



Regionális zivatarok azonosítása és követése infrahanghullámok segítségével

Pásztor Marcell Sebestyén, Czánik Csenge, Bondár István

ELTE, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, pasztor.marcell@epsz.hun-ren.hu

DOI: 10.56474/legkor.2024.2.1

Az egyetlen magyar infrahangállomás (PSZI) Piskés-tetőn 2017 májusa óta működik. A PSZI az azóta eltelt idő alatt több, mint egymillió jelet detektált. Ezek között ismert és ismeretlen forrásokból származó észlelések egyaránt szerepelnek. Az észlelések azonosítása és kategorizálása fontos a jövőbeli automatizált jelfelismerés szempontjából. A tanulmány célja azon észlelések azonosítása és összegyűjtése, amelyek zivatarokhoz és villámokhoz tartoznak. Bemutatunk egy módszertant a zivatarok azonosítására, amely a Blitzortung adatbázis villámadatainak és a PSZI észleléseinek korrelációján alapszik. E módszerrel 32 000 infrahangészlelést soroltunk be a zivatar címszó alá. Vizsgáltuk az észlelt zivatarok irányainak és távolságainak eloszlásait, melyek az állomás érzékenységét jellemzik. Ismertetünk egy közeli (<50 km) zivatarokra alkalmazható eljárást konkrét villámlások azonosítására, mely segítségével 68 kisülést találtunk.

Identification and tracking of regional thunderstorms using infrasound

The infrasound array at Piskés-tető, Hungary (PSZI) has been operational since May 2017. Since then, PSZI has detected more than one million infrasound signals. These include detections both from known and unknown sources. The identification and categorisation of the detections are important for future automation. The objective of this study is to identify and collect those detections that belong to thunderstorms and lightning bolts. A methodology to identify thunderstorms is presented, by which 32,000 infrasound detections were classified as of thunderstorm originated. The methodology relies on correlating lightning data from the Blitzortung database (considered as ground truth) with infrasound detections. We also analyse the distributions of the directions and distances of the detected thunderstorms which characterise the sensitivity of the station. Additionally, a detailed lightning search procedure led to the identification of 68 lightning discharges in thunderstorms close to the array (<50 km).

A hangokat frekvencia alapján három nagy csoportba sorolhatjuk, 20 Hz és 20 kHz között található az emberi fül számára hallható tartomány. E frekvencia tartomány fölött vannak az ultra-, alatta az infrahangok. Az infrahanghullámok a kis légköri csillapodás miatt nagy,

akár több száz, több ezer kilométer távolsáig el tudnak jutni, átjárva így a Föld légkörét. Az infrahanghullámoknak megannyi természetes és mesterséges forrása létezik. Előbbiekhez tartoznak például meteorok, nagyobb földrengések, vulkánkitörések, zivatarok,

villámlások, mikrobaromok (a tengerek és óceánok hullámzása által a légkörben gerjesztett hullámok). Emberi tevékenységhez kapcsolódóan alacsony frekvenciás jeleket többek között robbantások, robbanások, gyárak, repülőgépek keltenek.

Az infrahanghullámok észlelésére nagyon érzékeny légnyomásmérőket, mikrobarométereket használnak. Egy állomás legalább három ilyen műszerből áll a hullámok paramétereinek meghatározásához. A műszerek regisztrátumain – az idő-légnyomás görbéken – különböző eljárásokkal kereshetünk koherens jelet. Az egyik legelterjedtebb az ún. Progressive Multi Channel Correlation (PMCC), (*Cansi*, 1995) módszer, amely a hullámformák keresztkorrelációján alapul. Egy megtalált eseményt detekciónak, észlelésnek nevezünk. Az észlelések három legfontosabb paramétere a frekvenciaösszetétel, az azimut és a látszólagos sebesség (trace velocity). Az azimut adja meg, hogy az állomásra beérkező hullám mekkora szöveget zár be az északi iránnyal óramutató járásával megegyezően mérve. A látszólagos sebesség definíció szerint a hullám terjedési sebességének vízszintes komponense.

A villámlások infrahangkeltési mechanizmusa nem tökéletesen ismert. Az első leírás szerint (*Wilson*, 1920) a felhő egy töltött régiójában a nyomás kisebb, mint a külső nyomás, a töltött vízcseppek kölcsönös taszítása miatt. Ezért a villámkisülést követő felhőn belüli elektrosztatikus mező hirtelen változása kelti az alacsony frekvenciás akusztikus hullámot. *Dessler* (1973) továbbfejlesztette *Wilson* ötletét, a modellje szerint először egy ritkulás (dekompresszió, völgy) észlelhető a hullámformákon, amelyet esetleg egy kompresszió (csúcs) követ. A spektrális csúcsonak a 0,2–2 Hz-es tartományban kell jelentkeznie. Néhány kísérlet (például *Bohannon et al.*, 1977; *Balachandran*, 1983) épp a modell által jóslottak ellenkezőjét mutatta ki. Az eredmények alapján a legtöbb villámláshoz köthető hullámformán a kompresszió megelőzte a dekompressziót. Egy magyarázat szerint a megfigyelt kezdeti pozitív csúcsot az elektromos tér hirtelen (kb. 0,5 s alatti) növekedése okozhatja közvetlenül a kisülés előtt (*Bohannon et al.*, 1977). Numerikus modellek alapján a kisülés előtti töltéssűrűség növekedés hosszabb ideig, 2–6 másodpercig is eltart. E modellekből levont következtetések szerint minél hosszabb a töltési idő, annál kisebb a pozitív csúcs (*Pasko*, 2009). A kezdeti kompresszió másik magyarázata szerint a villámláskor történő kisülés hatására, töltésáram (szuperszonikus töltéstranszport) által csökken a töltött rétegben a térerősség. Ez az áram kis fűtéssel jár, ami a pozitív légnyomás

perturbációt okozza. E modell az egymást követő kompressziós és dekompressziós csúcsok abszolút értékeinek arányára körülbelül 0,4 értéket jósol (*Few*, 1985).

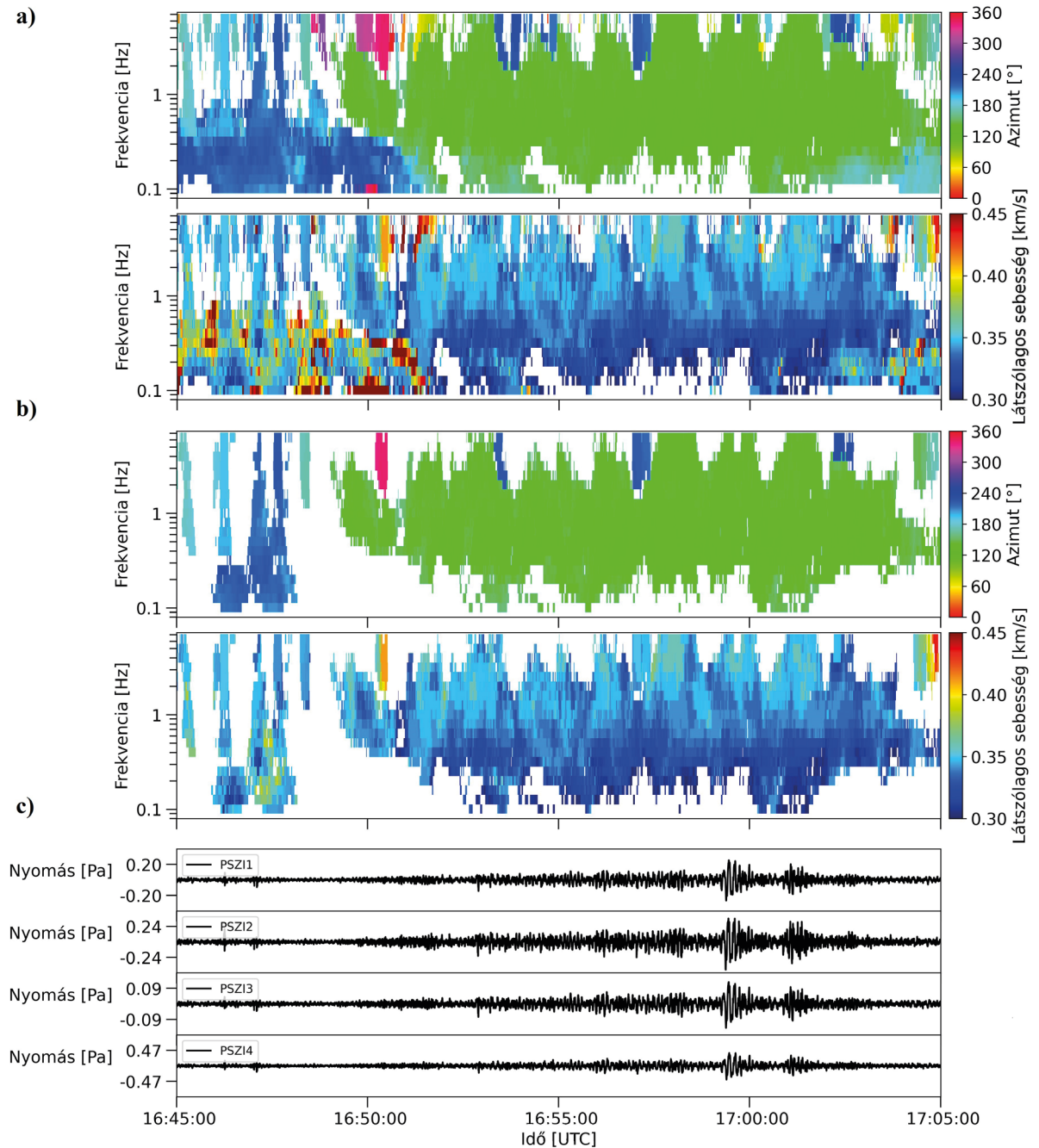
Chum és társai 2013-as kutatásuk során, elektromágneses és infrahang méréseket végeztek. A vizsgálat során 0,25 Hz és 3 Hz közötti domináns frekvencia-tartománnyal rendelkező infrahang hullámcsomagokat találtak. Az akusztikus jeleket az EUCLID villámdetektáló hálózat és egy térerősségmérő idősorainak korrelálásával villámokként azonosították. Eredményeiket egyik korábban ismertetett modell sem magyarázta. Megjegyzendő, hogy a szerzők által használt mikrobarométerek 4 Hz frekvenciaértéknél leválnak, így a megtalált kisülések jelei magasabb frekvenciákat is tartalmazhatnak. Minden villámlásnál dekompresszió (völgy) követte a kompressziót (csúcs). A völgyek és a csúcsok abszolút értékeinek arányára 1 körüli értéket kaptak a *Few* modelljével jóslott 0,4-es értékkel szemben. A szerzők konklúziója alapján az ismertetett infrahangkeltési módok módosíthatóak például több töltött réteg figyelembevételével (*Chum et al.*, 2013).

A zivatarokban a villámlásokon kívül más mechanizmusok is kelthetnek infrahangtartományú akusztikus jeleket. Több szerző vizsgálta ezen lehetséges forrásokat (például *Georges*, 1973, 1976; *Beasley et al.*, 1976; *Jones and Georges*, 1976). A zivatarokban infrahanghullámokat kelthet a látens hő felszabadulása, villámlásokon kívüli egyéb elektrosztatikus folyamat. Két további fontosabb forrás pedig a turbulencia és a légörvények (*Georges*, 1976; *Bowman és Bedard*, 1971). Alacsony frekvenciás megfigyelések kapcsolhatók vörös lidércekhez is (például *Farges et al.*, 2005; *Liszka and Hobara*, 2006; *Farges and Blanc*, 2010).

Jelen cikk a zivatarokhoz és villámlásokhoz tartozó észlelések kategorizálásának egy-egy módszerét mutatja be. Előbbi alapján jellemezzük az állomás érzékenységet, vagyis vizsgáljuk milyen irányokból és távolságokból képes regisztrálni a zivatarokat az állomás.

Adatok

A Piszkés-tetőn található infrahangállomás (PSZI) 2017 májusa óta üzemel a Kövesligethy Radó Szeizmológiai Observatórium felügyelete alatt. A nyers adatok (hullámformák) nyíltak, szabadon hozzáférhetőek [3]. PSZI négy darab SeismoWave gyártmányú MB3d mikrobarométerből áll, az állomás apertúrája körülbelül 250 m. Az adatok automatikus feldolgozására a CTBTO (Átfogó Atomcsend Egyezmény Szervezete, Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty Organization) NDC-in-the-box software csomagban megtalálható DTK-GPMCC programot használjuk.



1. ábra. A PMCC módszer (lásd a szövegben) szemléltetése. A felső két panel (a) pixel szinten, a középső kettő (b) family szinten mutatja az észleléseket, legalul (c) a PSZI 4 mikrobarométerének hullámformái láthatók 2020. augusztus 4. 16:45 és 17:05 (UTC) között.

A már említett PMCC (Cansi, 1995; Le Pichon and Cansi, 2003; Brachet et al., 2010) algoritmus a hullámformák keresztkorrelációján alapszik. Kiválasztva egy három elemű alhálózatot az R_n hálózaton (jelölje az n az állomások elemeinek számát) keressük azon Δt

időtölásokat, amik a legnagyobb korrelációs értékeket adják. A hullámparaméterek ezen időtölásokból származtathatók. Vezessük be r_{ijk} értéket egy adott három elemű alhálózatra (jelölje az elemeket szimbolikusan $i, j, k \in R_n$) az időtölások összegeként:

$$r_{ijk} = \Delta t_{ij} + \Delta t_{jk} + \Delta t_{ki}. \quad (1)$$

Az alhálózatokat figyelembe véve és kiszámolva ezekre is az időtolásokat, az (1) egyenlet ismeretében definiálhatjuk a c_n konzisztenciát az alábbi egyenlőség segítségével:

$$c_n = \sqrt{\frac{6}{n(n-1)(n-2)} \sum r_{ijk}^2}. \quad (2)$$

Amennyiben a konzisztencia egy előre definiált érték alatt van, akkor egy elemi észlelés (pixel) jön létre a teljes hálózatra értelmezve. Az elemi észlelések keresése különböző frekvenciasávokban és ezeknek megfelelő időablakokban történik. Utófeldolgozás során kereshetjük, hogy mely pixelek tartoznak egybe. Ez megtehető például a Mahalanobis-távolsággal az idő (t), frekvencia (f), sebesség (v), azimut (α) térben. Jelölje két tetszőleges pixelt P_1 és P_2 , akkor a távolságuk:

$$d(P_1, P_2) = \sqrt{\frac{(t_2 - t_1)^2}{\sigma^2} + \frac{(f_2 - f_1)^2}{\sigma f^2} + \frac{(v_2 - v_1)^2}{\sigma v^2 v_1} + \frac{(\alpha_2 - \alpha_1)^2}{\sigma \alpha^2}}, \quad (3)$$

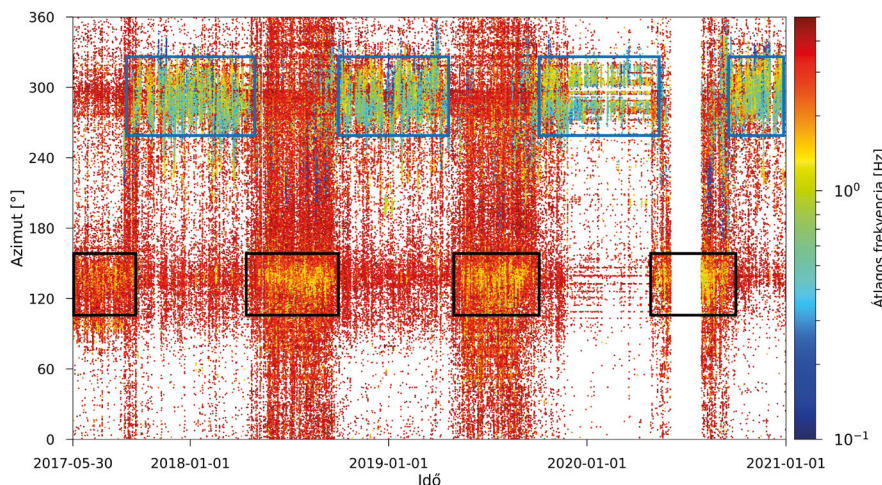
ahol σ az egyes paraméterekhez tartozó súlyfaktor. Amíg a d távolság egy előre definiált küszöb alatt található, a pixelek egy családba (family) tartoznak, ezeket nevezzük észleléseknek/detekcióknak. Egy-egy észlelés paramétereit (például azimut, látszólagos sebesség) az öt felépítő pixelek paramétereinek átlaga adja meg.

Így tehát a későbbiekben az észlelések frekvenciaösszetétele alatt is a pixelek frekvenciaértékének átlagát értjük. Az 1. ábra szemlélteti a PMCC algoritmus eredményét 2020. augusztus 4. 16:45 és 17:05 (UTC) példáján. A legfelső két panelen (a) a pixelek láthatók idő-frekvencia szerint megjelenítve felül azimut alul pedig látszólagos sebesség szerint színezve. A középső két panelen (b) már csak azok a pixelek szerepelnek, melyek egy-egy észlelés részévé váltak. Legalul (c) a PSZI négy műszerének hullámformái láthatóak. (a) és (b) felső paneljein a zöld színezésű (körülbelül 134° -hoz tartozó észlelések kapcsolódnak a bejrúti robbanáshoz). PSZI esetében rutinfeldolgozásban alkalmazott frekvenciasávok 0,09 és 7,1 Hz közöttiek logaritmikus skálán, az időablakok ezeknek megfelelően 60–12,35 s hosszúságúak, átfedésük 95%.

Az előre beállított konzisztencia küszöb 0,2 s. Az utófeldolgozás során az észlelések mérete 100 és 2000 pixel közé esik.

Az infrahang észleléseket gyakran bulletin formájában tárolják. A bulletin tulajdonképpen egy egyszerű, táblázatos formátumban kimentett szöveges fájl, amely tartalmazza az észlelések idejét, minimum, maximum és átlagos frekvenciaértékeit, az azimutot ($^\circ$) és bizonytalanságát, a látszólagos sebességet (km/s) és hibáját, és egyéb, a PMCC módszer által meghatározott értékeket (Le Pichon és Cansi, 2003).

A 2017 óta eltelt években az állomás több, mint egymillió észlelést gyűjtött össze. Ezek között vannak ismert és ismeretlen eredetűek egyaránt. A 2. ábra a PSZI 2017 májusa és 2021 áprilisa közötti észleléseit mutatja idő-azimut diagramon, ahol a színezés alapja az átlagos frekvencia. Az évek során kirajzolódott egy évszakos váltakozás, amely az uralkodó troposferikus széliránynak tudható be (Drob et al., 2008). Nyáron az állomáshoz viszonyítva keleti forrású, télen a nyugati forrású jelek észlelései vannak többségben. A téli észlelések zömét az atlanti-óceáni mikrobaromok adják (Šindelarová et al., 2021), a nyáriakét feltehetőleg a fekete-tengeriek. Megjegyzendő, hogy utóbbiak eredete nem bizonyított, mert ebben az irányban több antropogén zajforrás is generál infrahang jeleket. Megfigyelhető továbbá az ábra sávossága 270° és 300° , valamint 110° és 150° között, ezek tipikusan mesterséges forrásoknak tudhatók be, ahonnan állandó irányból érkeznek az infrahanghullámok. Ilyen például a Mátrai

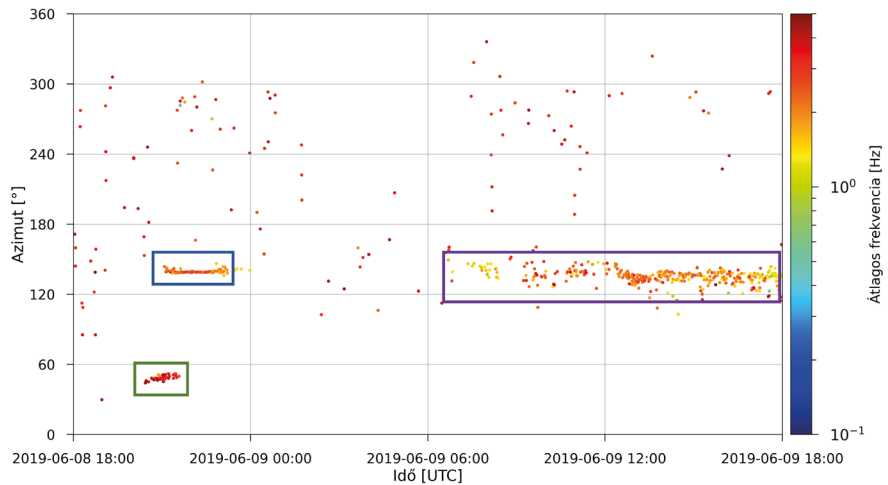


2. ábra. A piszkás-tetői infrahangállomás PMCC módszerrel feldolgozott észlelései 2017 májusa és 2021 eleje között idő-azimut diagramon. A színezés alapját az átlagos frekvenciaösszetétel adta. Kék kiemelések jelölik a téli időszakban az atlanti-óceáni, fekete-tengeri keretek a nyári időszakban a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromokat.

Erőmű körülbelül 137° azimutnál. 2020 nyarán egy közel kéthónapos szünet mutatkozik, ekkor az állomás műszerei szervizelés miatt nem üzemeltek.

Az ábrán is látható megannyi észlelés közül csak a töredék eredete ismert. A már említett mikrobaromokon kívül többek között repülőgépeké, bolidáké (Kereszturi *et al.*, 2021), vulkánkitöréseké, robbanásoké, valamint bányarobbanásoké (Czanik *et al.*, 2021). Évente kiadásra kerül a szeizmikus és infrahangjelek együttes feldolgozásával a Magyarországi Szeizmo-Akusztikus Bulletin [4], (Bondár *et al.*, 2019), mely a hazai és a környező országok bányarobbanásainak azon részét tartalmazza, melyeket mind a két technológia regisztrált.

A zivatarok azonosításához, pontosabban szólva az infrahangészlelések zivatarokhoz kötéséhez a Blitzortung [1] adatbázisában szereplő villámlásokat használtuk fel, mint viszonyítási alap (ground truth, olyan események, melyek helye és ideje ismert). A Blitzortung egy világszerte működő, közösségi villámdetektáló hálózat. A villámlások helymeghatározására Time-of-Arrival (ToA) módszert használja, mely a VLF (Very Low Frequency, 3-30 kHz) elektromágneses hullámok beérkezési idejének különbségén alapszik. A hálózat hatékonysága (detektált villámlás/összes villámlás) hazánk és a régiójának területén nem ismert (Blitzortung dokumentáció). Megjegyzendő, hogy *Narita és munkatársainak* (2018) munkája négy vizsgált zivatar alapján 12% és 39% közé teszi a Blitzortung hatékonyságát a TEPCO Power Grid cég adatbázisához képest, továbbá 1,43 km és 2,23 km közöttire becsüli a helymeghatározás pontosságát. *Kamagowa és munkatársai* (2023) vizsgálták, hogy a japán nemzeti hálózathoz (JLDN) képest mennyire megbízható a Blitzortung adatbázis hazájuk területén. Eredményeik alapján a Blitzortung hatékonysága 25% és 95% között változik cloud-to-ground (CG) kisülések esetén. A helymeghatározás relatív eltéréseire 5,3 km-es átlag, 3,6 km-es medián és 2 km-es módusz értéket kaptak. Kijelenthető, hogy a hálózat nem regisztrálja az összes villámlást, mégis segítséget nyújtanak a zivatarok azonosításához és követéséhez.



3. ábra. A piszkes-tetői infrahangállomás PMCC módszerrel feldolgozott észlelései 2019. június 8. 18:00 és 2019. június 9. 18:00 (UTC) között idő-azimut diagramon. A színezés alapját az átlagos frekvencia adta. Két jellegzetes forrás kék és lila keret jelöl, ezek rendre a Mátrai Erőmű és a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromok jelei. Zöld téglalap foglalja magába a feltételezett zivatarhoz tartozó észleléseket.

Módszerek

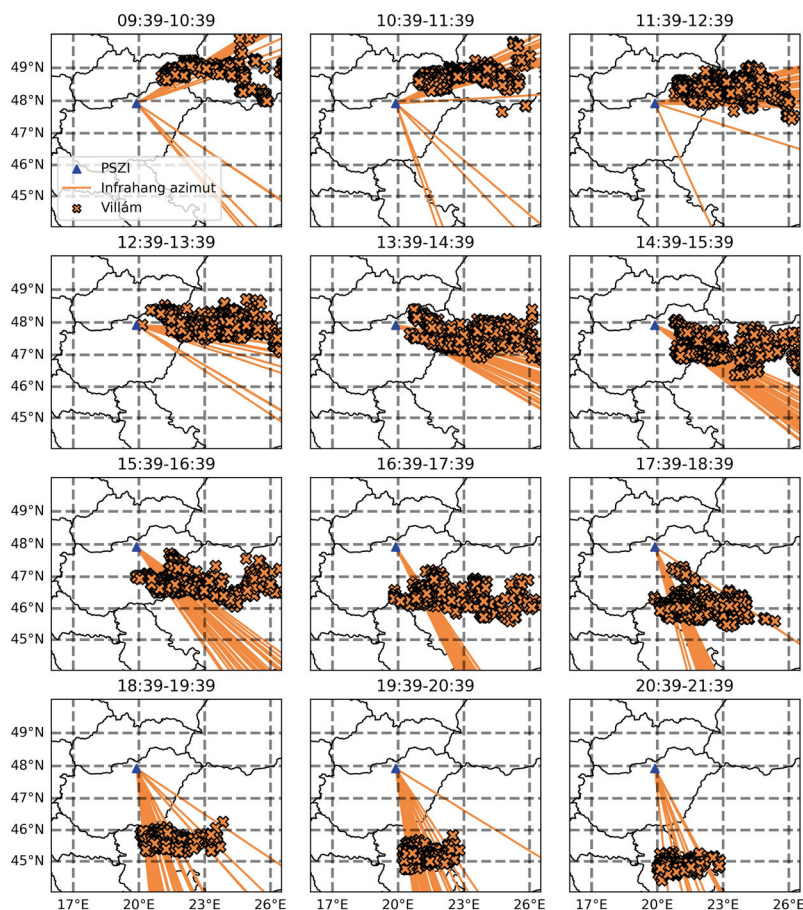
Zivatarokhoz kötés

A hipotézis a következő: a zivatarok hosszabb-rövidebb szakaszokként, foltokként jelennek meg az idő-azimut diagramon, a tér- és időbeli mozgásuknak megfelelően. A vizsgált időtartományban, vagyis 2017 és 2020 között, minden év május elejétől szeptember végéig összesen 366 ilyen sikeres azonosítani. A tapasztalat szerint ezek 1–3 napos nagytáv mellett jelölhető ki. A 3. ábrán egy tipikus nyári, 24 órás intervallum látható 2019. június 8. 18:00 és 2019. június 9. 18:00 (UTC) között. Kék keret emeli ki a Mátrai Erőműből érkező jeleket, ezek könnyen felismerhetők a közel állandó 137° azimutról. Lila téglalap foglalja magába a feltételezhetően fekete-tengeri mikrobaromokat és egyéb zavaró észleléseket. Elmondható, hogy a zivatarok keresését az előbbi kettő nehezíti a 120° – 150° szögtartományban. Egy feltételezett zivatar képe a zöld keretben helyezkedik el. A megtalált észlelés csoportokat bulletin formájában mentettük ki.

A feladat a továbbiakban a kigyűjtött infrahang észlelésekhez zivatarok keresése, melyeket a villámlások azonosítanak. A villámlások és infrahangészlelések korrelációja alapján tehát a zivatarok akusztikus jelei azonosíthatók, ez megtehető kvalitatív módon, például térképi megjelenítés útján. A bulletinokhoz, vagyis a feltételezett zivatarokhoz kigyűjtött észlelések

alapján tér-, és időbeli szűrést végeztünk a villámlásokon. Térben azok a villámlások jöhetnek szóba, melyek az legkisebb és a legnagyobb infrahanghullám azimut által meghatározott szögterületbe esnek. Hasznos e tartományt az alsó és felső határán bővíteni, ennek oka az infrahanghullámok elhajlása a terjedésre merőleges szél által. Ennek következménye, hogy a forrás és az észlelés azimutja nem egyeznek meg (Diamond, 1964; Le Pichon et al., 2005; Amezcua és Barton, 2021). Célszerű lenne a távolság függvényében kiterjeszteni a szögterületet, ám itt a priori információ nélkül ez nem lehetséges (a későbbiekben, konkrét villámlások azonosításához e módon jártunk el). Zivatarok azonosításához tehát az empirikusan elégségesnek bizonyuló 10–10° szögértékek kibővítéssel dolgoztunk. Ennél nagyobb bővítés feleslegesen sok villámlást venne figyelembe. Időben azokat a villámlásokat kell keresni, melyek helyéről, idejéről a bulletin által kijelölt időtartományban érkeznek, érkehetnek be infrahanghullámok az állomásra. Ez azért fontos, mert közeli események esetén a menetidő néhány perc, de több száz kilométeres távolságoknál a késés akár 1-2 óra is lehet. A villámlások idejét annyival toltuk el, amennyi idő alatt a Blitzortung adatbázisában szereplő helyről az infrahang elérne Piskés-tetőre. Az infrahanghullámok bonyolult mozgást végeznek, a felszín és a légkör különböző reflektáló felületei között pattogva haladnak, de a tapasztalat szerint a direkt hullám feltételezéssel jól becsülhető a menetidő. Az időtolás (t) értékét az i -edik villámra a $t_i = d_i/c$ hányados adja meg, ahol d_i az infrahangállomás és az adott villámlás távolsága, c a hullámút menti átlagos hangsebesség. A celerity nagyságrendileg 220–360 m/s között változik (Brachet et al., 2010; Nippres et al., 2014; Blom et al., 2015). Célszerű lehet távolság függvényében megválasztani a celerity értékét a különböző hullámutaknak (pl. troposzférikus és sztratoszférikus reflexiók) megfelelően, azonban Assink és munkatársai (2008) nyomán 340 m/s-nak választottuk meg ezt az értéket, amely kis távolságokra (<100 km) működik jól (Nippres, 2014). Előre vetítve az eredményeket, zömmel olyan zivatarokat regisztrál a PSZI, amelyek 500 kilométeres körön belülre esnek, e távolságra becsült menetidő 260 m/s, 300 m/s és 340 m/s celerity értékek esetében rendre kb. 32, 28 és 24,5 perc. A különböző celerity értékek által számolt menetidő különbségek sokkal rövidebbek, mint a feltételezett zivatarok hossza a bulletinok alapján

(több órás intervallum), így nem változtattuk a celerityt a távolság függvényében. Azonban a konstans feltételezés kompenzálása érdekében időtartományban a bulletin által meghatározott időablakot kibővítettük a határokon 10–10 perccel. A műveletek elvégzése után az idő- és térbeli korreláció kvalitatív úton történő vizsgálata lehetővé válik például térképi megjelenítés útján. A 4. ábra egy 2019. június 27-ei fél napon át, 09:39 és 21:39 (UTC) között északkeletről délnyugat felé vonuló zivatar példáján mutatja, hogyan követik az infrahangészlelések (a megfelelő azimuttal vonalakkal reprezentálva) a villámlásokat (keresztek). A térképeken balról jobbra, fentről lefelé egy-egy órányival eltolva mutatja a zivatar mozgását. Megjegyezzük, hogy jelen vizualizáció során a villámlások térbeli szűrése nem órás bontásban, hanem a bulletinben szereplő legkorábbi és legkésőbbi észlelés által meghatározott intervallumra végeztük el, ez okozza például



4. ábra. Egy zivatar képe 2019. június 27-én az azonosításhoz használt térképi megjelenítésben. Balról jobbra, fentről lefelé 1-1 órával elcsúszva szerepelnek mind az infrahangészlelések (vonalak) a piskés-tetői állomástól a hozzájuk tartozó azimuttal rajzolva és a villámlások (keresztek).

16:39 és 17:39 között a sok eltérő azimutnál található villámlást. A legtöbb zivatar esetében elég volt egy térképi nézet a zivatark azonosításához, néhol segítségképpen animációkat készítettünk (a 3. ábrához hasonlóan, ámde kisebb időlépésekkel).

Az állomás érzékenysége vizsgálható a zivatark térbeli eloszlása alapján, vagyis elemezhető, hogy PSZI milyen távolságokból és milyen irányokból képes meghallani egy zivatar jelét. Ehhez olyan zivatarkat kerestünk az azonosítottak között, melyek legfeljebb 3–4 órát ölelnek át és kis területre (kb. $2^\circ \times 2^\circ$) koncentrálnak. Ezekhez a villámlások koordinátái alapján rendeltünk hozzá egy középpontot, centroidot.

Konkrét villámok keresése

Az előző fejezetben, a zivatark azonosításánál a villámlásokat csupán arra használtuk, hogy az azonosításhoz kirajzolják mikor, merre volt zivatar. Az állomáson regisztrált jelek azonban a villámlásokon kívül a zivatarkban lezajló egyéb infrahangkeltési mechanizmusból származhatnak. Ezek ellenére, körülbelül 50 kilométer távolságig a zivatarkban az egyes villámlások is beazonosíthatók (Assink et al., 2008; Chum et al., 2013). Direkt hullám feltételezéssel élve egy t_{EM} időpontban kipattanó villámlásból származó infrahanghullám a t_{infra} időpontban ér az állomásra, ez a következőképpen írható fel (Assink et al., 2008):

$$t_{infra} = t_{EM} + \frac{d}{c} + \Delta t, \quad (4)$$

ahol d a villámlás és az állomás távolsága, $c=340$ m/s feltételezett átlagos hangsebesség és Δt egy, a bizonytalanságból adódó paraméter, jellemzően néhány másodperc. A bizonytalanságnak több oka van. Egyrészt adódik infrahanghullám beérkezési idejének, a villámlás helyének (a Blitzortung által használt ToA módszer esetében ez Narita és munkatársai (2018) nyomán körülbelül 1–2 kilométer) és idejének meghatározásából, másrészt a modellben feltételezett direkt hullám terjedéstől való eltérésből, valamint az infrahanghullámok elhajlásából. Átrendezve az előbbi egyenletet a következő reláció alapján kapcsolhatók össze infrahangészlelések villámlásokkal időben:

$$t_{infra} - \left(t_{EM} + \frac{d}{c} \right) < \Delta t, \quad (5)$$

Az időbeli keresés kiegészítendő egy térbeli szűréssel, mely szerint az észlelés és villámlás azimutjainak különbsége (abszolút értékben) nem haladja meg

a választott $\Delta\varphi(d)$ távolságfüggő értéket. A távolságfüggés oka az, hogy az állomástól távolodva ugyanakkora azimutbeli eltérés sokkal nagyobb távolságkülönbségeket jelentene. Azt az értéket, hogy a villámlás helye mennyivel térhet el a villámadatbázisban szereplőtől maximum 2 kilométerre akartuk szabni, a villámlások helymeghatározási hibájának becslésével a Japánban meghatározott pontosságok nyomán (Narita et al., 2018; Kamagowa et al., 2023). A $\Delta\varphi(d)$ értéket az éppen vizsgált villámlás távolsága alapján határozhatjuk meg a következő tapasztalati egyenlettel:

$$\Delta\varphi(d) = \arctan\left(\frac{2 \text{ km}}{d}\right) + 1^\circ. \quad (6)$$

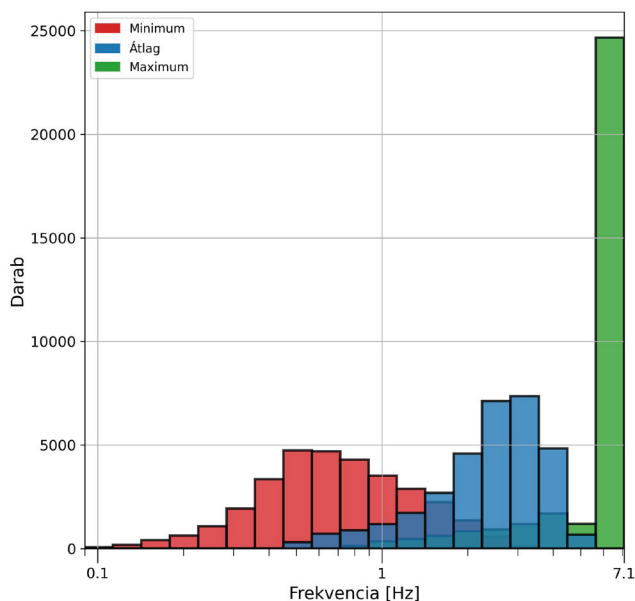
A kifejezés első tagja szerint a villámlás az adatbázisban szereplő koordinátáitól 2 kilométeres sugarú körben lehet. A második tag egy tesztelések során empirikusan megállapított érték. Megjegyzendő, hogy a bizonytalanság miatt a tér-, és időbeli szűrések egy észleléshez több villámlást is kapcsolhatnak, ez esetben a felhasznált módszerekkel nem lehet eldönteni, hogy melyik jelét regisztrálta az infrahangállomás. Azt, hogy ténylegesen villámlás jele került detektálására, a szűrt hullámformák vizsgálatával határoztuk meg, ehhez a PSZI négy mikrobarométere közül legáltalább harmon ki kellett rajzolódnia a várt, jellegzetes jelalaknak. A hullámformák szűrésére zérófázisú, harmad rendű 0,25 Hz-es alsó és 5 Hz-es felső határokkal rendelkező sávszűrőt alkalmaztunk, ugyanis ebben a tartományban várhatóak a villámlások domináns frekvenciái (Assink et al., 2008).

Eredmények, diszkusszió

2017 és 2020 között, szisztematikusan vizsgálva idő-azimut diagramon az adatokat, összesen 366 feltételezett zivatart gyűjtöttünk ki. A kiválogatás alapját az a hipotézis adta, mely szerint a zivatark hosszabb-rövidebb szakaszokként, foltokként jelennek meg az idő-azimut diagramon. A 366 potenciális zivatarból 309 bulletin esetében tudtuk valóban zivatartevékenységre kötni az észleléseket a kvalitatív korrelációs módszer felhasználásával. Ez körülbelül 84%-os találati arányt jelent, mely alapján a hipotézis helyesnek mondható. A fejlesztett módszer gyorsnak mondható abban az értelemben, hogy nem igényli például a hullámút követést, (ray tracing) amelyet minden egyes észlelésre el kellene végezni, amely rendkívül időigényes (és számításigényes) feladat lenne. A módszer hátránya, az infrahangészlelések esetleges félreklasszifikálása (lásd 3. ábra felső sor). A fennmaradó

57 esetben, (16%) érdemes lehet radaradatokkal, csapadéktérképekkel összenézni az észleléseket olyan egyéb, infrahang hullámokat keltő időjárási események keresése érdekében, melyekhez nem társult villámtevékenység. A 309 bulletin összesen 32000 észlelést tartalmaz, amik megkapták a „zivatar” kategóriát. Ez a vizsgált időtartományban, vagyis 2017 májusa és 2020 októbere között összesen összegyűlt körülbelül 630 000 észlelés 5%-a.

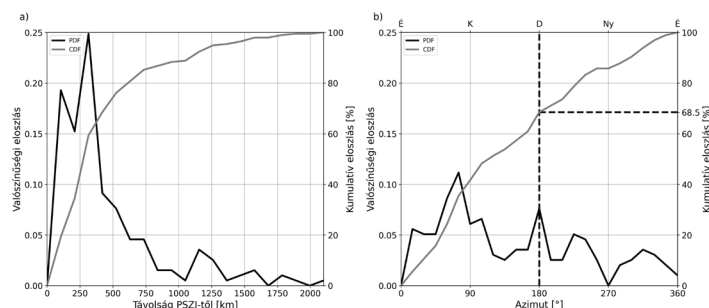
A 32 000 kategorizált észlelés alapján vizsgáltuk a zivatarokból érkező jelek PMCC által pixel szinten meghatározott és átlagolt frekvenciaszerinti összetételét. Ennek eredményeit az 5. ábra mutatja. A minimum és átlagos frekvenciaértékek átlagai $\langle f_{min} \rangle = 0,83$ Hz, $\langle f_{\text{átlag}} \rangle = 2,56$ Hz. A maximumok eloszlása torzultnak mondható, a legfelső frekvenciasáv közepéhez esik a csúcs, ami $(5,64 \text{ Hz} + 7,1 \text{ Hz}) / 2 \approx 6,37$ Hz. Ez alapján a zivatarok jelei magasabb frekvenciákat is tartalmazhatnak.



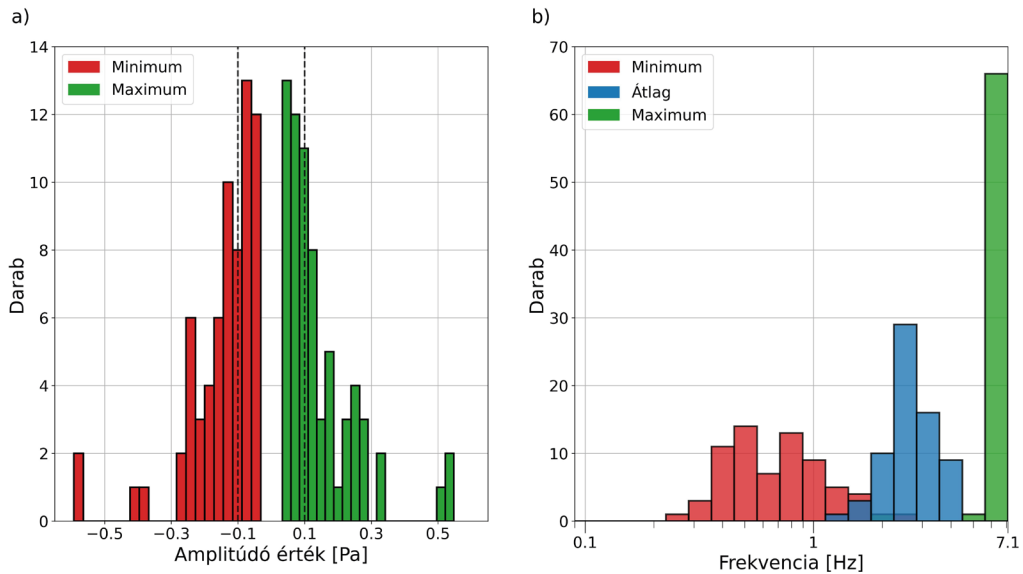
5. ábra. A zivatarokhoz kapcsolt infrahang észlelések minimum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvencia szerinti eloszlása.

Az azonosított 309 zivatar között külön kerestünk olyanokat, melyek legfeljebb 3-4 órát ölelnek át és kis területre (kb. $2^\circ \times 2^\circ$) koncentrálódnak, mely megszorításokra a forrás lokalizációja miatt volt szükség. Egy másik megközelítés alapján felhasználhattuk volna az összes zivart is, felbontva különböző időlépésekben, például a 3. ábránál bemutatott egy órás intervallumokban. Célunk az észlelt zivatarok távolság- és irányeloszlásainak legegyszerűbb becslése,

elemzése volt, amely rosszul megválasztott időlépés esetén torzíthatna volna ezen eloszlásokat, így az előbbi módon jártunk el. A kiválasztott zivatarokhoz összesen 197 középpontot, centroidot rendeltünk a villámlások koordinátái alapján. A centroidok PSZI-től vett távolságuk és azimutjaik eloszlását rendre a 6. (a) és (b) ábra mutatja. Fekete folytonos vonal jelöli a valószínűségi sűrűségfüggvényt (PDF), szürke folytonos vonal a kumulatív eloszlásgörbét (CDF). A centroidok eloszlásáról távolság szerint elmondható, hogy a távolság növekedésével csökken a számuk. Az állomás nagyobb részben a regionális zivatarok jeleit fogja, mert 197 centroidból 133 (körülbelül 70%) 400 kilométeres távolságon belülre esett. A harmadik kvartilis is csak 514 kilométer távolságnál található, és az átlagos érték 406 kilométer. A legtávolabbi centroid majdnem 2100 kilométer távolságra esett PSZI-től, ez a zivatar Afrika északi partjainál tombolt. Azimut szerint a keleti zivatarok vannak többségben, ennek a háttérben az áll, hogy a vizsgált időszakokban (május eleje – szeptember vége) az uralkodó troposzferikus szélirány miatt dominálnak a keleties észlelések (Drob et al., 2008). Megjegyzendő, hogy az 57 bulletin esetében, ahol nem sikerült villámlások által zivatarhoz kötni az észleléseket 41 alkalommal mutattak az azimutok nyugatias ($180^\circ - 360^\circ$) irányba, megerősítve a szükségességét az egyéb, például radar adatokkal való összevetésnek nyugati frontokként való azonosítás céljából. Körülbelül 2:1 arányban estek a centroidok azimutjai 0° és 180° , valamint 180° és 360° közé, 180° -nál 68,5%-os értéket vesz fel a CDF. A (b) ábrán megfigyelhető 120° és 150° közötti hiány oka a Mátrai Erőmű és a feltételezett fekete-tengeri mikrobaromok zavaró hatása a zivatarok keresésében. A 270° -os azimut körüli hiány magyarázata további vizsgálat tárgyát képezi.



6. ábra. A zivatarok centroidjainak PSZI-től vett távolság (a) és azimut (b) szerinti eloszlása. Fekete folytonos vonal mutatja a becsült valószínűségi sűrűségfüggvényt (PDF), szürke folytonos vonal az ebből számolt kumulatív eloszlást (CDF). Az azimutok eloszlásánál függőleges szaggatott vonal jelöli a nyugatias és keleties észlelés határát.

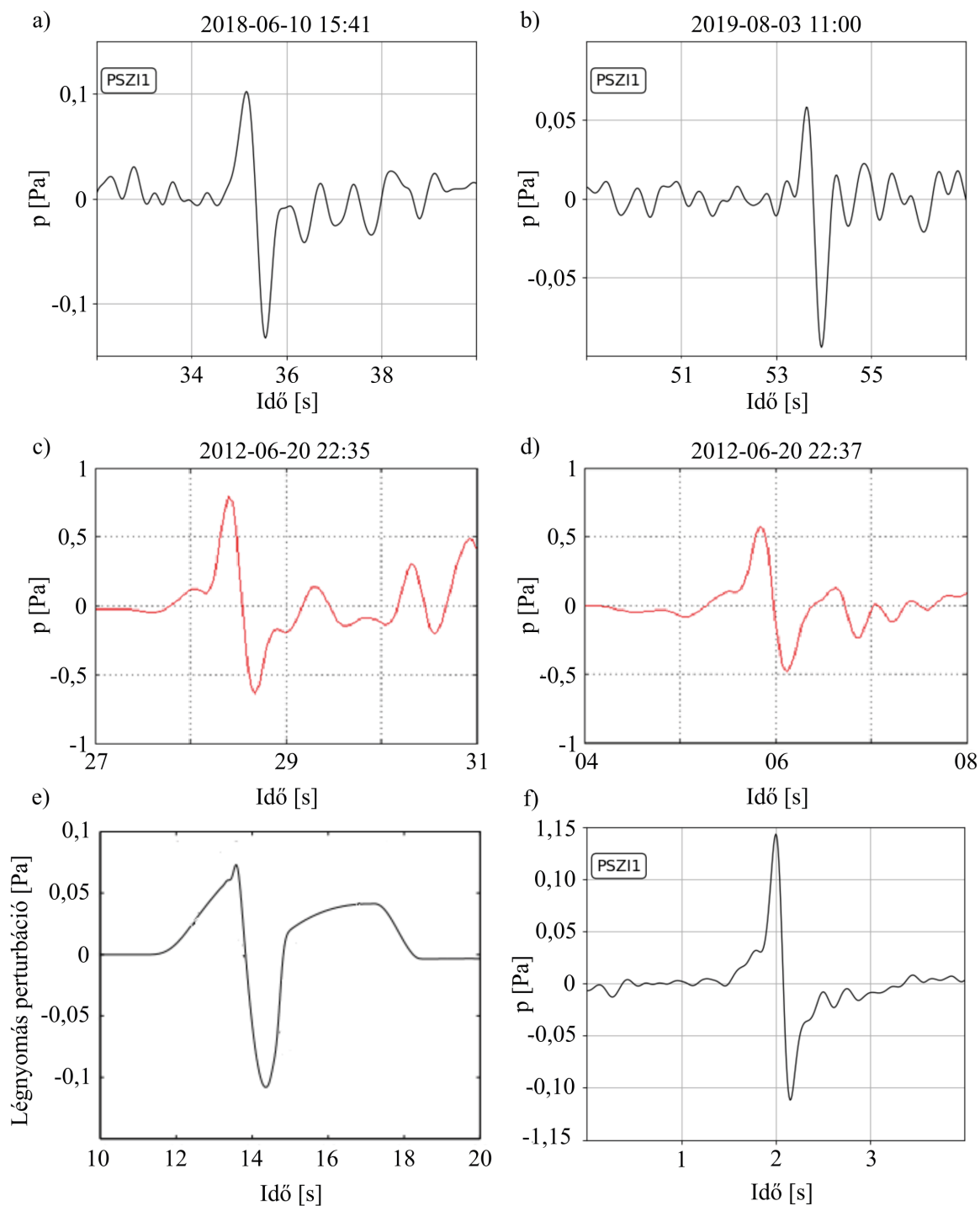


7. ábra. (a) A villámokhoz kapcsolt észlelések hullámformáiból számolt minimum (piros) és maximum (zöld) amplitúdók eloszlása. (b) A villámokhoz kapcsolt infrahang észlelések minimum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvencia szerinti eloszlása.

Az (5) egyenlőtlenség és a (6) egyenlet segítségével, a közeli, már azonosított zivatarokban (<50 km) 956 infrahangészleléshez 1226 villámlást társítottunk. Az észlelések további vizsgálata, vagyis a szűrt hullámformák manuális átnézése után ezek közül 68-at azonosítottunk villámként, a modell alapján várt és a korábban megfigyelt (például *Balachandran*, 1983; *Chum et al.*, 2013; *Arechiga et al.*, 2014) hullámformához való hasonlítás által. Ugyan a nyers hullámformák is sok esetben ki lehetett venni a keresett jellegzetes jeleket, a sávszűrő alkalmazása segítette a villámlások azonosítását. Mind a szűrő impulzusválaszának, mind a nyers (szűrés nélküli) hullámformák vizsgálata, azt mutatta, hogy a szűrt idősorokon a villámlásként értelmezett jelek nem magának a szűrő impulzusválaszának a hatása. Szűrésre minden esetben megfelelőnek bizonyult a zérófázisú, harmad rendű sávszűrő 0,25 Hz-es alsó és 5 Hz-es felső határokkal módosítva *Chum és társai* (2013) által használt felső szűrési határt, ugyanis ebben frekvenciatartományban várhatóak a villámlások infrahang jeleinek domináns összetevői (*Assink et al.*, 2008). Távolság szerint a legközelebbi nagyjából 3 kilométer távolságban, a legtávolabbi a maximálisan vizsgált 50 kilométer messzeségben történt. Az átlagos távolság a PSZI-től 27,6 kilométer. A legtöbb esetben a csúcsok -0,1 Pa és 0,1 Pa tartományba estek. A maximumok és minimumok eloszlásai az 7. (a) ábrán láthatóak. A csúcsok abszolút értékeinek arányaira 1 körüli értéket kaptunk, az átlag 1,05 lett a 68 villámlás alapján. Ez megegyezik *Chum és társainak* 2013-as

valamint *Arechiga és társainak* (2014) eredményeivel. Itt kiemelendő, hogy a három esetben vizsgált frekvenciasáv kissé eltér. (Esetünkben 0,25-5 Hz, *Chum és társai* munkájában (2013) 0,25-3 Hz, valamint *Arechiga és társainak* kutatásában 0,2-10 Hz.) Ez a megfigyelés ellentmond a Few modellje által jóslott 0,4-es értéknek, mely a modell pontosítását vetíti előre. Ugyan az észlelések végső azonosítását a 0,25–5 Hz frekvenciatartományban sávszűrött hullámformák vizsgálata adta, a frekvenciaösszetétel kiértékelését az észlelés pixelszintű frekvenciaösszetétele alapján végeztük. A 7. (b) ábra a villámokhoz kapcsolt észlelések minimum (piros), maximum (zöld) és átlagos (kék) frekvenciaösszetételét mutatja. A 68 infrahangészlelés átlagos frekvenciaösszetételei a következők: $\langle f_{min} \rangle = 0,767$ Hz, $\langle f_{átlag} \rangle = 2,626$ Hz. Ahogy a zivatarokhoz kapcsolt észleléseknél, itt is torznak mondható a maximumokhoz tartozó eloszlás, a csúcs a legmagasabb frekvenciasávhoz esik, tehát a villámokhoz kapcsolt észlelések szintén tartalmazhatnak magasabb frekvenciaértékeket.

A 8. ábra két megtalált villám hullámformáit (felső sor) hasonlítja össze *Chum és társai* 2013-as eredményeivel (középső sor) és Pasko 2009-es numerikus modelljével (d) és az átlagos hullámformákkal (e). Az első két saját ábrán PSZI 1 hullámformái láthatók: az (a) ábrán 2018. június 10. 15:41:34 és 15:41:38 (UTC), és a (b) ábrán 2019. augusztus 3. 11:00:51 és 11:00:55 (UTC) között. Ezek a regisztrátumokon zérófázisú, harmad rendű 0,25 Hz-es alsó



8. ábra. Megtalált villámok (felső sor) összevetése Chum és társai által azonosított villámokkal (középső sor, módosítva Chum et al., 2013 után) és (e) Pasko modellezett eredményével (módosítva Pasko, 2009 után). Az (f) ábrán a 68 megtalált villám alapján számolt átlagos hullámformát mutatja a csúcsonnál összetolva, előtte és utána 2-2 másodperccel megjelenítve.

és 5 Hz-es felső határokkal szűrt hullámformák szerepelnek. A (c) és (d) egy a Panska Ves-re (Csehország) kitelepített mikrobarométer regisztrátumai láthatók rendre 2012. június 20. 22:35:27 és 22:35:31, illetve 22:37:04 és 22:37:08 óra között. Ezen hullámformákon zérófázisú, nyolcad rendű 0,25 Hz-es alsó és 3 Hz-es felső határokkal rendelkező sávszűrő szerepel. Itt a felső határ azért alacsonyabb, mert a szerzők által használt műszer 4 Hz-nél levág. A felső négy kivágat a jobb összehasonlítás érdekében négy-négy másodperces időszavakat fed le. A legelső sorban, az (e) *ábrán* ezzel szemben egy hosszabb intervallum (10 másodperc) látható. Az (f) *ábra* a 68 villámlás hullámformáinak átlagát mutatja a csúcsonál összetolva, a csúcs előtt és után 2-2 másodperccel megjelenítve. A kezdeti kompressziós fázis és a dekompressziós csúcs (völgy) mind a hat esetben megfigyelhető. A harmadik kompressziós fázis (általában laposabb pozitív csúcs) azonban csak a (b) *ábrán* és a (d) *ábrán* rajzolódik ki. Ez a 68 vizsgált villámlás alapján ritkábban látszik, és rövidebb is a modellhez képest, valamint kisebb amplitúdóval rendelkezik. *Chum* és *társai* eredményeikhez képest elmondható továbbá, hogy az általunk talált villámlások amplitúdói kisebbek, inkább Pasko modelljénél is látható $\pm 0,1$ Pa tartományba estek (ahogy a 7 (a) *ábra* is mutatja). További sávszűrők tesztelése során (alsó határok: 0,2 Hz, 0,25 Hz, 0,5 Hz, 0,75 Hz, 1 Hz és felső határok: 5 Hz, 6 Hz, 7 Hz, 8 Hz kombinációival) az amplitúdó értékek továbbra is a $\pm 0,1$ Pa tartományba estek, valamint arányaik sem változtak az 1 körüli értékhez képest. Ugyanakkor a sávszűrő alsó határának növelésével megjelent a harmadik, kompressziós csúcs az átlagos hullámformákon.

Összefoglalás

Olyan félmanuális eljárást/eljárásokat fejlesztettünk ki, melyekkel egy infrahangállomás észlelései közül nagy bizonyossággal kiválaszthatóak, hogy melyek tartoznak zivatarokhoz, villámlásokhoz infrahang és villámeloszlás térképek összevetésével. A módszer gyorsnak mondható, mert nem igényli a hullámút követés (ray tracing) alkalmazását, amely jóval időigényesebb lenne ekkora számú észlelés esetén. A fejlesztett eljárással a vizsgált időtartományban, vagyis 2017 májusa és 2020 októbere között összesen összegyűlt körülbelül 630000 észlelés 5%-át sikerült besorolni a zivatar kategóriába.

Az azonosított zivatarok között azokhoz, melyek rövid ideig tomboltak és kis helyre koncentráldtak centroidokat rendeltük. Ezek alapján vizsgáltuk,

hogy milyen irányokból és milyen távolságokból képes regisztrálni a zivatarok által keltett infrahang-hullámokat a pizskés-tetői állomás. A 197 centroid vizsgálata kimutatta, hogy azimut szerint – a nyári troposzférikus széljárásnak megfelelően – a keleti zivatarok vannak többségben, 2:1 arányban a nyugatiakhoz képest. Távolság szerint többnyire regionális (<400 km) zivatarok jeleit veszi az állomás, de egészen 2000 km távolságig is képes regisztrálni ilyen eseményt. A PSZI-hez közeli (<50 km) zivatarokban külön kerestünk villámlásokat időbeli, valamint távolságfüggő térbeli szűrések alkalmazásával. Az észlelésekhez kapcsolódó hullámformák átvizsgálása után 68 villámlást sikerült azonosítanunk.

A jövőben az ismertetett módszerek rutinszerű alkalmazása hozzájárul, hogy jobban megértsük mit is „hall” hazánk eddig egyetlen infrahangállomása.

Köszönetnyilvánítás

A cikkben bemutatott munkákat a K128152 OTKA kutatási projekt és a NKM2018-10 cseh-magyar bilaterális egyezmény keretein belül végeztük. Köszönet illeti meg a Blitzortung hálózatot, valamint Barta Veronikát az adatbázishoz való hozzáférésben nyújtott segítségéért. Köszönet illeti meg továbbá a bírálót, aki kérdéseivel, javaslataival hozzájárult a cikk minőségének javításához.

Irodalomjegyzék

- Amezcuca, J., and Z. Barton*, 2021: Assimilating atmospheric infrasound data to constrain atmospheric winds in a two-dimensional grid. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 147, 3530–3554. <https://doi.org/10.1002/qj.4141>
- Arechiga, R., M. Stock, R. Thomas, H. Erives, W. Rison, H. Edens, and J. Lapierre*, 2014: Location and analysis of acoustic infrasound pulses in lightning. *Geophys. Res. Lett.* 41, 4735–4744. <https://doi.org/10.1002/2014GL060375>
- Assink, J. D., L. G. Evers, I. Holleman, and H. Paulssen*, 2008: Characterization of infrasound from lightning. *Geophys. Res. Lett.* 35, L15802. <https://doi.org/10.1029/2008GL034193>
- Balachandran, N. K.*, 1983: Acoustic and electric signals from lightning. *J. Geophys. Res.* 88, 3879–3884. <https://doi.org/10.1029/JC088iC06p03879>
- Beasley, W.H., T.M. Georges, and M.W. Evans*, 1976: Infrasound from convective storms: An experimental test of electrical source mechanisms. *J. Geophys. Res.* 81, 3133–3140. <https://doi.org/10.1029/JC081i018p03133>
- Blom P.S., O. Marcillo, and S.J. Arrowsmith*, 2015: Improved Bayesian Infrasonic Source Localization for regional infrasound. *Geophys. Res. Lett.* 42, 1682–1693. <https://doi.org/10.1093/gji/ggv387>
- Bohannon, J.L., A.A. Few, and A.J. Dessler*, 1977: Detection of infrasonic pulses from thunderclouds. *Geophys. Res. Lett.* 4, 49–52. <https://doi.org/10.1029/GL004i001p00049>

- Bondár, I., Cs. Czanik, B. Czece, D. Kalmár, M. Kiszely, P. Mónus, and B. Süle, 2019: *Hungarian Seismo-Acoustic Bulletin 2017–2018*, Kövesligethy Radó Seismological Observatory, MTA CSFK GGI.
- Bowman, H. S., and A. J. Bedard Jr., 1971: Observations of infrasound and subsonic disturbances related to severe weather. *Geoph. J. Roy. Astron. Soc.* 26, 215–242. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.1971.tb03396.x>
- Brachet N., Brown D., Le Bras R., Mialle P., Coyne J. Le Pichon A., Blanc., and Hauchecorne A., 2010: Monitoring the Earth's atmosphere with the Global IMS Infrasound Network, *Infrasound Monitoring for Atmospheric Studies*, Springer, 77–118. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9508-5_3
- Cansi, Y., 1995: An automated seismic event processing for detection and location: The P.M.C.C. method, *Geophys. Res. Lett.* 22, 1021–1024. <https://doi.org/10.1029/95GL00468>
- Chum, J., G. Diendorfer, T. Šindelářová, T. Baše, and F. Hruška, 2013: Infrasound pulses from lightning and electrostatic field changes: Observation and discussion, *J. Geophys. Res. Atmos.* 118, 10,653–10,664. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50805>
- Czanik, C., M. Kiszely, P. Mónus, B. Süle, and I. Bondár, 2021: Identification of Quarry Blasts Aided by Infrasound Data, *Pure Appl. Geophys.* 178, 2287–2300. <https://doi.org/10.1007/s00024-021-02748-5>
- Dessler, A.J., 1973: Infrasonic thunder. *J. Geoph. Res. Lett.* 78, 1889–1896. <https://doi.org/10.1029/JC078i012p01889>
- Diamond, M., 1964: Crosswind effect on sound propagation. *J. Appl. Meteorol. Climat.* 3, 208–210. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(1964\)003<0208:CWEOSP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(1964)003<0208:CWEOSP>2.0.CO;2)
- Drob, D.P., J.T. Emmert, G. Crowley, J.M. Picone, G.G. Shepherd, W. Skinner, P. Hays, R.J. Niciejewski, M. Larsen, C.Y. She, J.W. Meriwether, G. Hernandez, M. J. Jarvis, D.P. Sipler, C.A. Tepley, M.S. O'Brien, J. R. Bowman, Q. Wu, Y. Murayama, S. Kawamura, I. M. Reid, and R. A. Vincent, 2008: An empirical model of the Earth's horizontal wind fields: HWM07, *J. Geoph. Res.* 113, A12304. <https://doi.org/10.1029/2008JA013668>
- Farges, T., and E. Blanc, 2010: Characteristics of infrasound from lightning and sprites near thunderstorm areas, *Geophys. Res. Lett.* 115, A00E31. <https://doi.org/10.1029/2009JA014700>
- Farges, T., E. Blanc, A. Le Pichon, T. Neubert, and T.H. Allin, 2005: Identification of infrasound produced by sprites during the Sprite2003 campaign. *Geophys. Res. Lett.*, 32, L01813. <https://doi.org/10.1029/2004GL021212>
- Few, A.A., 1985: The production of lightning-associated infrasonic acoustic sources in thunderclouds, *J. Geoph. Res.* 90, 6175–6180. <https://doi.org/10.1029/JD090iD04p06175>
- Georges, T.M., 1973: Infrasound from convective storms: Examining the evidence. *Rev. Geoph. Space Phys.* 11, 571–593. <https://doi.org/10.1029/RG011i003p00571>
- Georges, T.M., 1976: Infrasound from convective storms. Part II: A critique of source candidates. NOAA Tech. Rep. ERL 380–WPL 49, [Available from the National Technical Information Service, 5285 Port Royal Rd., Springfield, VA 22161.]
- Jones, R.M., and T.M. Georges, 1976: Infrasound from convective storms. III. Propagation to the ionosphere. *J. Acoust. Soc. Amer.* 59, 765–779. <https://doi.org/10.1121/1.380942>
- Kamogawa M., T. Suzuki, H. Fujiwara, T. Narita, E. Wanke, K. Murata, T. Nagao, T. Kodama, J. Izutsu, A. Matsuki, et al. 2023: Characteristics of the Blitzortung.org Lightning Location Catalog in Japan. *Atmosphere* 14(10):1507. <https://doi.org/10.3390/atmos14101507>
- Kereszturi A., V. Barta., I. Bondár, Cs. Czanik, A. Igaz, P. Mónus, D. Rezes, L. Szabados, B.D. Pál, 2021. Review of synergic meteor observations: linking the results from cameras, ionosondes, infrasound and seismic detectors, *Month. Not. R. Astron. Soc.* 506, 3629-3640. <https://doi.org/10.1093/mnras/stab1918>
- Le Pichon and A.Y. Cansi, 2003: Progressive Multi-Channel Correlation: Technical Documentation. CTBTO, Vienna.
- Liszka, L. and Y. Hobara, 2006): Sprite-attributed infrasonic chirps. Their detection, occurrence and properties between 1994 and 2004, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.* 68, 1179–1188. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2006.02.016>
- Narita, T.; Wanke, E.; Sato, M.; Sakanoi, T.; Kumada, A.; Kamogawa, M.; Ishikawa, H.; Harada, S.; Kameda, T.; Tsuchiya, F. et al., 2018: A Study of Lightning Location System (Blitz) Based on VLF Sferics. In Proceedings of the 34th International Conference on Lightning Protection (ICLP), Rzeszow, Poland, 2–7 September 2018. <https://doi.org/10.1109/ICLP.2018.8503311>
- Nippres A., D.N. Green, O.E. Maricillo, and S.J. Arrowsmith, 2014: Generating regional infrasound celerity-range models using ground-truth information and the implications for event location. *Geoph. J. Int.* 197, 1154–1165. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu049>
- Pasko, V.P., 2009: Mechanism of lightning-associated infrasonic pulses from thunderclouds, *J. Geoph. Res. Lett.* 114, D08205. <https://doi.org/10.1029/2008JD011145>
- Šindelářová T., M. De Carlo, Cs. Czanik, D. Ghica, M. Kozubek, K. Podolská, J. Baše, J. Chum, and U. Mitterbauer, 2021: Infrasound signature of the post-tropical storm Ophelia at the Central and Eastern European Infrasound Network. *J. Atm. Solar-Terr. Phys.* 217, 105603. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2021.105603>
- Wilson, C.T.R., 1920: Investigations on lightning discharges and on the electric field of thunderstorms, *Philos. Trans. R. Soc. A* 221, 73–115. <https://doi.org/10.1098/rsta.1921.0003>

Internetes hivatkozások

- [1] https://www.blitzortung.org/hu/live_lightning_maps.php (2021.09.30.)
- [2] https://www.blitzortung.org/Compendium/Hardware/Documentation_20_6.html (2021.08.02.)
- [3] <https://www.fdsn.org/networks/detail/HN/> (2023.12.08.)
- [4] <https://infrasound.hu/index.php/hu/magyarorszagi-szeizmo-akusztikus-bulletin> (2024.02.07.)