

Ábel Pálma Roxána¹ 

A robbantások detektálásának lehetősége ionoszonda alkalmazásával

The Possibility of Detecting Explosions Using Ionosonde

Egy robbantás történhet föld alatt, földfelszínen és az atmoszférában is. Egy robbanás során, mint egy földrengéskor, keletkeznek elsődleges, másodlagos, Love és Rayleigh felszíni hullámok, továbbá akusztikus és nehézségi hullámok is. Az akusztikus, nehézségi, akusztikus-nehézségi és a felszíni hullámok mellett az elliptikusan terjedő Rayleigh-hullám vizsgálendő. A felületi hullám által keltett légköri hullám nagy területeket tud végigjárni, és egészen az ionoszféráig is terjedhet. Attól függően, hogy milyen robbanási energiát kapott, akár a legfelső rétegig is el tud jutni. Az ionoszféra a termoszféra részeként 60 km-től 600 km-ig terjed, ahonnan az exoszféra kezdődik, és több alrétegre osztható. Ezek a D, E és F rétegek. Napjainkban az ionoszférát folyamatosan tanulmányozzák, és elsődlegesen a rádiókommunikációs rendszerek használják. Az erre használt eszköz a digiszonda vagy ionoszonda, amely az ionoszféra állapotát vizsgálja. A DPS4D² képes az anomáliák detektálására valós időben.

Kulcsszavak: ionoszonda, nehézségi hullám, terjedő ionoszférikus zavar, robbantástechnikai innováció

An explosion can occur underground, on the surface of the earth and in the atmosphere. During an explosion, primary, secondary, Love and Rayleigh surface waves arise; the same waves are generated during an earthquake. We differentiate acoustic, gravity, acoustic-gravity and surface waves. The elliptically propagating Rayleigh wave is the one which can be examined. The atmospheric wave generated by surface waves can travel long distances, reaching the ionosphere. Depending on how much explosive energy it receives, it can travel all the way to the top layer. The ionosphere, as part of the thermosphere, extends from 60 km up to the exosphere starting at 600 km and

¹ Okleveles had- és biztonságtechnikai mérnök, robbantástechnikai szakmérnök, e-mail: palmaroxana1602@gmail.com

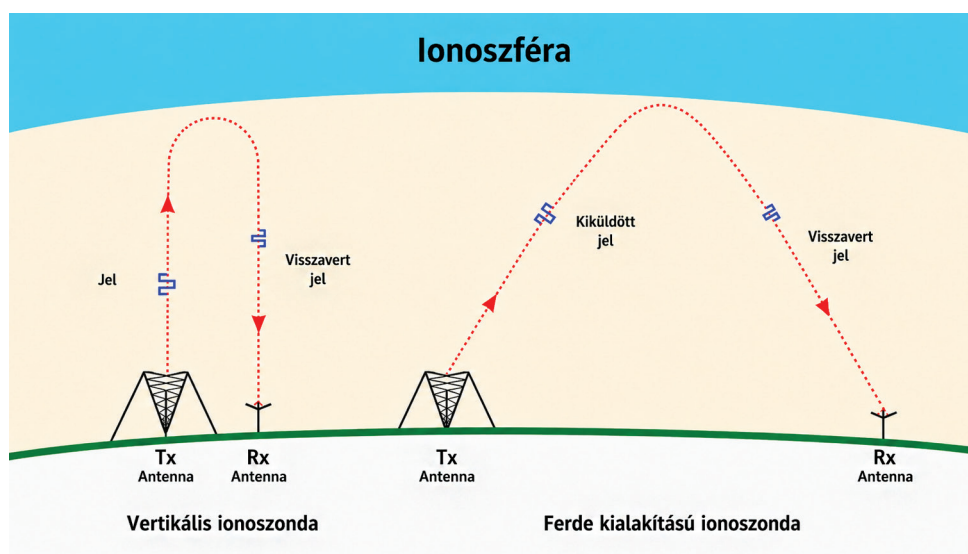
² DPS4D – Digital Portable Sounder 4D.

can be divided into several sublayers. Those are the D, E and F layers. Nowadays, the ionosphere is continuously studied, primarily in the field of radio communications. Digisonde or ionosonde can be used to study the layers and examine the state of the ionosphere. The DPS4D is capable of detecting anomalies in real time.

Keywords: ionosonde, gravity waves, traveling ionospheric disturbances, explosive innovation

Bevezetés

Az ionoszonda célja, hogy az ionoszférában bekövetkező plazma mozgását és bizonyos rétegének attribútumait, többek között a magasságot és elektronsűrűséget figyelje hosszú hullámú rádiójelekkel. Kétféle TID³-t különböztetünk meg. Az egyik esetben az ionoszféra teljes elektrontartalmának változását okozó események következnek be; a másik típusú TID, ahol az ionoszférikus plazmában bekövetkezett anomáliák nem okoznak eltérést a teljes elektrontartalomban. Ilyen esemény lehet például egy kisebb vagy közepes intenzitású robbantás. A digiszondák (DPS4D típusú ionoszondák) összehangolt mérésekre alkalmas eszközök, ezáltal nagy területet tudunk vele lefedni. Kétféle típusú mérési módszer van, az egyik esetében a visszaverődések függőleges irányban történnek, a másik esetben ferdén, ezáltal jól lehet az ionoszférában létrejövő struktúrákat vizsgálni, ezenfelül az anomáliák, TID-ek jellemző attribútumait, mint például a sebesség, a méret és az idő.⁴



1. ábra: Digiszonda-típusok

Forrás: a szerző szerkesztése MENDOZA–RUIZ–JARAMILLO 2017 alapján

³ TID: travelling ionospheric disturbances – terjedő ionoszférikus zavarok.

⁴ HUN-REN 2024.

A vertikális struktúrájú légkörben a radar-visszaverődések a zenit, tetőpont közelében a legerősebbek, és attól távolodva a zenittől eltérő szöggel folyamatosan csökkennek.⁵ Az ionoszondák a különböző magasságokból visszaverődő jelek kibocsátási és annak beérkezési idődifferenciálját dolgozzák fel, amelyek szöveges adatok lesznek. Nagyjából 8 és 10 perc közé esik az észrevételi idő, hiszen ennyi perc szükséges ahhoz, hogy a robbanás által keltett hullámok elérjenek az ionoszféraréteghez.⁶

Jelen tanulmány célja annak vizsgálata, hogy az ionoszondás mérések milyen mértékben alkalmasak különböző típusú robbantások által keltett ionoszférikus zavarok detektálására és jellemzésére. A kutatás középpontjában az akusztikus és akusztikus–nehézségi hullámok ionoszférára gyakorolt hatásának elemzése áll, különös tekintettel a terjedő ionoszférikus zavarok (TID-ek) kialakulására és terjedési sajátosságaira. A vizsgálat célja továbbá annak értékelése, hogy a digiszonda-rendszerek (különösen a DPS4D) milyen hatékonysággal alkalmazhatók robbanási események detektálására, valamint hogy a felszíni változások műholdas megfigyelése és az ionoszférikus adatok együttes elemzése milyen mértékben növeli a detektálás pontosságát. A tanulmány kiterjed a háttérzajok és környezeti tényezők hatásának vizsgálatára is, amelyek befolyásolják a mérési eredmények értelmezhetőségét.

A vizsgálat során a szerző kvalitatív és összehasonlító elemzést alkalmaz, amely különböző robbanási eseményekhez kapcsolódó ionoszférikus megfigyelések feldolgozásán alapul. Az elemzés alapját egyrészt a digiszondák által szolgáltatott ionogramok, másrészt a GNSS-alapú teljes elektron tartalom- (TEC-) mérések, valamint műholdas távérzékelési adatok képezik. A módszertan része továbbá a különböző típusú robbantások (kémiai, nukleáris, valamint természetes eredetű – például vulkáni kitörések) összehasonlító vizsgálata, amely lehetővé teszi az egyes események karakterisztikáinak elkülönítését. A háttérzajok és zavaró tényezők azonosítása során a szerző figyelembe veszi a klimatológiai, geofizikai és űridőjárási hatásokat is.

Robbantások jellemzői

A robbantások során keletkező légköri és szeizmikus hullámok komplex kölcsönhatásban állnak a légkör különböző rétegeivel, és jelentős hatást gyakorolhatnak az ionoszférára is. A robbanás következtében nemcsak vízszintes irányban terjedő lökéshullámok jönnek létre, hanem felfelé haladó akusztikus és akusztikus–nehézségi hullámok is kialakulnak, amelyek a légköri paraméterek változásával módosulva képesek elérni az ionoszféra különböző rétegeit. A Rayleigh-típusú felületi hullámok különösen fontosak, mivel az ezek által generált légköri zavarok nagy távolságokra is eljuthatnak, és mérhető ionoszférikus anomáliákat hozhatnak létre. A különböző hullámtípusok eltérő terjedési mechanizmusai és sebességtartományai lehetővé teszik a robbanási események részletesebb vizsgálatát. A szeizmikus eredetű zavarok jellemzően 1000–3000 m/s sebességgel terjednek, míg a Rayleigh-típusú felületi hullámok sebessége elérheti a 2000–5000 m/s tartományt. Az akusztikus–nehézségi hullámok ezzel

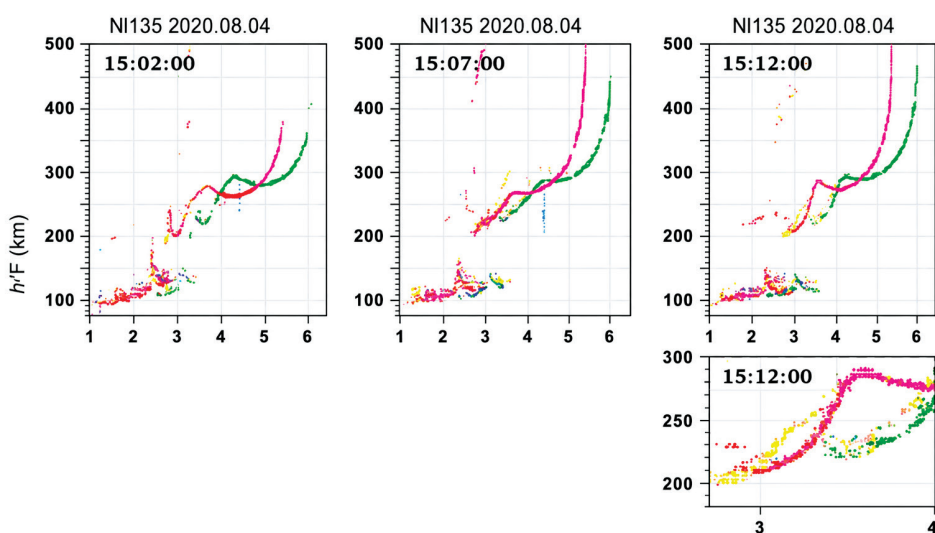
⁵ GIANNATTASIO 2022.

⁶ BARTA et al. 2019.

szemben alacsonyabb, néhány száz m/s nagyságrendű sebességgel haladnak, ugyanakkor jelentős szerepet játszanak az ionoszférikus zavarok kialakulásában.

Nagyobb energiájú robbanások vagy robbantási sorozatok esetén a különböző hullámok szuperpozíciója komplex ionoszférikus mintázatokat eredményez, amelyek detektálása ionoszonák és GNSS-alapú rendszerek segítségével egyaránt lehetséges. A műholdas jelek frekvenciafüggő késleltetésének vizsgálata lehetőséget biztosít a teljes elektrontartalom meghatározására, amelyből következtetni lehet az adott esemény által kiváltott ionoszférikus zavarokra. Az amerikaiak által üzemeltetett globális műholdak 20 200 km magasan keringenek. Az elektromágneses jelek terjedése frekvenciafüggő. A műholdak két frekvencián sugároznak egyszerre: L1 – 1575,42 MHz és L2 – 1227,60 MHz.⁷ A különféle frekvenciájú jelek változó értékű jelkésleltetésen mennek keresztül, amelyből a teljes elektrontartalom meghatározható, és következtetni lehet az adott esemény által okozott hatásokra.

A kapott adatok bináris képi eredményei az ionogramokon olvashatók le, amit a 2. ábra is mutat. Az ionoszféra rétegei kirajzolódnak az elektronsűrűség alapján, vagyis a visszaverődési helyek látszólagos magasságát mutatja, az adott frekvenciának a függvényében. A távolságok látszólagosak, a pontos magasság a kapott magasság frekvencia-nyomvonalaiából határozható meg, ami azt jelenti, hogy az ionogramon a határozottabb ordinárius hullámból számítják ki. A 2. ábra egy ionogramot mutat a bejrúti robbanásról, a nicosiai állomáson rögzített adatok alapján. A nicosiai állomáson jól kimutatható és kétségtávolú látszik az anomália, ezzel ellentétben a San Vito-i állomásnál ugyanaz a robbanás már kevésbé következetesen meghatározható.⁸



2. ábra: A nicosiai állomás ionogramja a bejrúti robbanás után

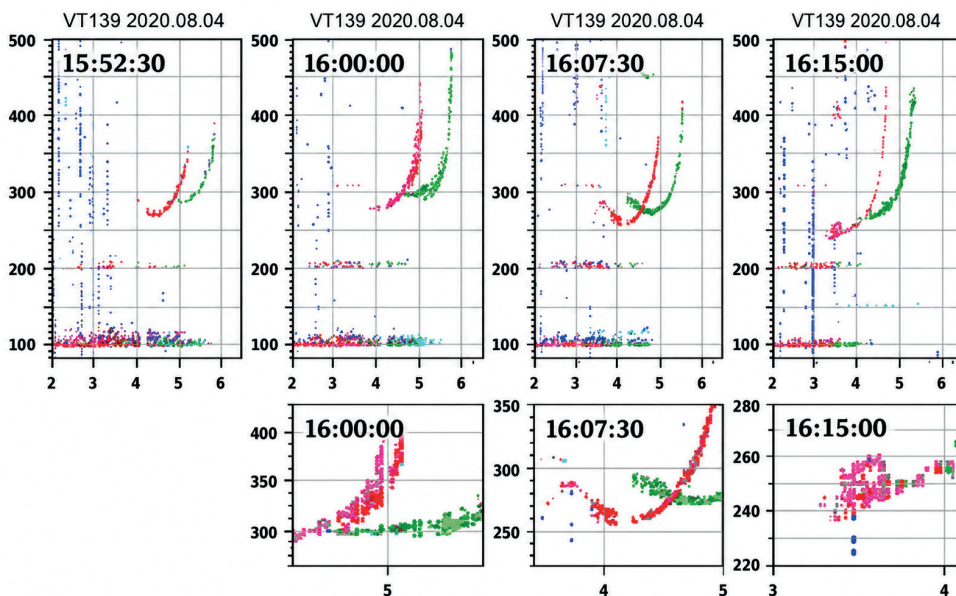
Forrás: a szerző szerkesztése REZY–LAI 2024 alapján

⁷ BARTA et al. 2023: 10.

⁸ REZY–LAI 2024.

A nicosiai állomáson a robbanás után 4 perccel már érzékelhető volt az anomália, míg a San Vito állomás 52 perces késéssel jelezte a robbantást. A 2. és 3. ábrán a képek ennek az időnek megfelelően vannak ábrázolva. Az alsó képen látható, hogy a terjedés hosszának mértékével az észlelés pontossága is csökken, mivel a hullámok csillapítódnak a távolsággal. A csillapodás mértéke függ a robbanás tömegétől, intenzitásától, és hogy milyen környezeti tényezők járultak hozzá a hullám elnyelődéséhez. Nicosia Bejrúttól 241 km-re van légvonalon, míg a San Vito-i állomás nagyjából 2392 km-re található.⁹

Az ionogramok elemzése lehetőséget biztosít az ionoszférikus zavarok időbeli és térbeli lefolyásának vizsgálatára. A bejrúti robbanás esetében megfigyelhető, hogy a detektálás időbeli késése és az anomália erőssége szoros összefüggést mutat a mérőállomás távolságával. Ez arra utal, hogy a hullámok csillapodása és a terjedési közeg inhomogenitása jelentősen befolyásolja az észlelhetőséget. Az eredmények alapján megállapítható, hogy a közelebbi állomások esetében a detektálás megbízhatóbb, míg nagyobb távolságok esetén az anomáliák egyre nehezebben azonosíthatók, ami a rendszer érzékenységének korlátaira is rámutat.



3. ábra: A bejrúti robbanás detektálása a San Vito-i állomáson

Forrás: a szerző szerkesztése REZY–LAI 2024 alapján

⁹ A távolság meghatározása a következő segítségével történt: <https://www.thedistancenow.com/>; REZY–LAI 2024.

Vizsgálatra érdemes robbanóanyagok

A robbanás mennyisége függ a robbanóanyag összetételétől, hiszen egy impulzív és nagyobb detonációs sebességű robbanóanyagból kevesebb mennyiség is elegendő, míg egy kevésbé heves reakciójú anyagból nagyobb mennyiség szükséges. Jelenleg TNT-egyenértéket használunk annak érdekében, hogy a robbanáshőt meghatározzuk. Megadja, hogy egy adott robbanóanyag robbanási teljesítménye, munkavégzési képessége hogyan aránylik a TNT-hez. A 27/2022. (I. 31.) SZTH rendelet alapján a TNT-egyenértéket E-vel jelöljük, és úgy határozzuk meg, hogy a vizsgált anyag robbanáshőjét elosztjuk a TNT robbanáshőjével, ami 4564 kJ/kg.¹⁰

$$E = \frac{\text{a robbanóanyag robbanáshője, kJ/kg-ban}}{\text{a TNT robbanáshője, kJ/kg-ban}}$$

A modern robbanóanyagok nagy erejű és magas detonációs sebességgel rendelkező robbanóanyagok. Magas detonációs sebességgel rendelkezik a CL-20, TKX-50, FOX-7, I-RDX és TEX, amelyeknek a detonációs sebességét az 1. táblázatban foglaltam össze.¹¹

1. táblázat: Robbanóanyagok detonációs sebessége

Robbanóanyag	Detonációs sebesség (m/s)
CL-20	9380–10 000
TKX-50	9687
FOX-7	8869
I-RDX	8750
TEX	8749

Forrás: a szerző szerkesztése

Háttérzajok

A robbantások ionoszférikus detektálását jelentős mértékben befolyásolják a különböző természetes és mesterséges eredetű háttérzajok, amelyek sok esetben hasonló jelenségeket idéznek elő, mint a robbanási események. Ezek közé tartoznak az időjárási és klimatológiai folyamatok, az évszakos és napszakos változások, valamint az űridőjárás hatásai, különösen a geomágneses viharok és a naptevékenység okozta ionoszférikus zavarok. Emellett a geológiai eredetű események – például földrengések és vulkánkitörések – szintén képesek akusztikus–nehézségi hullámokat generálni, amelyek az ionoszférában a robbantásokhoz hasonló mintázatokat hoznak létre.

A különböző zavarforrások elkülönítése ezért kulcsfontosságú a megbízható detektálás szempontjából. A robbantások által keltett ionoszférikus anomáliák jellemzően rövidebb idejűek és koncentráltabb térbeli eloszlást mutatnak, míg a természetes eredetű jelenségek gyakran hosszabb időtartamúak és komplexebb mintázatot eredményeznek. Ugyanakkor

¹⁰ 27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról.

¹¹ DARUKA 2023.

a különbségek nem minden esetben egyértelműek, ezért szükséges több paraméter együttes vizsgálata, például az anomália időtartama, intenzitása, terjedési sebessége, valamint az érintett ionoszférikus rétegek jellemzői.

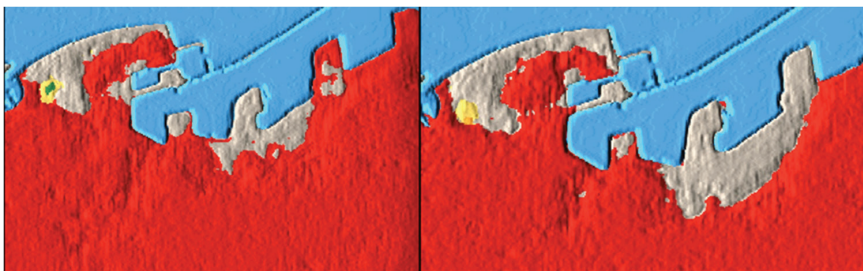
A mérési eredmények értelmezését jelentősen segíti a korábbi adatsorokkal való összehasonlítás, amely lehetővé teszi az adott területre jellemző háttérviszonyok meghatározását. A referenciaadatok hiányában a detektált jelenségek könnyen félreértelmezhetők, különösen olyan régiókban, ahol gyakoriak a természetes ionoszférikus zavarok. Ezen túlmenően figyelembe kell venni az adott terület geopolitikai és biztonsági helyzetét is, mivel egy konfliktus-övezetben nagyobb valószínűséggel fordulhatnak elő robbanási események, ami befolyásolhatja az értelmezési keretet.

A háttérzajok hatásának csökkentésében egyre nagyobb szerepet kapnak a mesterséges intelligencián alapuló modellek, amelyek képesek a nagy mennyiségű mérési adat feldolgozására és a mintázatok automatikus felismerésére. Az ilyen rendszerek segítségével előrejelezhetők a geomágneses eredetű zavarok, valamint elkülöníthetők az ismert természetes jelenségekhez tartozó minták, ezáltal növelve a robbantások detektálásának pontosságát.

A háttérzajok megfelelő kezelése és szűrése alapvető feltétele az ionoszondás robbanás-detektálás megbízható alkalmazásának. A különböző adatforrások integrált elemzése, valamint a korszerű adatfeldolgozási módszerek alkalmazása jelentős mértékben hozzájárulhat a téves riasztások csökkentéséhez és a detektálási képességek fejlesztéséhez.

A földfelszín vizsgálata

Az ionoszférikus anomáliák detektálását követően lehetőség nyílik a vizsgált terület felszíni változásainak elemzésére is, amely hozzájárulhat az események pontosabb azonosításához. A műholdas távérzékelési adatok – különösen a Sentinel-2 rendszer felvételei – lehetővé teszik a felszínborítás változásainak kvantitatív vizsgálatát. A képfeldolgozási eljárások során a pixelek osztályozása alapján meghatározható a pusztítás mértéke és térbeli kiterjedése, amely összevethető az ionoszférikus mérések eredményeivel. Ez az integrált megközelítés növeli a detektálás megbízhatóságát, különösen olyan esetekben, amikor a helyszíni vizsgálat nem lehetséges.



4. ábra: A bejrúti robbanás előtt és után

Forrás: a szerző szerkesztése <https://dynamicworld.app/> alapján

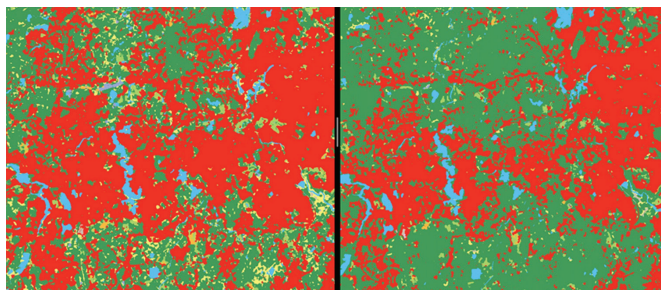
Összehasonlításként, a 4. ábrán a 2020. augusztus 8-ai robbanás eredménye látható a bejrúti kikötőnél, ahol a raktár állt. A bal oldali kép a robbanás előtti állapotot, a jobb oldali kép a robbanás utáni állapotot ábrázolja. A piros részek az ember által beépített területek, a kék a víz, a sárga a cserje, és zöld a minimális növényzet. Észrevehető, hogy a lakott területek hogyan épültek egyik helyről a másikra, miután romba dőltek a régebbi lakhelyek.

A rendszer a Sentinel-2 műholdképre épülő mélytanulási módszert alkalmazza, amely 2–5 naponta frissül jelen állapotban. 10 méteres felbontású, földborítási adatokat nyújt. Képpontonként számol valószínűséget kilenc talajborítási osztályban:¹²

- víz: állandó és időszakos;
- fák, erdő: elsődleges és másodlagos erdők, nagy kiterjedésű növényzet;
- füves mezők: természetes, továbbá legelésre, emberi természetítésre használt területek;
- bozót és bokros, cserjés területek: hiányos, sztyeppés növényzet;
- vetési terület: gabonaföldek;
- elöntött növényzet: vízben honos erdős terület;
- jég borította övezet, hó- és jégképződmények: állandó és szezonális;
- ember lakta beépített terület: ember által kialakított épületek, utak, létesítmények;
- sziklás, csupasz, növényzet nélküli és lakatlan terület: sivatag és sziklás területek.

Az algoritmus a műholdkép minden pixelére megbecsüli az adott terület változásait, beépítettségét, fák arányát és további változásokat. Három fő lépésből áll a program. Először beolvassa az adatokat, megtörténik a vizualizáció és a kompozitkészítés. A következő lépésben kiszámítja a pixelek számát az adott régió földborítási osztályához, és vizsgálja a pixelszám eloszlását az összes osztályra. Végül az idősort kalkulálja, ami lehetővé teszi a valós idejű vizualizációt.¹³

Az 5. ábra az orosz–ukrán háború során kialakult változásokat ábrázolja. A bal oldali 2022-es kép esetében megfigyelhető a piros színnel jelölt, ember által beépített területek nagysága. A jobb oldalon ugyanaz az orosz–ukrán határ menti terület látható, de két évvel később. Az infrastruktúra és lakott övezet erős degradációja látható a folyamatos robbantások következtében.



5. ábra: Kijev és az orosz határ közötti lakott területek aránya 2022-ben és 2024-ben

Forrás: a szerző szerkesztése <https://dynamicworld.app/> alapján

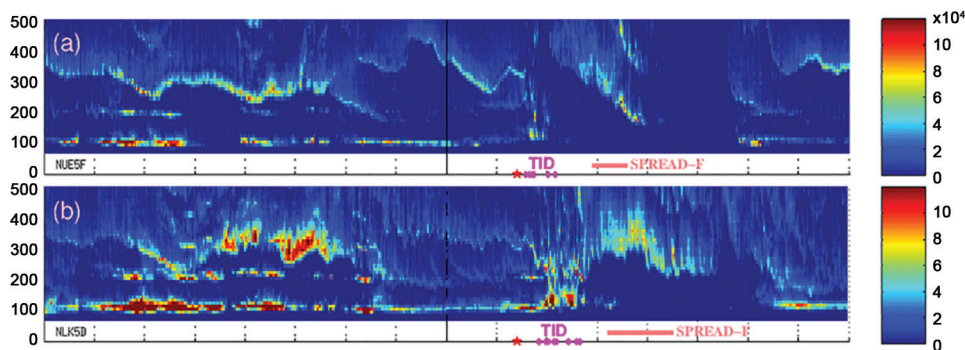
¹² <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/introduction-to-dynamic-world-pt-1>

¹³ <https://developers.google.com/earth-engine/tutorials/community/introduction-to-dynamic-world-pt-3>

Vulkánkitörés

Annak érdekében, hogy jobban megértsük a robbantásokra jellemző egyes karakterisztikákat, a hozzá legközelebb álló természeti jelenséget szükséges vizsgálni, mégpedig a vulkánkitöréseket. A vulkánkitörés erejében és terjedési idejében teljes mértékben megfelel egy nagy erejű robbantásnak. Továbbá a vulkánkitörés még nagyobb földfelszínváltozást tud eredményezni, mint egy robbanás.

Megállapítható, hogy a robbanásoknak különféle karakterisztikájuk van. Kémiai és nukleáris, amely lehet egyszeri és sorozatos, továbbá történhet föld alatt, földön és a légkörben is. A kémiai robbanás vizsgálatához érdemes elemezni a vulkánok tulajdonságait is, mivel nagy hasonlóság van egy robbanás és egy kitörés között, továbbá jól vizsgálhatók az ionoszférában.



6. ábra: A NUE5F és NLK5D állomás által kirajzolódó tartomány-idő-intenzitás

Forrás: a szerző szerkesztése CARTER et al. 2023 alapján

A 6. ábrán a Hunga Tunga vulkán kitörésének hatása látható. A hullámoknak az iránya és azoknak a sebessége S alakú nyomvonalként jelenik meg a Doppler-spektrogrammon. Az adó és a vevő közötti pályarészen az S alakú nyomoknak az egymáshoz képest történő eltolódásából lehet a sebességet és irányt megállapítani. A középvonaltól balra a 2022/01/14 teljes visszaverődés amplitúdó szám látható, míg a jobb oldal a 2022/01/15 amplitúdó értékeit mutatja. Az (a) ábra a Niue (NUE5F), a (b) ábra pedig a Norfolk Island (NLK5D) állomás értékeit mutatja, ugyanabban az időintervallumban. A jobb oldali színskálából látható, hogy mikor érkezett meg a kitörés hatása. A színek a visszhangoknak a számát jelzik. A TID-k jelenlétét a rózsaszín pontok jelölik. A piros csillag a kitörésnek az időpontját jelenti.

A következő elemi gázok jellemzők egy vulkánkitörésre:¹⁴ elsődleges elemi gázok, Zn, Sn, Bi, Cu és Pb törnek a felszínre. Az elemi gázok mellett különféle vegyületek és keverékek is keletkeznek, amelyek kihatnak a környezetre: H_2O , CO_2 , SO_2 , H_2S , HCl , HBr és HF . A robbanás során keletkező anyagok a H_2 , C , N_2 , O_2 , Cl_2 , NO , CO , HCN , HCl , H_2O , H_2S , CH_4 , CO_2 , SO_2 , NH_3 , NO_x , N_2O , C_2N_2 , fém-oxidok, karbonátok, bikarbonátok, cianidok, szulfátok, szulfitok, szulfidok, kloridok.

¹⁴ UCL Earth Sciences 2022.

A felszínre expandált gázok a lávának az összetételétől és annak a hőmérsékletétől függenek. Sok esetben további kürtőkön keresztül törnek a felszínre, a nyomás folyamatos gázkibocsátás mellett kisebb robbanásokat is eredményez. Ebből következik, hogy egy vulkánkitörés egy időben elhúzódó folyamat, ezáltal annak nyomata is hosszabb ideig fog zavart okozni. A törmelékeket akár 10 km magasságig is fel tudja löni. A gázok levegőbe kerülése hatással van a környezetre és az időjárásra is.

Összefoglalás

A vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az ionoszondás mérések alkalmasak lehetnek különböző típusú robbanások által keltett ionoszférikus zavarok detektálására, ugyanakkor a módszer megbízhatóságát jelentős mértékben befolyásolják a háttérzajok és a környezeti tényezők. A különböző robbanási események eltérő karakterisztikái – különösen a hullámterjedési sajátosságok és az időbeli lefolyás – lehetőséget adnak az események típus szerinti elkülönítésére. A felszíni és ionoszférikus adatok integrált elemzése ígéretes irányt jelent a jövőbeni kutatások számára, különösen a nem detektált vagy rejtett robbanások azonosítása terén.

A nagy mennyiségű gázok, továbbá az ütköző hamurészecskék kölcsönhatásba lépnek egymással és elektromosan feltöltődnek. Ennek a statikus elektromosságnak az eredménye a vulkánok körül jellegzetes villámlás. Ez egy olyan karakterisztika, amely kémiai robbantásos cselekményeknél nem fordul elő. Az egyes vulkáni tevékenységeket földrengések követik, amelyek cunamikhoz is vezethetnek. A földrengések által keltett hullámok szintén okoznak zavarokat az ionoszférában. Ez egy komplex folyamat, amely események láncolatát indítja el, és térben, időben is elnyúlik. A 2. táblázatban összefoglaltam a fő robbanástípusokat, azok hatásait és főbb karakterisztikáikat.

2. táblázat: Robbanások megkülönböztetése

Típus	Időtartam	Hatás	Környezeti hatás	Anyagáramlás	Hullámtípus
Kémiai robbanás	Alacsony frekvencia, hosszabb időtartam, 8–12 perc, mire az ionoszféráig eljut	Fizikai erőhatás, hőhatás, kémiai hatás	Felszíni pusztítás; a robbanás erejéig	Rövid időtartam, kémiai anyagok	AG-hullám ¹⁵
Nukleáris robbanás	Gyorsabban jut el az ionoszféráig, mint a kémiai robbanás	Fizikai erőhatás, hőhatás, ionizáló sugárzás	Felszíni; a robbanás után a sugárzás hosszú ideig tart	Rövid időtartam, sugárzó anyagok	AG-hullám, 50%-a lökeshullám, a maradék a hősugárzás és a radioaktív kiszóródás
Vulkánkitörés	Hosszan tartó, az összes nyomott gázok lassan haladnak	Fizikai erőhatás, kémiai hatás, természetes radioaktív hatás	Környezet elemi pusztítása	Hosszantartó, vulkáni villámlók, porviharok	AG-hullám

Forrás: a szerző szerkesztése

¹⁵ AG-hullám: akusztikus és nehézségi hullám.

A 2. táblázatból jól látható, hogy a különféle típusú robbanásoknak jellegzetes karakterisztikái vannak, de a közös jellemző, hogy mind a három robbanás esetében keletkezik nehézségi és akusztikus hullám. A folyamat során keletkeznek térhullámok és felületi hullámok. A primer longitudinális hullámok és a szekunder transzverzális hullámok térhullámok, amelyek közül az utóbbi nem terjed folyadékban. A Rayleigh és Love típusú hullámok a felületi hullámok, de ezek közül a Rayleigh típusú hullámnak van szerepe az ionoszonda-vizsgálat szempontjából.

A módszer alkalmazása különösen előnyös lehet olyan robbanási események esetében, amelyek nem lakott területen történnek, illetve ahol a helyszíni vizsgálat korlátozott vagy nem lehetséges. Ilyen események:

- fegyverek tesztelése;
- robbanóanyagok tesztelése;
- légköri események, anomáliák;
- légkörben történt robbanás;
- víz alatti robbantások észlelése.

A rendszer előnye lenne, hogy nem bejelentett, titkos eseményekről is lehetne adatot gyűjteni, a karakterisztikák meghatározása mellett a digiszonda és a földfelszín adatainak összevetésével.

A tanulmány eredményei elsősorban a különböző detektálási megközelítések összehasonlító elemzésén alapulnak, és alapot nyújtanak a jövőbeni kvantitatív vizsgálatokhoz.

Felhasznált irodalom

- BARTA Veronika et al. (2019): Digitális ionoszféra radar (DPS4D) a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban: új megfigyelési és kutatási lehetőségek. In BACSÁRDI László – SZÜCS Eszter – WESZTERGOM Viktor (szerk.): *Magyar Űrkutatási Fórum 2019 – Az előadások összefoglalói*. Sopron: Magyar Asztronautikai Társaság, 17.
- BARTA Veronika et al. (2023): Földrengések nyomai a felsőlégkörben? *Fizikai Szemle*, 73(10), 338–342.
- CARTER, B. A. et al. (2023): The Ionospheric Effects of the 2022 Hunga Tonga Volcano Eruption and the Associated Impacts on GPS Precise Point Positioning Across the Australian Region. *Space Weather*, 21(5). Online: <https://doi.org/10.1029/2023SW003476>
- DARUKA Norbert (2023): Érzéketlen robbanóanyagok I. – Célkeresztben a TNT és a Composit B kiváltása. *Műszaki Katonai Közlöny*, 33(2), 5–21. Online: <https://doi.org/10.32562/mkk.2023.2.1>
- GIANNATTASIO, Fabio (2022): Ionosphere Monitoring with Remote Sensing. *Remote Sensing*, 14(21), 5325. Online: <https://doi.org/10.3390/rs14215325>
- HUN-REN Soproni kutatóintézetrel történő személyes interjú, 2024.
- MENDOZA, Jhon J. B. – RUIZ, Carlos F. Q. – JARAMILLO, Carlos R. P. (2017): Implementation of an Electronic Ionosonde to Monitor the Earth's Ionosphere via a Projected Column through USRP. *Sensors*, 17(5). Online: <https://doi.org/10.3390/s17050946>
- REZY, Pradipta – LAI, Pei-Chen (2020): Observations of Ionospheric Disturbances Associated with the 2020 Beirut Explosion by Defense Meteorological Satellite Program and Ground-Based Ionosondes. *Annales Geophysicae*, 42(1), 301–312. Online: <https://doi.org/10.5194/angeo-42-301-2024>
- UCL Earth Sciences (2022): The Chemistry of Volcanic Gases and Their Environmental Impacts. *YouTube*, 2022. április 4. Online: https://www.youtube.com/watch?v=ia7PcET_cCo

Jogi forrás

27/2022. (I. 31.) SZTFH rendelet az Általános Robbantási Biztonsági Szabályzatról