból (non-deviative abszorpció) és a visszaverődés környezetében létrejövő abszorpcióból (deviatív abszorpció) tevődik össze. Ha a visszaverődési magasság alatt az ionoszférában számottevő az abszorpció, mint például az E rétegből történő visszaverődés esetén a D tartományban nappal, akkor a non-deviatív abszorpció dominál. Ha a visszaverődés magassága alatt nem jön létre számottevő abszorpció, mint a D tartományban éjszaka, az E rétegből

4. ábra Az elektronsűrűség (N) változása a magassággal (h) (Ratcliffe, 1960)



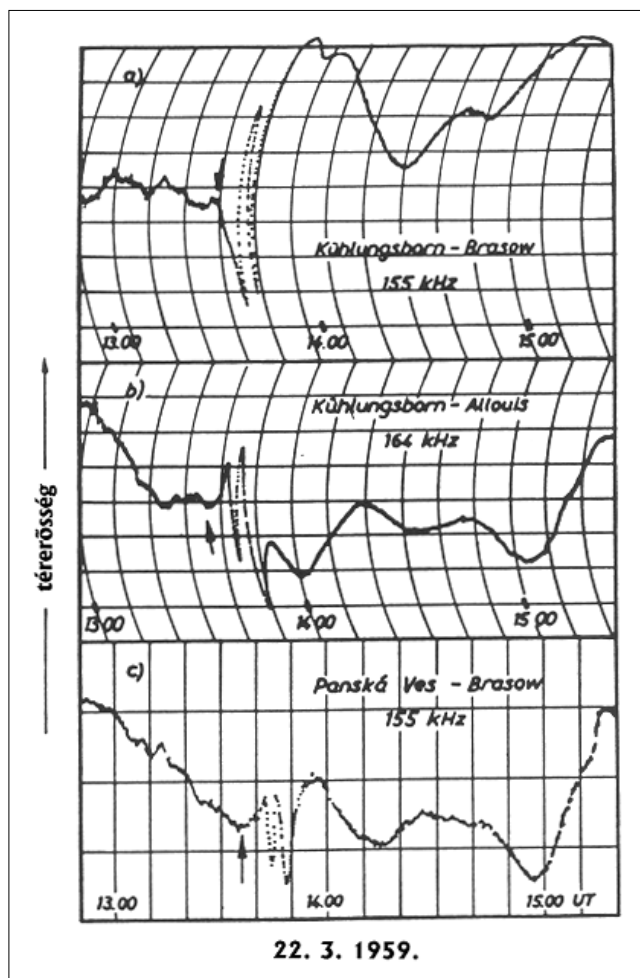
történő visszaverődés esetén a deviative abszorpció a uralkodó. Ez a helyzet a rádióhullámok hosszú (LF) és középhullámú (MF) sávjában. Minden esetben figyelembe kell venni azt is, hogy például hosszú távú összeköttetés esetén a visszaverődés nappali ionoszférában, vagy éjszakai állapotú ionoszférában történik-e. Az utóbbi helyzet a kedvezőbb. A forgalmazás, illetve vételi lehetőség ezeken a frekvenciákon naplementétől napkeltéig kedvezőbb, mint a nappali órákban.

Az F1 réteg esetében azt mondhatjuk, hogy mivel csak a nappali órákban van jelen és akkor is csak a nyári hónapokban, a F1 réteg felhasználhatósága átvitel szempontjából korlátozott és a nappali órákban alatta kialakult ionoszféra tartományokban létrejövő non-deviative abszorpció következtében gyenge vételi viszonyokra számíthatunk mind az MF, mind a HF hullámhossz sávban. Az F2 réteg felhasználásával történő forgalmazás esetén a rövidtávú összeköttetések esetén a nappali órák szintén kedvezőtlenek. Hosszú távú forgalmazásnál a visszaverődés az éjszakai állapotú ionoszférában történhet és ez javíthatja a vételi viszonyokat.

A Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő periodikus változásai a hosszú periódus következtében lassú lefolyásúak. Így a rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatásuk is lassan változik, napról-napra történő változása szinte nem is észlelhető. Az elektromágneses sugárzás napkitörésekkel összefüggő véletlen előfordulású, gyors növekedése azonban már viszonylag gyors és a rádióhullámok terjedése szempontjából kedvezőtlen változásokat hozhat létre. Szerencsére ez a növekedés csak rövid ideig (~1 óra) tart (lásd 3. ábra).

A napkitörések által az ionoszférában előidézett változásokat összefoglaló névvel hirtelen ionoszférikus zavaroknak (SID – sudden ionospheric disturbances) nevezik. Ezek a zavarok szinte a teljes rádiófrekvenciás tartományban észlelhetők. A LF sávban a villámok elektromágneses sugárzásától származó légköri rádiózaj (atmospheric radio noise) szintje általában növekedni szokott (SEA – sudden enhancement of atmospheric, atmospheric-nek vagy röviden sferics-nek nevezik egy villám elektromágneses sugárzásának azt a részét, amely a Föld felszíne és az ionoszféra alsó határa által képezett hullámvezetőben terjed). A rádióhullámok ugyanis a Nap megnövekedett extrém ultraibolya és röntgen sugárzásával összefüggő ionizációnövekedés következtében a D tartomány felső és az E tartomány alsó részében verődnek vissza. Ez csökkenti az abszorpció hatását. A VLF sávban a Nap elektromágneses sugárzásának a növekedése a rádióhullámok amplitúdójában is észlelhető. Ezt a jelenséget hirtelen amplitúdó anomáliának nevezik (SFA – sudden field anomaly).

Az SFA relatív fázismérés útján is kimutatható, amennyiben feltételezzük, hogy a felületi hullám fázisa nem változik. Mivel a megnövekedett ionizáció következtében csökken a visszaverődés magassága (a napkitöréssel járó elektromágneses sugárzásváltozás a rönt-



5. ábra  
 Napkitörés hatása a hosszúhullámú (LF) rádióhullámok terjedésére, hirtelen fázis és amplitúdóváltozás (SFA) (Entzian, 1966)

gen tartományban idézi elő a legnagyobb változást) az ionizáló sugárzás behatolása a légköbe megnő. Ennek a visszavert rádióhullámok útjának a rövidülése az eredménye, amely az eredő térerősségben fázis, illetve amplitúdóváltozással jár (5. ábra).

Mivel a forgalmazás legnagyobb része az F2 réteg felhasználásával történik, ezért a legfontosabb a napkitörésekkel járó elektromágneses sugárzásnövekedés hatása a HF sávban, amelyet rövidhullámú „elhalkulás”-nak (SWF – short wave fade-out) neveznek. A rövidhullámú „elhalkulás” az F2 réteg felhasználásával történő forgalmazást teljesen lehetetlenné teszi, amennyiben a HF rádióhullámokat a Nap röntgen tartományban megnövekedett elektromágneses sugárzása által a D és E tartományban létrehozott megnövekedett elektronsűrűség rétegű „elnyeli”.

A SWF tehát ily módon akár egy órára is megszűnteti a forgalmazás lehetőségét. A hirtelen ionoszféra zavarokhoz sorolható még a kozmikus rádiózaj abszorpciójának hirtelen megnövekedése (SCNA – sudden cosmic noise absorption), amelyet a HF tartományban lehet észlelni, ahol az ionoszféra más részben átlátszó a rádióhullámok számára. Megemlíthető még a hirtelen frekvenciaváltozás (SFD – sudden frequency deviation).

A napkitörésekkel járó elektromágneses sugárzásnövekedés hatása a rádióhullámok terjedésére annál nagyobb, minél közelebb van a visszaverődés pontja a sugárzás függőleges beesési pontjához (subsolar pont).

### 3.2. A Nap korpuszkuláris sugárzásának hatása a rádióhullámok terjedésére

A Nap korpuszkuláris sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő változása már mélyrehatóbb és hosszabb ideig tartó változásokat hoz létre az ionoszférában. Míg az elektromágneses sugárzás napkitöréssel kapcsolatos növekedése a napkitörés időpontjától számított 8 perc múlva észlelhető a Föld nappali oldalán, addig a korpuszkuláris sugárzás növekedésének átlagosan két napra van szüksége, hogy elérje a Föld környezetét. Ez az idő a napkitörés helyétől és erősségétől függ. Ha a napkitörés a napkorongnak a Föld felől nézve a bal (azaz a keleti) oldalán jön létre, a korpuszkuláris sugárzásváltozás elkerüli a földet, így háttalan marad.

A korpuszkuláris sugárzás változásának a hatása csak akkor érvényesül, ha az a látható napkorong Föld felől nézve jobb (azaz nyugati) oldalán keletkezik. Az utóbbi esetben a napkitörés időpontjától számítva annál rövidebb idő múlva észlelhető a korpuszkuláris sugárzás változása, a részecskék fluxusának a növekedése és a hatás az ionoszférában annál nagyobb, minél erősebb a napkitörés. A korpuszkuláris sugárzás növekedését tulajdonképpen a Napból kidobódott anyag bolygóközi térben felhőként történő terjedése idézi elő. Ez a felhő a Föld mágneses terében bonyolult folyamatokat indít el. Ezeknek a folyamatoknak a következménye az ionoszférában is észlelhető ionoszférikus vihar (a geomágneses viharral egyidőben). Az ionoszférikus vihar közepes földrajzi szélességeken a forgalmazásra alkalmazott F2 rétegben általában az elektronsűrűség gyakran több napig tartó csökkenésének formájában nyilvánul meg.

Kis földrajzi szélességeken az ionoszférikus vihar az elektronsűrűség növekedéseként észlelhető. Az ionoszféra többi tartománya közül a napkitöréssel járó korpuszkuláris sugárzásnövekedésnek – a Föld mágneses terében elindított folyamatokat tekintve – csak a D tartományban van még nagyobb közepes földrajzi szélességeken hatása. Itt ugyanis az ionoszférikus vihar időszakában az elektronsűrűség több napos, akár 10 napig is eltartó növekedését idézi elő. Ami az ionoszférikus viharok a rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatását illeti, közepes földrajzi szélességeken az F2 réteg segítségével történő forgalmazás kedvezőtlenebbé válását idézi elő. Ezt még növelheti a D tartományban meg-növekedett elektronsűrűség által okozott abszorpció.

Összefoglalva a naptevékenység változásaival változó elektromágneses és korpuszkuláris sugárzás rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatása az ionoszféra állapotának a változásain keresztül érvényesül. A terjedési viszonyok kedvezőtlenebbé válásával, az F2 réteg felhasználásával nagy távolságra történő forgal-

mazás hatékonyságának csökkenése várható az elektromágneses sugárzás napkitöréssel való növekedése esetén (SWF).

A rádióhullámok abszorpciójának ezzel kapcsolatos növekedése a nappali oldalon ugyan rövid ideig tart, de zavarja a forgalmazás folyamatosságát. A MUF (maximum usable frequency) a megnövekedett abszorpció ellensúlyozó hatása növekedhet. A korpuszkuláris sugárzás napkitörést követő növekedésének következményeként az elektronsűrűség közepes földrajzi szélességeken fellépő csökkenésével a MUF csökken. Annak ellenére, hogy a D tartományban a rádióhullámok abszorpciója növekszik. Ugyanakkor kis szélességeken az elektronsűrűség növekedése miatt a MUF növekszik. Erre abban az esetben kell ügyelni, ha az adótól délre fekvő vevő felé történik a forgalmazás. Ha a rádióhullámok terjedésének az útja északi irányban, a sarkvidéken keresztül vezet, erős abszorpcióval kell számolni, amely a D tartományban létrejövő elektronsűrűség-növekedéssel függ össze.

### 4. Rádióhullámok transzionszférikus terjedésével összefüggő ionoszférikus hatások

Eddig a rádióhullámoknak az ionoszféra közvetítésével történő terjedésével, illetve a naptevékenység által előidézett ionoszférikus változások hatásával foglalkoztunk. Az űrkorszak beköszöntével azonban egyre elterjedtebbé vált a rádióhullámok transzionszférikus terjedésének alkalmazása. A mesterséges holdakkal, emberes űrrepülésekkel összefüggésben a kapcsolattartás csak transzionszférikus terjedés útján lehetséges. Az űreszközök alkalmazása szükségessé tette az energiafelhasználás minimális értékre való szorítását érdekében az adóteljesítmény csökkentését, a transzionszférikus kapcsolat fenntartásához pedig a frekvencia növelését.

A frekvencia növelését nemcsak az a tény tette szükségessé, hogy a rádióhullámok átjussanak az ionoszférán, hanem az is, hogy az ionoszférában minél kisebb veszteséget szenvedjenek. A csökkentett adóteljesítmény mellett, csak így lehet megfelelő jel/zaj viszonyt elérni. A transzionszférikus terjedés alkalmazása azonban még így sem problémamentes. A frekvencia növelésével a hullámhosszúság csökken és előtérbe kerülnek az ionoszféra elektronsűrűségében mutatózó, különböző térbeli kiterjedésű irregularitások. Addig míg a rádióhullámok hullámhosszúságához viszonyítva ezeknek az irregularitásoknak a mérete elhanyagolható volt, a terjedést nem befolyásolhatták. Amint azonban a rádióhullámok hullámhosszúsága az irregularitások méretéhez közelít, nem terjedést kedvezőtlenül befolyásoló jelenségek (diffrakció, szóródás) léphetnek fel. Az ionoszférában az irregularitások két fő típusát különböztethetjük meg. Az egyik a szporadikus E réteg, a másik a spread F jelenséget létrehozó irregularitások.

#### 4.1. Az ionoszféra sporadikus E (Es) rétege

Már az elnevezés is jelzi, hogy ennek az ionoszféra E tartományában keletkező rétegződésnek az előfordulása nem szabályszerű. Az előfordulással kapcsolatban elmondható, hogy a Nap bármely órájában észlelhető, de az előfordulás a nyári hónapokban a leggyakoribb, a teli hónapokban még egy-egy napot tekintve is ritka. Az Es rétegek előfordulásának a száma a naptevékenység növekedésével csökken, közepes földrajzi szélességen nyáron a naptevékenységi maximum időszakában mintegy 20-30%-kal kevesebb az előfordulás. A geomágneses tevékenységgel az előfordulás alig változik. Egyébként a rétegződés élettartama egy fél napnál is hosszabb lehet. A rétegződés magassága a nap folyamán változik, szinte szabályszerűen a reggeli óráktól az E réteg feletti magasságokból kiindulva az esti órákra magasságából fokozatosan veszítve.

Inkoherens és koherens radarmérések azt mutatták, hogy az Es rétegekben a rétegbe beágyazódva a réteg elektronsűrűségénél nagyobb elektronsűrűségű „foltok” fordulnak elő, amelyek egymástól több kilométer távolságban követik egymást a rétegben. Ennek alapján, mivel az Es rétegek vastagsága általában kicsi (km nagyságrendű), hullámterjedés szempontjából az Es réteget vékony diffrakációs rácsnak tekinthetjük. A rács legfontosabb paramétere a „foltok”, mint rácsponatok közötti átlagos távolság. Ennek a távolságnak a rádióhullámok hullámhosszához viszonyított nagysága határozza meg az Es rétegnek a terjedésre gyakorolt hatását. A HF és VHF sávban az Es rétegek nagy távolságokra történő forgalmazást tesznek lehetővé, míg az UHF sávban a rádióhullámok szintillációját idézik elő.

#### 4.2. A spread F jelenséget előidéző irregularitások

A spread F jelenséget a változó frekvenciájú, függőleges irányban kisugárzott rádióhullámokkal végzett ionoszféraszondázás ionogramjain az ionoszféra F tartományából érkező szórt visszaverődések hozzák létre. A szóródás egyrészt annak a következménye, hogy visszaverődések nemcsak függőleges irányból, hanem attól kissé eltérő irányból is érkeznek, másrészt az adóantenna „látókörén” belül változik az elektronsűrűség. Az elektronsűrűség változását ún. plazma instabilitások hozzák létre. Ezek nemcsak az F tartomány magasságára kiterjedő elektronsűrűség-irregularitásokat hoznak létre, hanem az irregularitások a mágneses erővonalmenti kiterjedéssel is rendelkeznek. A spread F jelenség nagyrészt az éjszakai órákban fordul elő és télen gyakoribb, nyáron ritka. A spread F előfordulása a naptevékenységgel általában alig változik.

Összefoglalva az elmondottak a rádióhullámok transzionoszférikus terjedésének felhasználása szempontjából arról adhatnak felvilágosítást, hogy napszakot és évszakot tekintve mikor a legkedvezőbbek a körülmények. Az ionoszférikus irregularitások előfordulása a transzionoszférikus összeköttetés számára a nyári nappali órákat teszi a legalkalmasabbá, bár az Es rétegek jelenléte éppen a nyári hónapokban hathat zavarólag.

#### Irodalom

- [1] Bencze P. (1965):  
Kandidátusi értekezés, Sopron.
- [2] Bencze P.(1994):  
Légkörfizika, Kézirat, Sopron.
- [3] Entzian, G. (1966):  
Sonneneruptionseffekte im Langwellenbereich. Vorträge der Sommerschule Untere Ionosphäre, Kühlungsborn, 1964 (ed. E. A. Lauter).  
NKG der DDR, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Berlin.
- [4] Knuth, R. (1966):  
Spezielle Untersuchungen zum Nachwirkungseffekt in der Langwellenabsorption. Vorträge der Sommerschule Untere Ionosphäre, Kühlungsborn, 1964 (ed. E. A. Lauter). NKG der DDR,  
Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
- [5] Pap, J. M. Fröhlich, E. (1999):  
Total solar irradiance variations.  
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 61, pp.15-24.
- [6] Ratcliffe, J. A. (1960):  
Physics of the Upper Atmosphere.  
Academic Press, New York

