

és a megmunkálás technológiája a kutatás tárgya. A másik régészeti téma azt vizsgálja, hogy a középkori magyar aranyművesek milyen eljárással készítették a ruhák, ékszerek és kegytárgyak díszítésére használt nemesfém lemezeket és huzalokat.

Több kutatócsoport is vizsgálja a rendkívül nagy deformációval előállított *nanoszemcsés fémek tulajdonságait*. Az ilyen anyagok kiemelkedően jó mechanikai, elektromos és korrózióálló tulajdonságokat mutatnak.

Egy másik csoport *meteoritok szerkezetét* vizsgálja. A kétsugaras mikroszkóppal vizsgálhatók például azok a nagynyomáson létrejövő fázisok, amelyeket a légkörbe való belépés során kialakuló lökéshullám hozott létre.

Biológusok, geológusok és fizikusok együtt vizsgálják a budai meleg forrásokban élő *baktériumtörzsek* barlangképződésben és a rádium-felhalmozásban játszott szerepét. A mikroszkóp környezeti üzemmódja vizes környezetben is vizsgálhatóvá teszi a baktériumtelepeket.

Geológusok vizsgálják az ősi vulkáni kőzetekben bezáródott *olvadékszárványok tulajdonságait*. A zárványok feltárásában a fókuszált ionnyaláb egyedülálló lehetőséget kínál.

Számos más téma is használja a Quanta 3D mikroszkóp különleges tulajdonságait, hiszen nagy előny, hogy ezek a tulajdonságok egy rendszerben találhatóak, és az is, hogy egy ilyen világszínvonalú eszköz használata céljából nem kell távoli országok kutatóintézeit felkeresni.

A rendszer külső felhasználók számára is nyitott. A kétsugaras mikroszkópon máris több egyetemen kívüli hazai és külföldi csoport dolgozik.

Befejezés és köszönetnyilvánítás

Jó döntésnek bizonyult az ELTE TTK-n, hogy a kutatóegyetemi pályázat nyújtotta finanszírozási lehetőséget nem elaprózta, hanem nagyműszerek vásárlására fordította. Ezek egyike a Quanta 3D kétsugaras mikroszkóp. A mikroszkópon együtt dolgoznak fizikusok, vegyészek, biológusok, geológusok és régészek, hiszen a témák többsége interdiszciplináris jellegű. Az együttműködés egymás eredményeinek megismerésén túl az együttgondolkodást, a problémák közös erővel történő megoldását is jelenti, ami új minőséget is teremt. Az eszközt 2010 őszén telepítettük, és a közös munka eredményeképpen azóta több mint 50 olyan publikáció és konferencia-előadás született, amelynek létrejöttében a kétsugaras rendszernek döntő szerepe volt.

Aki a rendszer tulajdonságaival és a rajta folyó kutatási témákkal kapcsolatban szeretne bővebb információhoz jutni, annak rendelkezésére áll a projekt honlapja, a submicro.elte.hu internetes címen.

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg (a támogatás száma TÁMOP 4.2.1/B-09/1/KMR-2010-0003).

VÖRÖS LIDÉRCEK – GIGANTIKUS »TŰZIJÁTÉK« A FELSŐLÉGGYÖRMBEN

Bór József,^a Barta Veronika^{a,b}

^aMTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron

^bNyugat-Magyarországi Egyetem, Kitaibel Pál Környezettudományi Doktori Iskola, Sopron

A zivatarfelhők fölött nagy magasságban megjelenő felvillanások egyik típusa a „vörös lidérc”, amit a nemzetközi szakirodalomban *red sprite* néven tartanak számon. A sprite-ok az angolszász mitológia szárnyas tündérei, akik például az őszi levelek elszíneződéséért is felelősek. Zivatarfelhők fölötti névrokonaik mindössze annyiban hasonlítanak hozzájuk, hogy nehéz őket megfigyelni, valamint fölfedezésük legalább annyi kérdést vetett föl, illetve olyan élénk (tudományos) érdeklődés irányult feléjük (különösen az

első években), mintha valóban tündért fogtak volna. Nevüket mégis e hasonlóságok alapján kapták. A *vörös lidérc* elnevezés is csupán ezt igyekszik tükrözni, ezért e jelenségek éppen csak annyiban kapcsolhatók a hazai mondák lidérceihez/lúdvérceihez, mint a világyűr barna/fehér törpéi (csillagai) a kerti törpékhez.

Kialakulás és morfológia

A vörös lidércek légköri elektromos kisülési jelenségek, amelyek a meteorológiai értelemben vett felsőléggkörben, azaz a zivatarfelhők teteje és az (éjszakai) ionoszféra alsó határreége közötti térrészben alakulnak ki. Ez közepes szélességeken 15–100 km-es magasságtartománynak felel meg. A felsőléggköri kisüléshez szükséges elektromos tér intenzív troposzférikus villámkisüléseket követően jöhet létre aktív zivatargö-

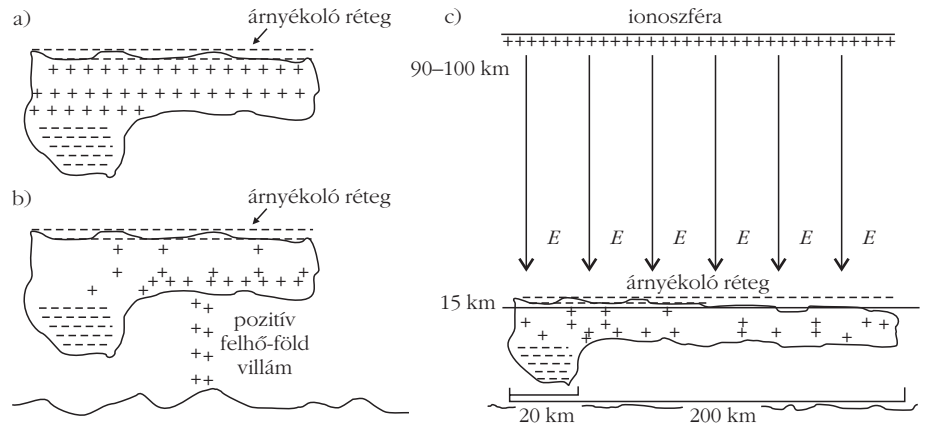
Az MTA GGKI-ban végzett munkát az OTKA T-034039, TS-40848, NI-61013, K-72474 témái és a Magyar Űrkutatási Iroda pályázati támogatásai segítették. A nemzetközi kapcsolatok kialakításában az European Cooperation in Science and Technology (COST) *A villámkisülés fizikája és hatásai* (The Physics of Lightning Flash and Its Effects) című P18-as számú akciója játszott számottevő szerepet. A szerzők köszönetet mondanak *Sátori Gabriellának* a kutatómunkában nyújtott hasznos tanácsaiért.

cok fölött (1. ábra). Az 1.a ábra az elektromos töltések zivatarfelhőkbeli általános, nagyléptékű eloszlását szemlélteti. Egy pozitív felhő-föld villámot követően (1.b ábra) a felhőben maradó negatív töltések újrendeződéséhez szükséges rövid ideig a felhő és a szabad töltéseket tartalmazó ionoszféra alsó határretege között egy kvázistacionárius elektromos tér alakul ki (1.c ábra).

A felsőlégkörben fölépülő elektromos tér erőssége a troposzférikus villámkisülés függőleges töltésmomentum-változásának¹ függvénye, mivel jó árnyékolást föltételezve a (példában) pozitív töltések eltávolítása egyenértékű egy azonos nagyságú és kiterjedésű, de ellentétes előjelű töltésgóc semleges környezetben való elhelyezésével. Így például egy magasabban elhelyezkedő és/vagy nagyobb töltés nagyobb térerősség kialakulásához vezet. Amennyiben ez a térerősség meghalad egy kritikus értéket, bekövetkezhet a kisülés a zivatarfelhő teteje és az ionoszféra közti térrészben (2. ábra).

A fönti elképzelést még 1925-ben vetette papírra C. T. R. Wilson [1], aki – följegyzései szerint – maga is látni vélte ennek megfelelő felvillanásokat zivatarok fölött. A jelenség hivatalos fölfedezése mégis mintegy 65 évvel későbbre datálódik, amikor John Winckler és két munkatársa éjszakai sarki fény (*Aurora borealis*) észlelés tesztelése közben véletlenül kapott lencsevégre néhány vörös lidérctet. A hiteles felvételeknek köszönhetően a légkörkutatók figyelme a zivatarfelhők fölé irányult, ahol a fokozott megfigyeléseknek köszönhetően nemcsak vörös lidérceket, hanem számos további, szintén elektromos aktivitáshoz kapcsolható fénjelenséget is sikerült észlelni. A változatos jelenségcsoportot alkotó felsőlégköri elektro-optikai emissziók (FEOEM, a szakirodalomban *transient luminous events* – TLEs) közül e cikkünkben a vörös lidércekről esik több szó. Az érdeklődő olvasó például az egyik szerző doktori értekezésében találhat további részleteket e jelenségekről [2].

A vörös lidércek első észlelései után már behatárolható volt, hogy ezen emissziók 60–80 km-es magasságban alakulnak ki. A későbbi, nagysebességű (10^3 – 10^4 képkocka/másodperc) videofelvételek arra is rávilágítottak, hogy a lidérc jellemzően a környező elektromos térben lefelé haladó, fókuszált, kvázi-önfenntartó kisülési frontként (*streamer*) jelenik meg. Az elsődleges streamer az alsóbb légrétegekbe érve egyre több szárra ágazik. A kezdeti alakot a kisülési front központi csatornájából induló, fölfelé haladó, esetenként szintén

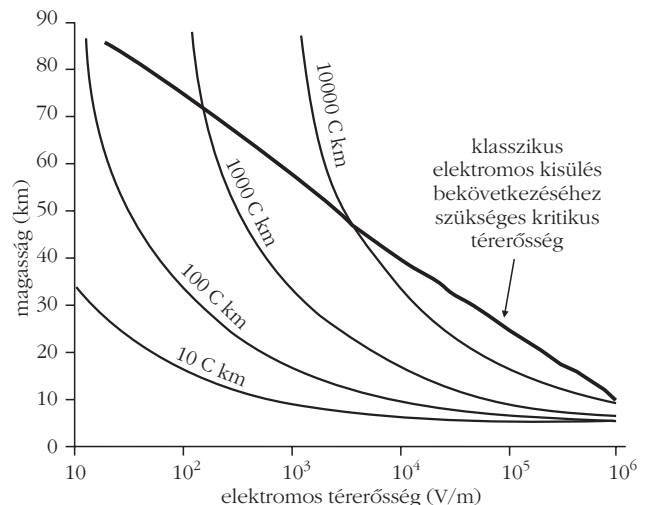


1. ábra. Kvázi-stacionárius elektromos tér kialakulása a zivatarfelhő fölött pozitív felhő-föld villám-kisülés után (forrás: <http://www.ess.washington.edu/Space/AtmosElec/spriteinfo.html>).

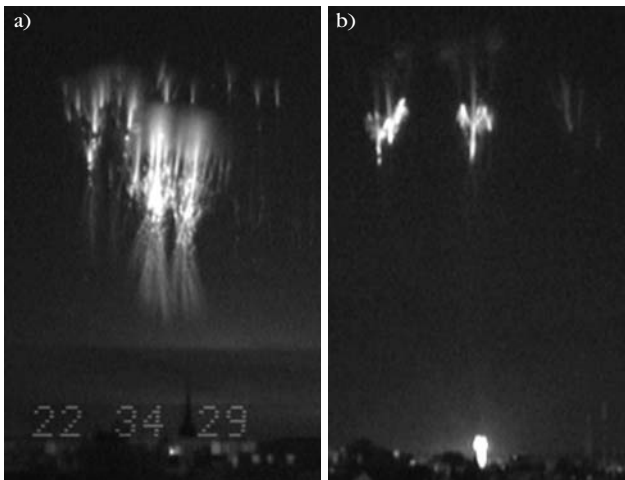
elágazó további hasonló streamerek követhetik, amelyek nagyobb magasságban diffúz emissziófelhőbe mehetnek át. Így a jelenség a különböző esetekben az egyszerű oszlopos alaktól a faágakhoz hasonlóan elágazó változaton keresztül az összetettebb – répára, medúzára vagy madárra emlékeztető – különböző végső formát ölthet (3. és 4. ábra). A teljes alakzat csak a hosszabb (több ezredmásodperces) expozíciós idejű filmkockákon vagy fényességtartó (*peak hold*) felvételeken jelenik meg, mivel a kisülési frontok áthaladása után a kisülési csatorna általában nem marad fényes.

A kisülés alapfolyamata alig néhány ezredmásodperc alatt lejátsszódik. A lefelé haladó kisülési frontokban keletkező szabad elektronok a környező elektromos térben fölfelé mozognak, és a kisülési csatorna felső szakaszában koncentrálnak, ami okozhat koncentrációs hullámot okozhatnak, aminek következtében a csatorna felső hányada fölfénylik [3]. Ez az emisszió többször tíz ezredmásodpercig is fennmaradhat. A kutatók szerint valószínűsíthető, hogy az egyes esetekben fölfelé induló és elágazó kisülési frontokat is ilyen töltésrezervoár táplálja, az elmélet e része azonban még igazolásra vár.

2. ábra. Elektromos térerősség különböző magasságokban, eltérő függőleges töltésmomentumú villám-kisülések után – Wilson-diagram [7].



¹ A villám-kisülés függőleges töltésmomentum-változása a kisülés során átáramlott töltések mennyiségének és a kisülő töltéscentrum magasságának szorzata.

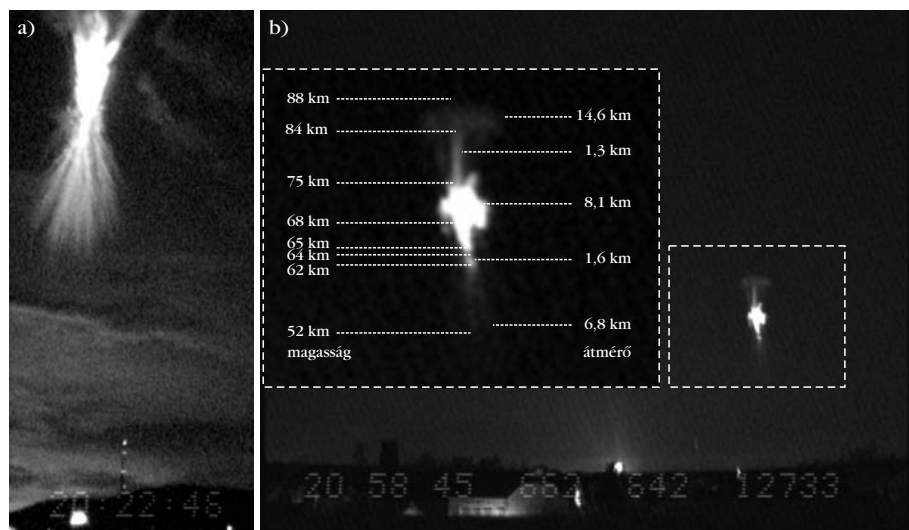


3. ábra. Sopronból fényképezett vörös lidércek. a) Oszlopok és medúzák a Cseh Köztársaság fölött 2009. augusztus 2-án (Universal Time Coordinated = 22:34:29,059, észlelő: Bór József). b) Madárta emlékeztető alakzatok Ausztria fölött 2008. augusztus 7-én (UTC = 22:56:42,893, észlelő: Barta Veronika). Alul a soproni sörgyár kivilágított víztornya látható.

Megfigyelések szerint mind a lefelé, mind a fölfelé haladó kisülési frontok elágazásánál, illetve kereszteződésénél a környezetüknél fényesebb tartományok, „gyöngyök” (*beads*) jöhetnek létre. A gyöngyök élettartama a kisülési frontokéhoz képest hosszú; ugyancsak akár többször tíz ezredmásodpercig is láthatók maradnak. Az elektromos eredetű fölfénylések mellett nem zárható ki az ionizáció hatására bekövetkező kémiai átalakulások közben gerjesztett légköri összetevők hosszabb időállandójú relaxációjától eredő fénysugárzás sem. Ezeknek a lassabban elhalványuló emisszióknak köszönhetően a vörös lidércek egyes (főleg központi) részei valamivel könnyebben észlelhetők (3.a ábra).

A vörös lidércek méretei tekintélyt parancsolóak (4. ábra). Az oszlop alakúak átmérője néhányszor

4. ábra. Sopronból fényképezett répa alakú vörös lidércek. a) Szlovénia fölött, a megfigyelőhelytől 100–120 km-re 2010. augusztus 8-án (UTC = 20:22:46,369, észlelő: Barta Veronika). Alul a körülbelül 60 m magas soproni TV adótorony látható a megfigyelőhelytől légvonalban körülbelül 1 km-re. b) A cseh–német határ közelében 2007. július 21-én (UTC = 20:58:45,652, észlelő: Bór József). Alul a soproni sörgyár kivilágított víztornya látható.



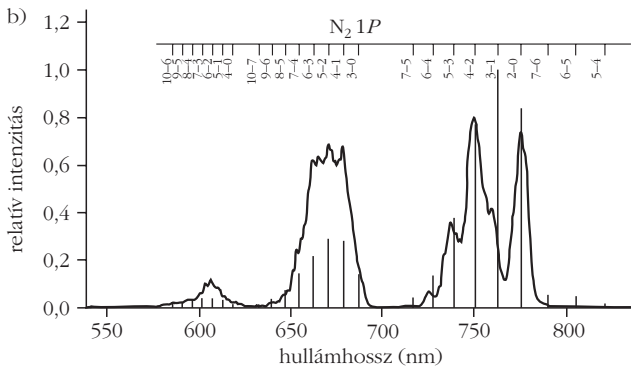
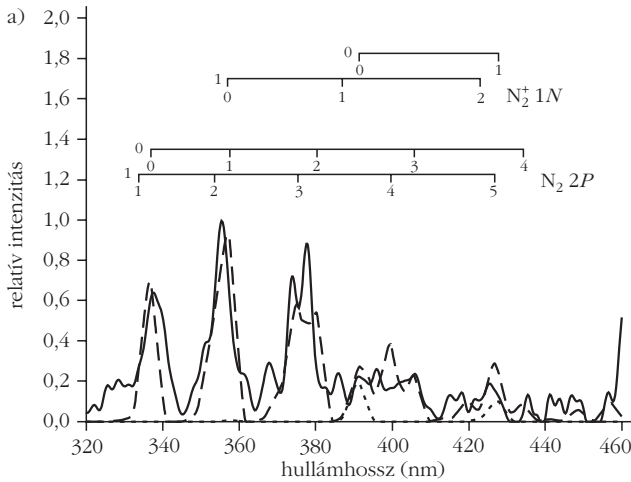
száz méter és 1,5 km közötti, míg hosszuk széles határok között változik, megközelítheti a 15–20 km-t is. A répa alakú lidércek központi, legfényesebb részének hossza is ebbe a mérettartományba esik, míg legnagyobb átmérőjük meghaladhatja a 8–10 km-t. A lefelé elágazó „hajszályökerek” szélsőséges esetben egészen a felhőtetőig leérhetnek, a felső diffúz emissziófelhők teteje pedig 85–90 km-es magasságig ér, átmérőjük 10–15 km-es (4.b ábra). A felsőlégköri kisülések a troposzférikus villámok kisülési csatornáit kialakító elővillámoknak/előkisüléseknek felelnek meg, csak a felsőlégkörben nem következik be a fő villámkisülés (*return stroke*). Összehasonlításképpen a troposzférikus elővillámok kisülési csatornája 1–10 m átmérőjű [4]. A méretek eltérése elsősorban a felsőlégkörben uralkodó, nagyságrendekkel alacsonyabb légnomásnak és -sűrűségnek tulajdonítható.

A vörös lidércek ritkán fordulnak elő magányosan. Jellemzőbb, hogy több elem jelenik meg egyszerre (3. ábra), vagy alkalmanként gyorsan egymás után. A nagyobb csoportok által elfoglalt terület vízszintesen az 50 km-es átmérőt is elérheti, mint például a nagyszámú, kiemelkedően fényes elemet tartalmazó, medúzához hasonlatos összetett eseményeknél.

Sugárzásuk összetétele

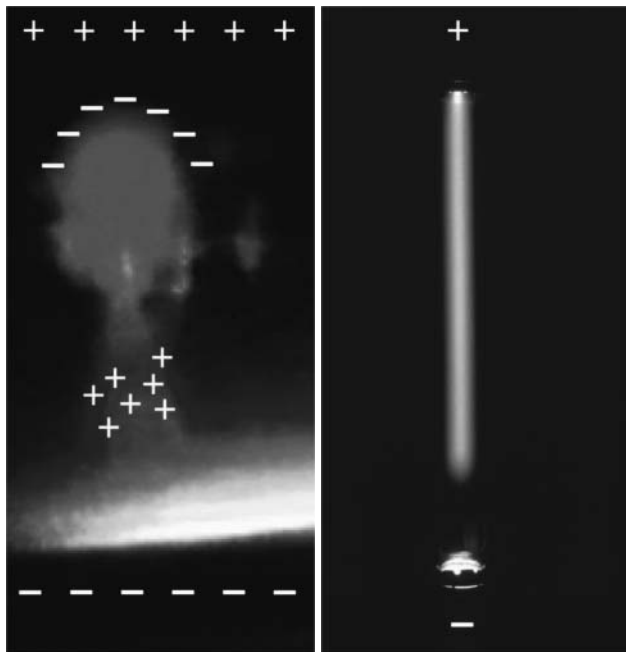
Az emissziók optikai spektrumát 50–60 km-es magasság fölött a szabad elektronokkal való ütközések közben gerjesztett semleges nitrogénmolekulák relaxációjából eredő vörös és közeli infravörös sugárzás uralja (5. ábra). A jelenség nevében a „vörös” jelző erre utal. Ehhez a csökkenő magassággal egyre nagyobb mértékben adódik hozzá az egyszeres pozitív töltésű nitrogén molekulaionok hasonló mechanizmusból eredő, ám kék színű járuléka. A kékes szín a lidérc alsóbb indáinál dominánsná is válik. A vörös lidércek fénysugárzásához nagyon hasonló az alacsony nyomású kisülési csövekben létrehozott gázkisülésé (6. ábra).

A FEOEM-ek fényességét általában a sarkifény-kutatásban használatos rayleigh egységekben (R) adják meg. 1 R 10^{10} olyan foton, amely az észlelés irányában végtelen, 1 m² keresztmetszetű oszlopban keletkezett, és az oszlop keresztmetszetén az észlelő felé 1 s alatt lépett ki. Például az éjszakai égbolt sugárzása 250 R körüli. Az emissziók élettartamát pontosabban fotométeradatok alapján lehet meghatározni. A vizsgálatok szerint a legfényesebb vörös lidércek sugárzása többször 10 MR (1 MR = 10^6 R)



5. ábra. Vörös lidérc mért spektruma. a) A felső részen a N_2 molekula $2P$ gerjesztésének és a N_2^+ ion $1N$ gerjesztésének relaxációs sorozatához tartozó hullámhosszak láthatók. A folytonos vonal a mért spektrum, a szaggatott pedig modellszámítás eredménye [5], 3.8 ábra). b) A felső részen a N_2 molekula $1P$ gerjesztésének relaxációs sorozatához tartozó hullámhosszak láthatók, a függőleges vonalak a sarki fény (Aurora borealis) elektronbecsapódások következtében várható emisszióinak modellezett intenzitását mutatják ([6], 3. ábra).

6. ábra. Vörös lidérc a valóságban (bal oldalon) és a kisülési csőben (jobbra) [7].



és néhány tized MR között változik, de rövidebb időskálára lebontva a kisülési frontoké az $5 \cdot 10^5$ MR-t is elérheti.

A vörös lidércek teste az optikai sávon kívüli frekvenciatartományban is sugározhat észlelhető intenzitású elektromágneses hullámokat a benne átfolyó áram változása révén. Ilyen sugárzást a nagyon alacsony frekvenciatartomány alsó hányadában, 1500 Hz alatt észleltek. A mért jelintenzitás arra utal, hogy a vörös lidércek testében bekövetkező függőleges töltésmomentum-változás esetenként akár az 1200 Ckm-t is meghaladhatja, azaz összemérhető lehet a jelenséget kiváltó troposférikus villám kisülésével.

Modellezésük

A klasszikus elektromos kisülés tulajdonságain alapuló modellek a vörös lidércek testében lejárló fizikai folyamatokat a folyékony plazmára alkalmazott magneto-hidrodinamikai megközelítéssel írják le. Az ezekre a modellekre épített számítógépes szimulációk számot adnak a lidérc alacsonyfrekvenciás sugárzásáról, és jól visszaadják a jelenség nagyléptékű struktúráit: a felső diffúz tartományt, az alsó szálak szerkezetét, valamint meghatároznak egy középső „átmeneti” tartományt is. A streamerek elágazásainak statisztikai jellemzőit sikeresen modellezik a fraktáltulajdonságok fölhasználásával. E modellek hátránya, hogy nem adnak magyarázatot a jelenség morfológiai sokszínűségére, nem értelmezik a kisülési frontok fejlődését, és nem szolgáltatnak a megfigyelésekkel egyező streamerméreteket. Nem lehetséges továbbá e modellek keretén belül értelmezni azon vörös lidérc megjelenését, amelyeknél a keltő villámuk függőleges töltésmomentum-változása jóval a kritikus érték alatti volt.

E hiányosságok egy részét a vörös lidérc kialakulását lavinakisüléssel (*runaway breakdown*) magyarázó elméletek áthidalják. A lavinakisüléses modellek nagyenergiájú elektronok keletkezését feltételezik a környező kvázistacionárius tér fönnállása alatt. Ezek a térben gyorsulva a légkör alkotóit szabad elektronok keletkezése közben ütközéssel ionizálják. Amennyiben az elektronok két ütközés között több energiát nyernek a tértől, mint amennyit az ütközésben elveszítenek, elektronlavina jön létre, és a keletkező ionok relaxációs sugárzását mint vörös lidércet észlelhetjük. Mivel a légkör sűrűsége a jelenség kialakulásának magasságában közel 5 nagyságrenddel kisebb, mint a tengerszinten, a töltött részecskék szabad úthossza ennyiszor nagyobb. Nagyenergiájú, szabad elektronok ugyanakkor keletkezhetnek például a galaktikus kozmikus részecskék légkörben való ütközéses fékeződése során, így a lavinakisülés kialakulhat. A lavinakisülésen alapuló szimulációk néhány répa alakú emisszió esetében szolgáltatnak a megfigyelésekhez leginkább közeli eredményeket.

Nem zárható ki az sem, hogy a kisülés beindulásához szükséges térerősség kialakításához akár a kvázistacionárius teret kialakító forrásvillám, akár vala-

mely azt szorosan követő másik villámkisülés elektromágneses impulzusa is hozzájárul [8]. Bár az impulzus csupán nagyon rövid időre növeli meg a térerősséget, ez is elegendő lehet, tekintve, hogy a streamerek spontán kialakulásához szükséges elektromos térnél gyengébb is elegendő ezek előrehaladásához és fennmaradásához. Ugyanakkor meg kell jegyeznünk, hogy a kritikus térerősség értéke nem állandó, hanem helyileg csökkenhet – például meteoritikus testek égésének hatására – a kipárolgó fémionok révén megnövekvő vezetőképesség miatt.

Az oszlop alakú vörös lidércek legtöbb megfigyelt tulajdonságát pontosan visszaadó elmélet szerint az elsődleges streamer(ek) kialakulása a forrásvillámlás után a nagyobb térerősség alatt álló teljes tértartományon átvonuló ionizációs hullám destabilizációjának következménye [3, 9]. E modell arra is rámutat, hogy a semleges légkör sűrűségének és az alsó ionoszféra elektronsűrűségének gradiense a lefelé haladó kisülési frontoknak kedvez. Ez segíthet megválaszolni azt a kérdést, hogy a vörös lidércek miért szinte kizárólag pozitív polaritású villámkisülések után jelennek meg.

Észlelésük, előfordulásuk

A vörös lidércek közvetlen optikai megfigyelése hatalmas méreteik ellenére egyáltalán nem egyszerű, szabad szemmel majdnem reménytelen vállalkozás. A zivatarfelhők fölé kell látnunk, amihez a zivartartól távolabb kell lennünk. Legalább a cél irányában tiszta égbolt és jó látási viszonyok is szükségesek. Ha mindez adott, akkor is igen ébernek kell lenni, hiszen a jelenség rendkívül gyors lefolyása miatt egy rosszul időzített pislogáskor elszalaszthatjuk a fölvi villanást. A feladatot nehezíti, hogy bár a zivatarok irányát (amelyek lehetnek akár a látóhatár alatt is) villámtérkép vagy műholdas felhőképek alapján be lehet határolni, legalábbis egyelőre nem tudjuk előre jelezni, hogy pontosan hol és mikor következnek be egy-egy lidérc fölbukkanása. Ehhez járul még, hogy az éjszakai égbolton a rendkívül rövid időre megjelenő vörös és lilás színeket nehezen érzékeli a szemünk.

Nappal több tényező miatt sem láthatunk vörös lidérceket. Egyrészt a szórt napfény teljesen elfedi a nagyságrendekkel gyengébb emissziókat. Másrészt a nappali ionoszféra alsó határrétege jóval közelebb húzódik a földfelszínhez, ezért a felsőlégköri kisülések 50–60 km magasan alakulhatnak ki, amihez a nagyobb légsűrűség miatt jóval nagyobb térerősség szükséges (2. ábra). Az ekkora térerősséget előidéző igen nagy függőleges töltésmomentum-változású villámkisülések rendkívül ritkák.

Az emissziók megfigyeléséhez célravezetőbb, a hitelesség szempontjából pedig egyenesen nélkülözhetetlen egy megfelelő észlelő- és rögzítőegység alkalmazása. Az optikát illetően érdemes minél nagyobb fénygyűjtőképességű (kisebb f-értékű) választásra törekedni, valamint az is előny, ha mind az optika, mind a kamera CCD-je (vagy az alkalmazott

fotemuulzió) a közeli infravörös tartományban is érzékeny. A lidércek alsó, szálas szerkezetének kékes sugárzását még érzékeny megfigyelőegységgel is csak ritkán sikerül megörökíteni. Ennek oka, hogy az eleve kisebb intenzitású kék fényből – a Rayleigh-szórás miatt – a légkörön át vezető hosszú út során kevés foton jut el a kameráig.

Az expozíció többi paraméterének behangolásánál a minél nagyobb érzékenység mellett olyan beállítást érdemes választani, aminél a képen a csillagok és az égbolt sötétje között a legnagyobb kontraszt van, miközben a kép zajossága a lehető legkisebb. Fényképezőgép használatakor sorozatfelvétel készítésével van a legnagyobb esélyünk vörös lidércek megörökítésére. A fényképeken vagy videofilmen általában könnyebb fölfedezni e jelenségeket. A kamerák digitális vagy digitalizált felvételeit, de akár élőképet is számítógépen futó eseményfelismerő szoftver segítségével elemezve az emissziók megtalálása még egyszerűbb. A kutatók által alkalmazott legegyszerűbb összeállításokban 1,4 vagy kisebb f-értékű objektívet, normál CCIR vagy EIA videószabványú (monokróm, 25 vagy 30 váltott soros képkocka/másodperc), a meteor megfigyeléseknél is alkalmazott analóg videokamerákat használnak. A digitalizált képsorokon az eseményészleléshez legtöbb helyen a japán fejlesztésű „UFO Capture” program szolgál.

A vörös lidércek (és általában a FEOEM-ek) tulajdonságainak megismerése céljából megfigyelési kampányokat szerveznek, amelyekben az anyagi lehetőségek szerint ballonos, repülőgépről vagy műholdról folytatott megfigyelésekkel összehangolt földfelszíni észleléseket is folytatnak. A telepített földfelszíni optikai észlelések az adott belátható területen jellemző FEOEM előfordulásokról gyűjthetnek információt. A műholdas megfigyelés hosszú távon globális lefedettséget biztosít, egy időben azonban itt is csak egy korlátozott térrészt lehetséges monitorozni.

A közvetlen optikai megfigyelés mellett a vörös lidércek közvetett észlelése is lehetséges. Alacsonyfrekvenciás rádiósugárzásuk révén több ezer km távolságban is észlelhetők, mivel a rádióhullámok csillapítása e frekvenciákon különösen alacsony a Föld-ionoszféra hullámvezetőben. A felsőlégköri kisülések infrahanghullámokat is keltenek, amelyek a forrástól legfeljebb 1000 km távolságban – karakterisztikus mintázatuk alapján – fölismerhetők.

Mind a közvetlen műholdas, mind a közvetett elektromágneses észlelések alapján a vörös lidércek globális átlagos előfordulási gyakoriságát kétpercenként 1-2 eseményben határozták meg. A lidércek a zivatarok globális eloszlását követve főleg szárazfölköz fölött jellemzők, de vízfelületek fölött is megfigyelhetők. Megjelenésük a zivatarok érett, illetve hanyatló fázisában várható, amikor a nagy töltésmomentumú pozitív felhő-föld kisülések is gyakoribbak. Egy átlagos zivatar fölött néhány (több tíz) esemény figyelhető meg a zivatar teljes élettartama alatt, de ritkán előfordul, hogy egyetlen kiterjedt zivatarrendszer fölött több száz jelenséget is sikerül lencsevégre kaptani.

Környezeti hatásuk

A vörös lidércek teljesebbé tették a globális elektromos áramkörrel alkotott képet, lévén az aktív zivatarok és az ionoszféra közötti töltés- és energiaáramlás közvetlen bizonyítékai. A vizsgálatok alapján ugyanakkor e jelenségek (és általában a FEOEM-ek) szerepe csekély a földfelszín és az ionoszféra közötti 250–300 kV-os potenciálkülönbség alakításában. Fő szerepet inkább a zivatarok és az elektromosan töltött csapadékot hullató felhők által generált kis áramsűrűségű, de kiterjedt vezetési áramok játszanak, miközben az impulzív FEOEM-ek és villámkisülések járuléka a különböző polaritású események egymást kiegyenlítő hatása miatt csupán 1% körüli. Alkalmanként azonban a vörös lidérc testén átfolyó áram közel 1 V-tal is csökkentheti az ionoszféra potenciálját [10].

A vörös lidércek mezoszférikus átmeneti vezetőképességi anomáliáknak is tekinthetők, amelyek elektromos tulajdonságaira például a nagyon alacsony frekvenciájú (very low frequency – VLF, 3–30 kHz) hullámok terjedésére gyakorolt hatásuk alapján lehet következtetni. Ezt a gyakorlatban katonai VLF-adók jeleinek monitorozásával vizsgálják. A VLF-hullámok szórás mintázata a szórócentrum méretére utal, a jelperturbáció nagyságrendje az ionizáció mértékét jelzi, a perturbáció relaxációs tulajdonságaiból pedig az ionizáció mértékének függőleges változására lehet következtetni. A mérések alapján az ionizáció nem terjed túl a lidércek optikailag megfigyelt testén, mértéke viszont 4–6 nagyságrenddel is meghaladhatja a környezetükben levőét. Az ehhez tartozó elektronkoncentráció közelítőleg megegyezik az éjszakai ionoszféra „E” rétegére jellemző értékkel (10^4 – 10^5 cm^{-3}).

Az emissziók kialakulása során a kisülési frontokban az elektromos energia akár 50%-os határfokkal is fordítható főleg ózon, NO_x , atomos hidrogén és nitrogén, valamint negatív ionok képződésére. Az NO_x vegyületek transzportfolyamatokkal a sztratoszférába jutva ózonszökkenést okozhatnak. Ez motiválta a vörös lidérceknek a semleges légkör összetételére gyakorolt hatását vizsgáló kutatásokat. A műholdas mérések azonban nem mutattak ki szignifikáns különbségeket villámaktivitásban különböző területek (szárazföld-óceán, közepes – alacsony szélességek) fölötti NO_x koncentrációk között. A mért NO_x koncentráció változása a villámaktivitás időszakos változásával sem mutatott korrelációt. Ez alapján a vörös lidérceknek valószínűleg nincsen globális hatása a semleges légkör összetételére, a helyi hatásuk ugyanakkor jelentős lehet [11].

Jelentőségük

A fölfedezésük óta eltelt alig több mint 20 év alatt a vörös lidércek számos tulajdonságát sikerült megismerni és sikeresen modellezni. A velük kapcsolatos kérdések közül azonban sok máig is válaszra vár. A kialakulásukhoz kellő szükséges és elegendő feltéte-

lek nem teljesen ismertek. Például a nagy függőleges töltésmomentumú villámkisülések közül sem lehet mindegyik után vörös lidércet megfigyelni, és nem egyértelmű a felhőn belüli villámkisülések szerepe sem az emissziók keletkezésében.

Tisztázatlan, hogy milyen tényezőktől függ a lidércek végső formája, mérete, fényessége, száma és konfigurációja egy-egy eseményen belül, valamint a zivatar élete során.

A streamerek elágazását és fölhasadását vezérlő fizikai mechanizmusok feltárása is várat magára.

A vörös lidércek jelentősége ismeretlen tulajdonságaik lehetséges hasznosíthatóságában rejlik. A főnti kérdések megválaszolása magában rejtje annak lehetőségét is, hogy e jelenségek megfigyelésével többet tudhatunk meg a zivatartevékenységről, a villámkisülésekről, a mezoszféra és az alsó ionoszféra állapotáról, valamint a tartományok és jelenségek változásairól, dinamikájáról.

Vörös lidércek kutatása Magyarországon

A vörös lidércekkel kapcsolatos tudományos kutatásokba az MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézete először 2003-ban kapcsolódott be. Ekkor az EuroSprite2003 FEOEM megfigyelési kampány során észlelt vörös lidércek keltóvillámjainak töltésmomentum-változásait határozták meg a távoli villámok alacsonyfrekvenciás sugárzásának analízisével [2]. A kutatóintézet Nagycenk melletti Széchenyi István Geofizikai Observatóriumában az 5–30 Hz-es extrém alacsony frekvenciasávban működő Schumann-rezonancia mérőrendszerből [12] származó adatok földolgozásával további európai és tágabb nemzetközi FEOEM megfigyelési kampányok eredményeihez járultak hozzá. 2007-ben a nemzetközi tapasztalatok fölhasználásával egy optikai FEOEM megfigyelőállomást létesítettek Sopronban, amellyel 2007 óta Sopron közel 600 km-es körzetében eredményesen folytatnak főleg vörös lidérc észleléseket [2].

Irodalom

1. C. T. R. Wilson: The electric field of a thunderstorm and some of its effects. *Proceedings of the Physical Society of London D* 37 (1925) 32–37.
2. Bór József: *Villámkisülésekhez társuló felsőlégköri elektro-optikai emissziók és Schumann-rezonancia tranziensek vizsgálata*. Ph.D. disszertáció, Nyugat-Magyarországi Egyetem, Sopron, 2010.
3. A. Luque, U. Ebert: Sprites in varying air density: Charge conservation, glowing negative trails and changing velocity. *Geophysical Research Letters* 37 (2010) L06806, doi:10.1029/2009GL041982
4. M. A. Uman: The lightning discharge. In: *International Geophysics Series* vol. 39 (1987) (W. L. Donn, ed.) Academic Press, New York, USA (a hivatkozott tartalom az 5.4. fejezetben található)
5. M. J. Heavner: *Optical spectroscopic observations of sprites, blue jets, and elves: Inferred microphysical processes and their macrophysical implications*. Ph.D. dissertation, University of Alaska, Fairbanks, USA, 2000.
6. D. L. Hampton, M. J. Heavner, E. M. Wescott, D. D. Sentman: Optical spectral characteristics of sprites. *Geophysical Research Letters* 23 (1996) 89–92.

7. E. R. Williams: Sprites, elves and glow discharge tubes. *Physics Today* 54/11 (2001) 41–47.
8. J. A. Valdivia, G. Milikh, K. Papadopoulos: Red sprites: Lightning as a fractal antenna. *Geophysical Research Letters* 24 (1997) 3169–3172.
9. A. Luque, U. Ebert: Emergence of sprite streamers from screening-ionization waves in the lower ionosphere. *Nature Geosciences* 2 (2009) 757.
10. M. J. Rycroft, A. Odzimek: Effects of lightning and sprites on the ionospheric potential, and threshold effects on sprite initiation, obtained using an analog model of the global atmospheric electric circuit. *Journal of Geophysical Research* 115 (2010), A00E37, doi:10.1029/2009JA014758
11. C. J. Rodger, A. Seppälä, M. A. Clilverd: Significance of transient luminous events to neutral chemistry: experimental measurements. *Geophysical Research Letters* 35 (2008) L07803, doi:10.1029/2008GL033221
12. G. Sători: Schumann resonance observations. In: *Geophysical Observatory Reports of the Geodetic and Geophysical Research Institute of the Hungarian Academy of Sciences, Nagyecsk Geophysical Observatory (2005–2006)*, Hillebrand nyomda Kft., 2007, ISBN 798-963-8381-22-4

VÖRÖS LIDÉRCEK ÉSZLELÉSE AMATŐR SZEMMEL

Goda Zoltán
Baja

Ha egy nyári estén távoli zivatar fényeit vesszük észre, érdemes figyelmünket a zivatarfelhő fölötti égboltra irányítani, ahol szokatlan jelenségnek lehetünk tanúi. Időről-időre vörös színű villanásokat figyelhetünk meg, amelyek éppen csak egy pillanatra láthatóak. A vörös lidércek (angolul: *red sprites*) rendkívül rövid életű, felsőlégi elektromos kisülési jelenségek, amelyek villámtevékenység hatására alakulnak ki. Mintegy 40–50 km magasságban, a mezoszférában jelennek meg, ahol a légkör már nagyon ritka. A vörös lidércek változatos alakban tűnhetnek fel, az egyszerű oszlopformától a bonyolultabb, medúzára vagy fára emlékeztető alakzatokig (1. ábra). A jelenség vörös színű, rajta sárgásabb fénylések, gyöngyök alakulhatnak ki. Mindössze néhány ezredmásodpercig tartó, halvány tűnemények, de megpillantásuk feledhetetlen élmény. Szabadszemes észlelésük és fényképezésük igencsak nehézkes, ám nem teljesen reménytelen feladat. Ha figyelembe vesszük néhány jellemzőjüket, jó eséllyel magunk is megfigyelhetjük őket.

1. ábra. A vörös lidércek változatos formában tűnhetnek fel az égen (a szerző felvétele).



A vörös lidérceket mindössze néhány évtizede ismerjük. Habár e rövid idő alatt sok új információt sikerült gyűjteni róluk, máig több kérdés nyitott maradt. Az amatőr észlelők legfontosabb kérdése, hogy vajon láthatók-e szabad szemmel. Műszerek nélkül észlelhetünk olyan jelenséget, amely mindössze néhány ezredmásodperces halvány villanás az égen? Bár a vörös lidércek mind élettartamuk, mind pedig fényerejük alapján az emberi észlelőképesség határán vannak, szemünk és agyunk közös munkájának köszönhetően képesek vagyunk észlelni őket.

Megfigyelésük

Vörös lidércek észleléséhez különleges körülmények kellene. Mivel megfigyelésükre igen ritkán adódik lehetőség, érdemes előre felkészülni az észlelésre. A sikeres megfigyeléshez mindenképpen szükség van egy éjszaka kialakuló zivatarral, lehetőleg erős villámtevékenységgel. A lidércek jóval a zivatarfelhő fölött jelennek meg. Ahhoz, hogy megfelelően észlelni tudjuk őket, a zivatarnak az észlelőponttól 100–200 km távolságban kell lennie. (A zivatar pontos helyének meghatározásához érdemes radar-, műhold- és villámtérképeket használni.) E távolságból tiszta égbolt esetén már jól látszik a zivatar villogó fénye, és ha jó rálátásunk van a horizontra, akkor a zivatarfelhő teteje is. Különösen fontos a megfelelő észlelőpont kiválasztása. A legjobb egy sík terület, a városok fényszennyezésétől távol, ahol messzire, a horizontig elláthatunk. Ha a fejünk fölött jól látszik a Tejút, akkor megfelelően sötét helyet sikerült találnunk. Fontos, hogy az észlelést ne zavarja felhőzet, légköri pára vagy