

A NEMZETKÖZI GEODÉZIAI ÉS GEOFIZIKAI UNIÓ (IUGG) MAGYAR NEMZETI BIZOTTSÁG (MNB) HÍRLEVELE

This document is the annual newsletter of the IUGG Hungarian National Committee (MNB) for 2024.



Ez a dokumentum az IUGG Magyar Nemzeti Bizottság (MNB) 2024. évi éves hírlevele.

1. Az IUGG Magyar Nemzeti Bizottsága

Az IUGG nyolc tagszervezetből áll, melyek a következők:

- Nemzetközi Geodéziai Szövetség (International Association of Geodesy, **IAG**),
- Nemzetközi Krioszféra Tudományok Szövetség (International Association of Cryospheric Sciences, **IACS**),
- Nemzetközi Szeizmológiai és Földbelső-fizikai Szövetség (International Association of Seismology and Physics of the Earth's Interior, **IASPEI**),
- Nemzetközi Meteorológiai és Légköri Tudományok Szövetség (International Association of Meteorology and Atmospheric Sciences, **IAMAS**),
- Nemzetközi Vulkanológiai és Földbelső-kémiai Szövetség (International Association of Volcanology and Chemistry of the Earth's Interior, **IAVCEI**),
- Nemzetközi Hidrológiai Tudományok Szövetség (International Association of Hydrological Sciences, **IAHS**),
- Nemzetközi Fizikai Óceánográfiai Szövetség (International Association for the Physical Sciences of the Oceans, **IAPSO**),
- Nemzetközi Geomágnesességi és Aeronómiai Szövetség (International Association of Geomagnetism and Aeronomy, **IGA**).

Az IUGG Magyar Nemzeti Bizottság (MNB) az egyes tagszervezetek nemzeti képviselőit tömöríti. A hírlevél összeállításakor az IAG nemzeti képviselője Rózsa Szabolcs, az IACS nemzeti képviselője Bartholy Judit, az IASPEI nemzeti képviselője Kalmár Dániel, az IAMAS nemzeti képviselője Bozó László, az IAVCEI nemzeti képviselője Harangi Szabolcs, az IAHS nemzeti képviselője Gribovszki Zoltán, az IAPSO nemzeti képviselője Weidinger Tamás (aki Horváth Lászlótól vette át a képviseletet 2025 első felében), az IAGA nemzeti képviselője pedig Heilig Balázs (aki Wesztergom Viktortól vette át a képviseletet 2024-ben). Az IUGG MNB elnökét és titkárát az MTA Földtudományok Osztálya választja meg, a Bizottság elnöke Rózsa Szabolcs, titkára Bozóki Tamás.

2024. április 4-én a soproni HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (FI) adott otthont az IUGG MNB által első alkalommal megszervezett egynapos előadóülésnek és szakmai találkozóknak: az IUGG Napnak (<https://iugg.epss.hu/iuggnap/>). A rendezvény sikerességét jól mutatja, hogy azon körülbelül 40 kutató vett részt, a résztvevők közel felét fiatal kutatók tették ki, 15 szóbeli előadás hangzott el, valamint 16 poszter is bemutatásra került.

Az IUGG megalapításának 105. évfordulójának évében megtartott rendezvényen a résztvevőket elsőként Dr. Kovács István János és Prof. Sierd Cloething a FI megbízott igazgatója és tudományos főtanácsadója köszöntötte (1. ábra). Dr. Rózsa Szabolcs, az IUGG MNB elnökének köszöntője után a rendezvény az IUGG 8 tagszervezetének (IAG, IACS, IASPEI, IAMAS, IAVCEI, IAHS, IAPSO, IAGA) és a tagszervezetekhez kapcsolódó hazai tudományos tevékenységeknek a bemutatásával folytatódott a nemzeti képviselők tolmácsolásában.



1. ábra. Dr. Kovács István János a HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézetének megbízott igazgatója köszönti a IUGG Nap résztvevőit



2. ábra. Kerekasztal-beszélgetés az IUGG MNB céljairól és jövőbeli terveiről

A délutáni szekció a nemzeti képviselők által felkért előadók szakmai előadásával indult, ahol többek között a műográfia geofizikai alkalmazásairól, óceáni áramlások laboratóriumi vizsgálatáról és a légkör globális műholdas navigációs rendszerek segítségével történő monitorozásáról hallhattak egy-egy izgalmas előadást a résztvevők. A nap az IUGG MNB jövőbeli terveinek ismertetése után egy kerekasztal-beszélgetéssel zárult (2. ábra), amelynek a résztvevői: Rózsa Szabolcs (IUGG MNB elnök, IAG nemzeti képviselő), Kalmár Dániel (IASPEI nemzeti képviselő), Harangi Szabolcs (IAVCEI nemzeti képviselő), Heilig Balázs (IAGA nemzeti képviselő), Gribovszki Zoltán (IAHS nemzeti képviselő), Kovács István János (FI megbízott igazgató) és Weidinger Tamás (ELTE Meteorológiai Tanszék) voltak. A beszélgetés résztvevői egyetértettek abban, hogy az IUGG MNB

kiváló lehetőséget jelent a hazai intézetek és a különböző tudományágak közötti szorosabb együttműködés elősegítésére, fontos szerepet játszhat a külföldön élő magyar kutatókkal történő kapcsolattartás erősítésében, valamint jó lehetőséget biztosíthat fiatal kutatóknak a földtudományokhoz kapcsolódó hazai kutatásokba történő bekapcsolódásba.

Az IUGG MNB fontos célja a kvantitatív földtudományokkal foglalkozó magyar kutatók közötti információáramlás elősegítése, amely reményeink szerint hasznos tapasztalatok megosztásához, új együttműködések kialakulásához, és ezáltal a közösség kollektív erősödéséhez vezet. Ezzel a céllal összhangban az IUGG MNB egy tudományos hírlevél elindítása mellett döntött, amelyben az itthon és külföldön dolgozó magyar kutatók éves rendszerességgel számolhatnak be a közösségnek tudományos eredményeiről és a témájukhoz kapcsolódó egyéb hírekről. 2024-ben felhívást tettünk közzé, és a nemzeti képviselőkön keresztül arra kértük az érintett intézményeket, hogy osszák meg legfrissebb eredményeiket az IUGG hírlevélben. A hírlevelek egyes számai nem törekednek a teljességre, de minden közreműködő előtt nyitottak. Örömmel várunk minden rövid hírt, amely az IUGG tudományterületeihez kapcsolódik!

2. Geodézia

2.1 Kőzetdölések megfigyelése a Mura-Mürz törésvonal mentén

A Mura-Mürz törésvonal (MMTV) tektonikai folyamatokkal összefüggő kőzetdöléseinek megfigyelésére az elmúlt években fokozatosan épült ki a lokális Mura-Mürz Monitoring Hálózat (MMMh). A folyamatos mérésekhez a Lippmann-féle, nanoradián felbontású, 2D függőleges inga típusú kompakt dőlsmérőket alkalmazzák. A részben a GeoSphere Austria, részben a magyarországi HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet Geodéziai kutatási egysége által üzemeltetett MMMh öt földalatti állomásból áll, kettő Ausztriában (COBS, PTNA), három Magyarországon (SOPGO, Soppal, BREBA). A hálózat eredetileg a terület lassú tektonikus deformációinak megfigyelését hivatott szolgálni, de az MMMh a helyi, tranzien szeizmikus eseményekhez kapcsolódó, elsősorban a szeizmo-tektonikai kutatások számára hasznosítható kőzetdőlés idősorokat is szolgáltat. A hálózat 2023 eleje óta működik, és az adatok (a kőzetek kelet-nyugati és észak-déli irányú dölései, a levegő hőmérséklete, páratartalma és nyomása) folyamatos regisztrálása 5 Hz-es mintavételi frekvenciával történik. A mérési helyszínekről történő ütemezett adattovábbítást az állomásokon rendelkezésre álló informatikai infrastruktúra biztosítja. A mérések a kepuj.sag.ggi.hu nyilvános weboldalon óránként frissülnek.

Az elmúlt évek során az adatokat tartalmazó fájlok elnevezésére és tárolására egy alkalmas protokollt dolgoztak ki és vezettek be a mindennapi rutinfeladatok hatékony elvégzése érdekében. Valamint előfeldolgozó (rövid adatszakadások és –ugrások korrekciójára), adatelemző (szűrés, spektrális elemzés, koherencia, zajszintváltozás azonosítása és földrengés beérkezési idő becslésére) és a hosszú idősorok megjelenítésére szolgáló programokat fejlesztettek ki, amelyek mind a háttér számítási-infrastruktúrát szolgáltató HP Unix operációs környezetben futtathatók.

A 2023-as év eleje óta a hosszuperiódusú jeleken túl (pl. árapály-hatás okozta kőzetdőlés) számos helyi és távoli szeizmikus esemény tranzien hullámformáit is rögzítették az állomások. Az adatok alapján sikeres kísérletet tettek az MMTV tektonikai folyamataihoz kapcsolódó helyi földrengések epicentrumainak lokalizálására, annak bizonyítására, hogy az MMMh működése alkalmas a tektonikai folyamatok megfigyelésére. A kedvezőtlen hálózati geometria és az alkalmazott geometriai és fizikai egyszerűsítések ellenére az időben megfelelő pontossággal szinkronizált kőzetdőlés idősorok feldolgozására kifejlesztett, időkésés inverzió alapuló módszer a helyi szeizmológiai állomások megfigyelései alapján meghatározott epicentrumokhoz közeli epicentrum-koordinátákat (eltérések átlaga: 4,5 km, mediánja: 2,3 km) ad. Ezen ígéretes eredmények megalapozzák a további vizsgálatok tervezését a kőzetdőlési adatok szeizmo-tektonikai kutatásokban való alkalmazására.

Barbély Enikő, Benedek Judit, Papp Gábor
HUN-REN FI, Geodéziai kutatóegység

2.2 Gravitációs tér modellezése a Balmuccia kihívás keretében

A HUN-REN FI Geodéziai kutatóegység tagjai aktívan vettek részt a Lausanne-i Egyetem Földtudományi Intézete által vezetett „Balmuccia gravitációs modellezési kihívás” című projektben. A projekt célja az ún. Ivrea-testbe ékelődött Balmuccia-peridotit test 3D modellezése, a formáció geológiai tanulmányozására végzendő mélyfúrások pontos helyének megállapítására. Ennek keretében azokat a számítógépes algoritmusait használták fel, melyeket az ún. „forward” gravitációs számításokban, a derékszögű hasáb- és poliéderek térfogatelemekkel diszkrétizált tömegeloszlási modellek alkalmazása során fejlesztettek az elmúlt évtizedek során. Megvizsgálták a digitális terepmodell térbeli felbontásának hatását a gravitációs szimuláció eredményére, különösen azokon a pontokon, ahol gravitációs mérések állnak rendelkezésre. Az egység tagjai által kifejlesztett rácsalapú algoritmus hatékonyan képes csökkenteni a térfogatelemek számát, ami az alkalmazott küszöb-paraméter értékének függvényében akár egy nagyságrendnyi idő csökkenést eredményez az erőter szimulációk futási idejében. Még alpesi topográfia esetében is, az alkalmazott 2 m-es simítási küszöbérték mellett sem haladja meg a 0,5 mGal-t az optimalizált és a referencia topográfiai modell gravitációs hatásai közötti eltérés.

Barbély Enikő, Benedek Judit, Papp Gábor
HUN-REN FI, Geodéziai kutatóegység

3 Szeizmológia és a Föld belső fizikája

3.1 Őskörnyezet és vulkánosság modellezés

Az MTA-FI FluidsByDepth Lendület Kutatócsoport idén megjelent tanulmányai közül egyik a Journal of Volcanology and Geothermal Research-ben jelent meg (Hencz et al. 2024), fő témája pedig a pliocén őskörnyezet és a balaton-felvidéki vulkánosság kapcsolata. A munka központjában a Szent György-hegy, főleg annak robbanásos vulkánkitörésekhez kapcsolható kőzetei (piroklasztitok) vannak. A Szent György-hegy részletes vulkáni fejlődéstörténete nem ismert, az újonnan felfedezett piroklasztit-rétegsora viszont lehetőséget nyújt ennek a rekonstruálására. Részletesen dokumentáltuk a rétegsort, amely a hegy alsó és csúcsközeli szintjén is számban feltárul. Ezután rétegtrollált módon kézipéldányokat gyűjtöttük, és azok vágott felszínét digitalizáltuk. A kőzetfelszíneken digitális képelemzést végeztünk annak érdekében, hogy a kőzetösszetevők felületarányát számszerűsítsük. Az eredmények alapján kiemelendő, hogy a Szent György-hegyhez hasonló, rendkívül gyakori maar vulkánok kitörése hirtelen kitörési típusváltással jellemezhető a környezetükben lévő víz mennyiségének és helyének függvényében. Az ilyen vulkánok kutatása ezért rendkívüli fontossággal bír a vulkáni veszélyek megértése, ezáltal jobb veszély-előrejelzés miatt.

Berkesi Márta, Hencz Mátyás,
Spránitz Tamás, Németh Károly
MTA-FI FluidsByDepth Lendület Kutatócsoport

3.2 Hőmérséklet modellezés a Pannon-medence északnyugati részén

Megjelent továbbá egy új, korszerű numerikus modellezési módszert alkalmazó tanulmány a Pannon-medence északnyugati részének múltbeli (elmúlt 10 millió évre vonatkozó) és jelenkori hőmérsékletteréről (Békési et al. 2025) az EGU Solid Earth folyóiratban. A modellt több mint 300, fúrásokban mért hőmérséklet adattal kalibráltuk, és a legújabb geofizikai és geológiai adatrendszereket használtuk bemenő paraméterekként, ezzel biztosítva a lehető legpontosabb leképezését a litoszféra hőmérsékletterének. Mindezek a litoszféra-leptékű fluidumáramlások pontosításában is szerepet játszanak. Az üledékes medencék mélybeli hőmérsékleti fejlődésének modellezése kulcsfontosságú a geodinamikai folyamatok és a geoenergetikai erőforrás-potenciál

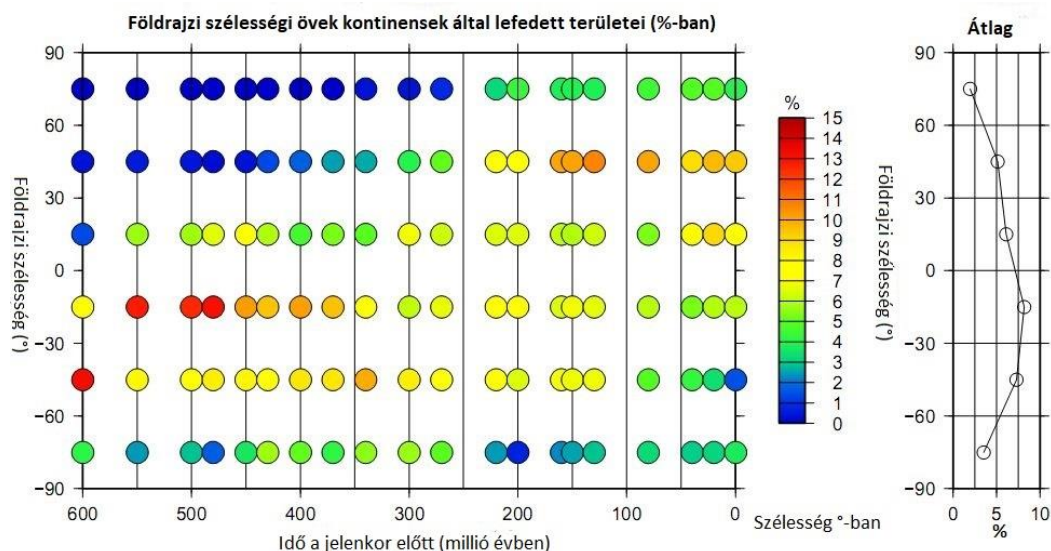
meghatározásához. A munka során számos bemeneti adattal parametrizált modellezéssel becsléseket adunk a litoszféra nyúlásának, majd vastagodásának mértékére. Vizsgáljuk a modell bementi paramétereinek hatását a kapott hőmérsékleti becslésekre természetesen rögzítve annak bizonytalanságait és korlátait.

Békési Eszter, Berkesi Márta, Porkoláb Kristóf
MTA-FI FluidsByDepth Lendület Kutatócsoport

3.3 Az asztenoszféra viszkozitásának szerepe a tektonikai lemezek mozgásában

A litoszférát és a lemezeket mozgató erők meghatározásához elengedhetetlen az asztenoszféra viszkozitásának ismerete. A viszkozitás értékét a „menekülés a pólusoktól” néven is ismert Eötvös-erő számításával határoztuk meg (Fodor et al. 2024). Az általunk becsült $\eta = (10^{13} - 10^{14})$ Pa-s viszkozitás érték alacsonyabb, mint a legtöbb szerzőé, de megegyezik a Jin et al. (2004), Doglioni et al. (2011), Zaccagnino (2020) újabban kapott értékeivel.

Az Eötvös-erő érvényesülését a lemeztectonikában mutatja a 3. ábra. Ezt 20, a földtörténet utolsó 600 millió évét illusztráló, ösföldrajzi térkép sorozat digitalizálása alapján készítettük. Látható, hogy a kontinensek elhelyezkedése az alacsonyabb szélességeken, a sarkoktól távol, koncentrálnak. Azaz az Eötvös-erő hatása érvényesül a kontinensek szélesség szerinti elhelyezkedésében. Ez alátámasztja az általunk kapott asztenoszféra viszkozitás érték megalapozottságát.



3. ábra. Az Eötvös-erő érvényesülése a lemeztectonikában

Az így kapott η értéket felhasználva meghatároztuk a teljes litoszféra Földhöz viszonyított elmozdulásához szükséges energia nagyságát ($0,5 - 5,1 \cdot 10^{11}$ Joule/s). Ezt az értéket összevetettük az árapálysúrlódás által okozott forgási energia változással, melynek értékére $3,3 \cdot 10^{12}$ Joule/s adódott. Tehát az utóbbi energia nagysága önmagában elegendő lehet a teljes litoszféra nyugati irányú mozgásához. Ezt a nyugati irányultságot támogatja az Eötvös-erő is, amely megakadályozza, hogy a lemezek poláris irányban mozogjanak. Eredményünk megerősíti Nesi et al. (2023) árapályhatáson alapuló eredményét a litoszféra nyugati irányú sodródásáról.

Varga Péter, Fodor Csilla, Sneeuw Nico (Stuttgart)
HUN-REN FI

3.4 Árapály súrlódás és a földrengés aktivitás szélesség szerinti eloszlása

Az árapály súrlódás következtében bekövetkező tengely körüli forgássebesség csökkenés megváltoztatja a Föld geometriai lapultságát. Ez a változás feszültségeket eredményez az úgynevezett kritikus szélességeken ($\phi \approx \pm 50^\circ$).

1. táblázat. Földrengés aktivitás szélesség szerinti eloszlása

Földrajzi szélesség	Az $M \geq 7$ -es földrengések teljes listája			$M \geq 7$ -es földrengések (forrás mélysége ≤ 100 km)			$M \geq 7$ -es földrengések (forrás mélysége > 100 km)		
	n	E (10^{18} J)	E/n (10^{16} J)	n	E (10^{18} J)	E/n (10^{16} J)	n	E (10^{18} J)	E/n (10^{16} J)
0°	470	11,56	2,46	398	10,67	2,68	72	0,89	1,24
15°	357	4,70	1,32	276	3,82	1,38	81	0,88	1,09
30°	305	16,53	5,42	280	16,30	5,82	25	0,23	0,92
45°	168	5,02	2,99	144	4,49	3,12	24	0,53	2,22
60°	17	4,12	24,22	17	4,12	24,22	0	0	0
75°	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Az International Seismological Centre Global Instrumental Earthquake Catalogue (1904-2020) (<https://www.isc.ac.uk/iscgem/index.php>) adatainak felhasználásával végzett vizsgálataink eredményei alátámasztják ezt a feltételezést (Varga és Fodor 2021, Fodor et al. 2024) (1. táblázat):

- 1 nincsenek $M \geq 7$ -es események, ha $\phi \geq 70^\circ$; $\phi = \pm 50^\circ$ és a pólusok között csak sekély fókuszú nagy eseményeket figyeltünk meg,
- 2 az $M \geq 7$ -es földrengések száma az egyenlítőtől a pólusok felé haladva csökken,
- 3 nincs összefüggés a szeizmikus energia felszabadulásának szélességi körök mentén való eloszlása és a legerősebb $M \geq 7$ -es események előfordulása között,
- 4 és ami talán a legfontosabb: az eseményenkénti földrengési energia eloszlása jelentős anomáliát mutat a $\phi = 50^\circ$ és $\phi = 60^\circ$ szélességek között.

Varga Péter, Fodor Csilla, Sneeuw Nico (Stuttgart)
HUN-REN FI

3.5 A Pannon medence történeti rengéseinek vizsgálata, kísérlet ezek epicentrumainak és magnitúdóinak becslésére

A műszeres szeizmológia megjelenése előtti, történelminek nevezett, földrengések vizsgálatának két akadályával foglalkoztunk (Varga et al. 2023):

1. az a hely, ahol a földrengések hatását észrevették és a megfigyeléseket följegyezték gyakran nem esett egybe a földrengés epicentrumával,
2. a kortársak a földrengések hatását sokszor másként érzékelték és jegyezték fel, mint azt a jelenkorban élők tennék.

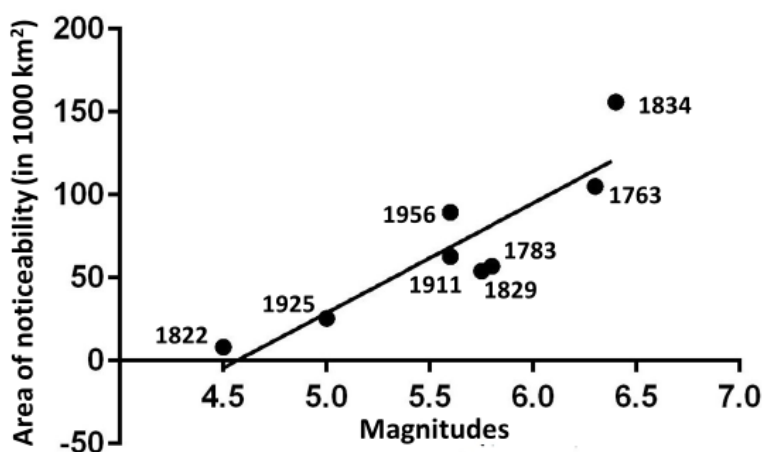
Hogy ezeknek a bizonytalanságoknak hatásait csökkentsük tapasztalati képleteket készítettünk.

1. Nyolc olyan jelenkori földrengés alapján melyek izoszeisza térképeinek intenzitás adatai és műszerekkel meghatározott magnitúdó értékei rendelkezésre állnak a következő, a Pannon medencére érvényes, kifejezést kaptuk (ahol R a hipocentrális távolság):

$$M = (I + 1,5 \cdot \ln R - 2,8) / 1,44$$

2. Mivel a régmúltban készült feljegyzések káradatai bizonytalanok a rendelkezésre álló forrásokat két részre bontottuk: a korabeli feljegyzés tartalmaz kárról szóló információt, vagy csak annyi áll benne, hogy érezték a rengést. A kétféle adat között feltételezhetően húzódhatott az $I = 4$ izoszeisza, mely elhatárolja károsodott területet attól, ahol csak észlelték az eseményt. Az 1763 és 1956 közötti nyolc jól meghatározott esemény eredményeire támaszkodva (4. ábra) a következő tapasztalati összefüggést határoztuk meg az $I = 4$ izoszeisza által elfoglalt terület és az M magnitúdó érték között:

$$\text{Terület (1000 km}^2\text{)} = a \cdot M + b = (66,28 \pm 13,8) \cdot M - (302,6 \pm 79,8)$$



4. ábra. Az $I=4$ izoszeisza által elfoglalt terület és az M magnitúdó érték közötti összefüggés

Korrelációs együttható: 0,891, valamint 5%-os konfidenciaszintet alkalmazva az F statisztika szerint az egyenlet baloldalán szereplő a és b együttható értékek megbízhatóak.

Fenti kifejezésekre, valamint jelentős talajfolyósodási, hidrológia és korabeli hivatalos kárfelmérési adatbázisokra támaszkodva sikerült több jelentős történelmi földrengés magnitúdó értékét és epicentrumának helyét ellenőriznünk, illetve újraértékelnünk.

Varga Péter, Győri Erzsébet, Fodor Csilla, Timár Gábor
HUN-REN FI, ELTE

4 Meteorológia és Légköri Tudományok

4.1 A légköri szén-dioxid háttérkoncentrációjának alakulása Magyarországon 1993-2023 között

Magyarországon Európában az elsők között, 1981-ben indult meg a légkör szén-dioxid tartalmának folyamatos nyomon követése. 1981 és 1999 között az Országos Meteorológiai Szolgálat K-pusztai állomásán folytak a mérések, míg 1994-től a hegyhátsági TV/rádió-adótorony vált a mérések bázisává. A szén-dioxid hosszú légköri tartózkodási idejének köszönhetően a két helyszínen végzett mérések, kellő körültekintéssel, összekapcsolhatók, kialakítva egy nemzetközileg is kiemelkedő hosszúságú

adatsort. A K-pusztai mérések feldolgozása a maguk idejében megtörtént (Haszpra 1999), míg a három évtizedes hegyhátsági adatsor kiértékelése 2024-ben jelent meg az Atmospheric Measurement Techniques című folyóiratban (Haszpra 2024). A Hegyhátsálon mért hosszú távú koncentráció-trend ($2,20 \mu\text{mol mol}^{-1} \text{év}^{-1}$) szorosan követi az adott időszak globális tendenciáját, míg a koncentráció az európai nettó emberi kibocsátásnak köszönhetően átlagosan $3,90 \pm 0,83 \mu\text{mol mol}^{-1}$ -al haladja meg az óceáni háttérértéket. A koncentráció növekedési ütemében jól kimutathatók a El Niño Déli Oszcilláció (ENSO) gerjesztette ingadozások. A szén-dioxid koncentráció növekedési ütemének ingadozása a hazai adatsorban 6-7 hónapos késleltetéssel követi az ENSO-t. Kiderült, hogy a szén-dioxid koncentráció napi ingásának amplitúdója lassan nő, különösen nyáron, alapvetően az éjszakai magas koncentrációk átlagosnál gyorsabb növekedése miatt. Ez utóbbi háttérben a felmelegedés, az erősödő növényi respiráció áll. A felmelegedés a mérési időszak első felében $0,96 \pm 0,41$ nap év^{-1} -vel hozta előrébb azt az időpontot, amikor a légkör az évi átlaghoz képest a téli többletből nyári CO_2 -hiányba váltott. Ez a folyamat azonban a 2010-es évektől leállt vélhetően azért, mert a további melegedés elegendő fény nélkül már nem tudta korábbra húzni a növények vegetációs időszakának kezdetét, a szén-dioxid asszimiláció megindulását.

Haszpra László
HUN-REN FI

4.2 A globális villámdinamika vizsgálata különböző időskálákon a Schumann-rezonancia frekvenciaváltozásai alapján

A nagyeceni Széchenyi István Geofizikai Observatórium (NCK) immár több, mint három évtizedet átölelő Schumann-rezonancia (SR) adatsorának segítségével vizsgáltuk a globális villámtevékenységben különböző időskálákon bekövetkező változásokat (Sátori et al. 2024). Bemutattuk, hogy a SR frekvenciák hogyan tükrözik a globális villámtevékenység átrendeződéseit a napi és az éves időskálákon, valamint, hogy bizonyos esetekben a SR frekvenciák távoli földrészekben (például Dél-Amerikában) kialakuló több száz kilométer kiterjedésű zivatarláncok mozgására is érzékenyen reagálnak. A vizsgálat talán legérdekesebb eredménye, hogy a csendes-óceáni El Niño - Déli Oszcilláció (ENSO) jelenség erős meleg fázisait követően jelentősen megnőhet a villámtevékenység a Föld északi féltekén, ami a trópusokon felgyülemelő hő közepes szélességek felé történő szétterjedésével hozható összefüggésbe. Az eredmények magyar nyelvű összefoglalója a HUN-REN oldalán érhető el¹.

Sátori Gabriella, Bozóki Tamás
HUN-REN FI

4.3 Légköri távkapcsolatok nyomában sokasági éghajlati szimulációkkal

A tanulmány a pillanatkép-megközelítés alkalmazását mutatja be az éghajlatváltozás kutatásában (Haszpra et al. 2024). Ez a módszer a sokasági éghajlati szimulációkat használja fel az éghajlati rendszer pillanatnyi állapotainak jobb megértésére. A hagyományos időbeli statisztikák helyett a pillanatnyi állapotok eloszlását veszi alapul, így pontosabb képet ad az éghajlati változásokról. A megközelítés alapja a pillanatkép-attraktorok elmélete, amely a rendszer pillanatnyi lehetséges állapotainak valószínűségi eloszlását írja le. Az éghajlati rendszer belső változékonysága a kaotikus és disszipatív dinamika következménye, így a szimulációk kezdeti feltételei idővel elveszítik jelentőségüket, és a külső kényszerek válnak meghatározóvá, mely dinamikát kizárólag sokaságok jellemezhetik matematikai értelemben helyesen. A pillanatkép-attraktorok segítségével az éghajlat

¹ https://hun-ren.hu/tudomanyos_hirek/egy-csendes-oceani-jelenseg-miatt-lehet-tobb-zivatar-magyarorszagon-107736

belső változékonysága minden időpillanatban egzakt módon vizsgálható. A tanulmány bemutatja, hogy a sokasági szimulációk egy idő után konvergálnak a pillanatkép-atraktorhoz, amely az adott kényszerek mellett lehetséges állapotokat reprezentálja a konvergencia után.

Az arktikus oszcilláció (AO) példáján keresztül a szerzők szemléltetik, hogyan alkalmazható a pillanatkép-megközelítés a légköri távkapcsolatok feltérképezésére. Az empirikus ortogonális függvények (EOF) elemzésének, szerzők által kifejlesztett pillanatkép-alapú változata (SEOF) lehetővé teszi az éghajlati oszcillációk időbeli változásának pontos követését.

Az AO fontos szerepet játszik az északi féltéke időjárásának és klímájának alakulásában, a tanulmány kitér arra, hogy az AO mintázata és intenzitása a jövőben változhat. A pillanatkép-megközelítésben számított korrelációk együttthatók pontosabb képet adnak az éghajlati változások hatásairól, mint a hagyományos módszerek. A szerzők kiemelik, hogy a változó éghajlat esetén a klasszikus idősor-elemzések nem feltétlenül tükrözik helyesen az oszcillációk és távkapcsolatok alakulását. A pillanatkép-megközelítés lehetővé teszi, hogy az éghajlati statisztikákat az aktuálisan lehetséges állapotok alapján határozzuk meg, így pontosabb előrejelzések készíthetők.

Herein Mátyás
ELTE, HUN-REN FI

4.4 Légköri oszcillációk

Az Atmospheric Oscillations: Sources of Subseasonal-to-Seasonal Variability and Predictability c. könyv átfogó ismeretet nyújt a különféle, tudományos és társadalmi szempontból jelentős légköri oszcillációkról, a természetes éghajlati változékonyság és az antropogén éghajlatváltozás kontextusában. A könyv külön bevezetőt tartalmaz minden egyes jelenségekhez, áttekintést ad az adott területen elért ismeretekről, eredményekről; részletes elemzéseket közöl a releváns dinamikai folyamatokról, valamint tárgyalja az időjárásra és az éghajlatra gyakorolt hatásukat, illetve ezek következményeit az előrejelzések és projekciók szempontjából.

A könyv fejezeit egy nemzetközi, légköri és bolygótudományok területén dolgozó szakértői csoport írta. Minden fejezet vagy egy adott légköri oszcillációra összpontosít, vagy több oszcilláció közötti kölcsönhatást vizsgál. A 10. fejezet szerzői: Topál Dániel, Haszpra Tímea és Herein Mátyás (Topál et al. 2025).

Herein Mátyás
ELTE, HUN-REN FI

4.5 Kötött keringésű exobolygók légkörzésének kísérleti modellezése

A mérsékelt égövi légkörzés modellezéséhez széles körben használt laboratóriumi kísérleti elrendezés, a differenciálisan fűtött és forgatott „rotating annulus” a hőmérsékleti peremfeltételek geometriájának módosításával alkalmassá tehető kötött keringésű exobolygólégkörök áramlási rendszerének modellezésére is. Ennek – legelső – kísérleti megvalósítása az ELTE Kármán Laboratóriumában végrehajtott kísérletsorozat (Vass et al. 2024). Az ismert kisebb méretű, s ezért valószínűleg szilárd felszínnel rendelkező exobolygók jellemzően nagyon közel keringenek központi csillagukhoz – éppen ezzel könnyítve meg felfedezésüket a Földről, illetve üresközökről. Így keringésük mindenképpen kötött kell, hogy legyen, vagyis az ilyen exobolygókon a központi csillaguk körüli keringés („év”) és a tengely körüli fordulat („nap”) időtartama megegyezik. A hozzánk legközelebbi, ráadásul mérete alapján Föld-szerűnek tűnő exobolygó, a Proxima Centauri B esetében ez a periódusidő kb. 11,2 földi nap: elég rövid ahhoz, hogy a tengely körüli forgás miatt fellépő Coriolis-erő jelentős hatást gyakoroljon a bolygó légkörének áramlási rendszereire. A kötött keringés miatt a központi csillag mindig a bolygó ugyanazon oldalát világítja meg, vagyis az égitestnek létezik egy permanens nappali és éjszakai oldala. Az áramlási rendszer tehát egy olyan

forгатott, a 'rotating annulus' konfigurációhoz hasonló elrendezésben modellezhető, amelynek oldalsó, a légkör modelljéül szolgáló vízréteggel együtt forgó külső pereme peremén írunk elő azimutális irányban egy dipól-szerű hőfluxus-peremfeltételt. A kutatás során felderítettük, hogy az éjszakai és nappali oldal közötti hőmérsékletkülönbség függvényében a bolygó forgási szögsebességét megfelelően tekintetbe véve is kétféle áramlási állapot figyelhető meg: egy "gyorsan forgó" és egy "lassan forgó" légköri állapot. Jelenleg zajló további kutatások tárgyát képezi, hogy mi határozza meg, hogy a rendszer melyik dinamikailag stabil állapotba kerül. A kísérlet tanulságai a szuperrotáló (azaz a felszínnél gyorsabban körbeforduló) bolygólégkörök dinamikájának jobb megértéséhez (ilyen például Naprendszerünkben a Vénusz légkörzése) is hozzásegíthet.

Vincze Miklós
ELTE, HUN-REN FI

5 Geomágnesesség és Aeronómia

5.1 Ionoszférikus abszorpció meghatározása

2023-ban egy új módszer került publikálásra (Buzás et al. 2023), melynek segítségével az ionoszonda mérések során rögzített amplitúdó (jelerősség) értékekből meg lehet határozni az ionoszférikus abszorpció (elnyelődés) léptékét. Az eredmények alapján a módszer használata során nagyon ügyelni kell arra, hogy a vizsgált fler esemény geomágneses szempontból nyugodt időszakban következett-e be. Összetett események során, amikor a napkitörés és geomágneses vihar hatásai együttesen érvényesülnek, nagyon óvatosnak kell lenni a különböző ionoszonda adatokból származtatott paraméterek alkalmazása során. Következő lépésként a módszerrel származtatott értékeket összevetettük az ionoszférikus abszorpció kimutatására leginkább elfogadott globális modellel (NOAA D-RAP modell). A legfontosabb konklúzió, hogy a mért értékek majdnem minden esetben meghaladják a modellezettet, napkitörések alkalmazásával akár többszörösen is, azaz a modell alulbecsüli a Nap röntgensugárzása által okozott abszorpciót (Barta et al. 2024).

Barta Veronika, Buzás Attila, Bozóki Tamás, Süle Dávid Péter
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
Ionoszféra Kutatócsoport

5.2 Geomágneses viharok vizsgálata ionoszonda adatok feldolgozásával

Soproni és San Vito-i ionoszonda adatok feldolgozásával és elemzésével járultunk hozzá két geomágneses vihar ionoszférára gyakorolt hatásának vizsgálatához az európai régióban, melyek 2023 márciusában és áprilisában következtek be (Mosna et al. 2024). A vizsgálatok során az F1 és F2 rétegben bekövetkező dinamikus változásokra koncentráltunk, több esetben az F1 réteg kritikus frekvenciája meghaladta az F2 réteget mindkét vihar során. A főfázisok során az F1 réteg elektronsűrűség csökkenését tapasztaltuk, amely a plazma felfelé történő áramlására utal. Ezen kívül mindkét vihar során „szórt ferde” (spread, oblique) jeleket figyeltünk meg az F2 rétegben, melyek egybe estek azokkal az időszakokkal, amikor az optikai kamerák sarki fényt észleltek az adott szélességen, azaz ezek a sarki fény oválisának a megjelenései az ionogramokon.

Barta Veronika, Berényi Kitti Alexandra
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
Ionoszféra Kutatócsoport

5.3 Ionoszonda mérések összehasonlítása különböző geomágneses vihartípusok idején

Egy következő tanulmányunkban vizsgáltuk három különböző típusú ionoszonda műszer adatait két típusú geomágneses (koronaanyag-kidobódás vagy korotáló interakciós régió okozta) vihar esemény alatt (Berényi et al. 2024). Egyik célkitűzésünk az volt, hogy meghatározzuk van-e bármilyen különbség a műszer típusok adatai között. Valamint meg kívántuk határozni, hogy a két típusú geomágneses vihar során milyen ionoszférikus zavarok figyelhetők meg az ionoszonda adatsorokban, esetleg van-e különbség vagy hasonlóság a vihartípusok között. Nem találtunk szignifikáns különbséget a különböző műszerek adatsorai között. A koronaanyag-kidobódáshoz kötődő esemény esetében szélességfüggő elenktronsűrűség-változást figyeltünk meg a vihar főfázisában, amikor a rétegmagasság is meglehetősen növekedett volt a nyugodt napi értékekhez viszonyítva, amit a másik vihartípushoz kapcsolódó eseménynél pedig egyáltalán nem tapasztaltunk.

Berényi Kitti Alexandra, Barta Veronika
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
Ionoszféra Kutatócsoport

5.4 Meteorok észlelése és a plazmanyomok vizsgálata Digiszonda mérésekkel

A kutatócsoport a Digiszonda egy nem konvencionális felhasználását is tanulmányozta az évek során (Szárnya et al. 2024). A légkörbe belépő és ott eléggő meteorok egy ionizált nyomot hagynak hátra, ami megfelelő geometriai paraméterek mellett a Digiszonda számára is észlelhető (> 80 km magasság, $\sim 40^\circ$ vagy nagyobb magasság szög). A Digiszonda "űjszerű" funkciói (visszaverődés irányának meghatározása és plazmamozgás mérés) is tesztelésre kerültek - az iránymeghatározás 90%-ban megbízható, valamint a meteorok mozgó plazmanyoma alkalmanként jelentkezik a mozgásméréseken. A meteorok észlelését két tényező nehezíti - a műszer saját zajszűrése, ami kiszűrheti a plazmanyomok halvány jeleit, és ugyanezen tényező miatt, ha jelen vannak erős, markáns visszaverődések a meteorok elégséges magasságában (szporadikus E réteg). Az adatok elemzése azt mutatja, hogy a meteorok által okozott ionizáció korrelál a meteor sebességével és anti-korrelál a meteorok fényességével.

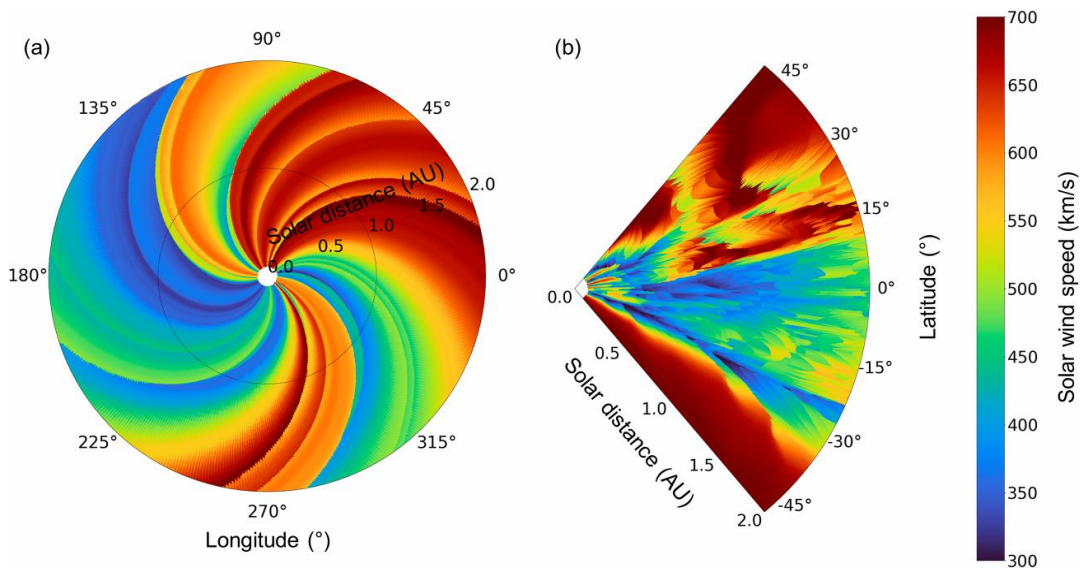
Szárnya Csilla, Barta Veronika
HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet
Ionoszféra Kutatócsoport

5.5 Az űridőjárás hatása az üstökös körüli ionokra

A Rosetta űrszonda mérései alapján vizsgáltuk a közepes energiájú ionok tulajdonságait a 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös magnetoszférájában, az üstökös körüli dinamikus napszélnyomás függvényében (Timár et al. 2024a). A közepes energiájú ionok periodikusan, a Rosetta által mért ionspektrumban voltak megfigyelhetők, 50 eV és 1000 eV közötti energiákon. Erős összefüggést találtunk a napszélnyomás mértéke és ezen ionok mennyisége között. Bár az ionok energiája is változik a napszélnyomás ingadozása miatt, azt is kimutattuk, hogy az ionenergiát más tényezők is befolyásolják, például az üstökös anyagkibocsátási rátája és az üstökösmagtól való távolság. Az észlelt erős összefüggéseket azzal magyaráztuk, hogy ezeknek az ionoknak a forrásfelülete a napszél nyomásának változásaira reagálva mozog ki és be.

Timár Anikó, Németh Zoltán
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

5.6 3D ballisztikus napszél extrapoláció



5. ábra. 3D ballisztikus napszél sebesség extrapoláció az ekliptika síkjában (a) és a 180°-os Carrington hosszúságon (b), 2017 januárjában

Kifejlesztettünk egy módszert, amellyel három-dimenzióban tudjuk extrapolálni a háttér napszelet a belső helioszférában (Timár et al. 2024b). A módszerünk egy sebességkorrekcióval ellátott ballisztikus extrapolációt alkalmaz, amelyhez napkoronamodellek szolgáltatják a bemeneti adatokat. A sebességkorrekció kezeli a napszélben haladó gyors és lassú plazmacsomagok közti kölcsönhatásokat, emellett pedig figyelembe vesszük a napkorona differenciális rotációját is, amellyel pontosabb eredményeket kapunk a merev rotációval végzett számításokhoz képest. A modellünk sokoldalúságának köszönhetően bármilyen bemeneti adatsorral használható, amely megadja a napszél sebességét a Nap teljes forrásfelületén, például a WSA vagy az AWSOM sebességtérképekkel (5. ábra).

Timár Anikó, Opitz Andrea, Németh Zoltán,
Bebesi Zsófia, Biró Nikolett, Facskó Gábor,
Kobán Gergely, Madár Ákos
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

5.7 Napszélben észlelt lökéshullámfrontok geometriai tanulmányozása

Két bolygóközi lökéshullámot tanulmányoztunk STEREO-A, B, ACE, Wind és Cluster mérésekkel (Lkhagvadorj et al. 2024, Lkhagvadorj 2023). A vizsgálat célja a lökéshullámok időbeli fejlődésének kimutatása volt. 40 millió km-es térbeli skálán nem sikerült jelentős változást kimutatni. A 2007. május 7-ei esemény egy fast-forward (FF) lökéshullám. Síknak tűnik és hajlik a Nap-Föld egyenes felé, hasonlóan a Parker-spirálhoz. Ez alapján a front vélhetően egy együttforgó kölcsönható nyaláb (co-rotating stream interactions, CIRs) régióban keletkezett. A CIR egy kisebb geomágneses vihart is kiváltott a Földön. A 2007. április 23-ai esemény torzult és a Parker spirálhoz képest jobban hajlik a Nap-Föld egyenesre. Ez is kiváltott egy kisebb G1 geomágneses vihart a Földön. Ennek a sokknak az eredete is egy CIR-hez köthető. Korábban nem végzett senki ilyen többszondás bolygóközi lökéshullám észlelést, ami alapján a bolygóközi lökéshullám 3D-s alakja meghatározható lett volna.

Hasonló vizsgálatokat szeretnénk végezni a Parker Solar Probe, a Solar Orbiter és a BepiColombo műszerei segítségével.

Munkhjargal Lkhagvadorj, Facskó Gábor,
Opitz Andrea, Kovács Péter
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

5.8 Űridőjárás előrejelzés

Szakmai tapasztalataink és ismereteink alapján összefoglaltuk egy magyar Űridőjárás előrejelző központ létesítésének feltételeit, amely a polgári védelem és a Magyar Honvédség számára nélkülözhetetlen információkkal szolgálhatna (Facskó et al. 2024).

Facskó Gábor, Kobán Gergely, Bíró Nikolett
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

5.9 Elektromos áramok tanulmányozása földi magnetoszférában

A négy-négy műholdból álló Cluster és az MMS misszió mágneses és plazma regisztrátumai segítségével vizsgáltuk a gyűrűáram, és a Chapman-Ferraro áramok előfordulásait és áramsűrűségeit a magnetoszférában (Tomasik 2024). Az áramok automatikus felismeréséhez a curlométer módszeren alapuló eljárást fejlesztettünk. A Cluster misszió 2002-es pályája mentén az eljárás segítségével 129 gyűrűáram áthaladást azonosítottunk, illetve határoztuk meg az ezekhez tartozó áramsűrűségeket. Elvégeztük a meghatározott áramsűrűségek validálását a plazma adatok, illetve a felszíni mágneses mérésekből számított Dst indexek felhasználásával. Az áramok meghatározásának pontosságát a műhold kvartettek konstellációja jelentősen befolyásolja, ennek kiküszöbölésére több, saját fejlesztésű módszerrel kísérleteztünk. Csoportunk témavezetésével egy MSc szakdolgozat született a témából, amelyet 2024-ben Agocs díjjal tüntettek ki.

Tomasik Máté, Kovács Péter, Tátrallyay Mariella
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály

5.10 Mágneses Nulltér Laboratórium

2023. szeptember 15-én hivatalosan is átadták a Wigner Fizikai Kutatóközpont és a soproni Földfizikai és Földtudományi Kutatóintézet együttműködésben, GINOP pályázati támogatással létesült Mágneses Nulltér Laboratóriumot, a fertőbozi Széchenyi István Geofizikai Observatóriumában. A laboratóriumban megindultak a kalibrálási, és műszertelepítési munkálatok, valamint folyamatosan térképezzük a zajforrásokat és megkíséreljük ezek kiszűrését. Cél a zero mágneses térhez legközelebbi és leghomogénebb mágneses körülmények megteremtése. A laboratórium hamarosan a mágneses műszerek fejlesztésének, anyagtudományi kísérletek elvégzésének, valamint élettani vizsgálatok kivitelezésének egyedülálló infrastruktúrájává válhat.

Bebesi Zsófia¹, Bíró Nikolett¹, Erdős Géza¹,
Kovács Péter¹, Lemperger István², Németh Zoltán¹
¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,
Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály,
²HUN-REN Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet

Hivatkozások

- Barta V, Bozóki T, Süle DP, Kouba D, Mielich J, Raita T, Buzás A** (2024): Ionospheric Absorption Variation Based on Ionosonde and Riometer Data and the NOAA D-RAP Model over Europe During Intense Solar Flares in September 2017. *Remote Sensing*, 16(21), 3975. doi: 10.3390/rs16213975.
- Békési E, van Wees J-D, Porkoláb K, Hencz M, Berkesi M** (2025): Modelling the thermal evolution of extensional basins through lithosphere stretching factors: application to the NW part of the Pannonian Basin. *Solid Earth*, 16, 45–61. doi: 10.5194/se-16-45-2025.
- Berényi KA, Perrone L, Sabbagh D, Scotto C, Ippolito A, Kis Á, Barta V** (2024): Ionosonde Measurement Comparison during an Interplanetary Coronal Mass Ejection (ICME)- and a Corotating Interaction Region (CIR)-Driven Geomagnetic Storm over Europe. *Universe*, 10, 344. doi: 10.3390/universe10090344.
- Buzás A, Kouba D, Mielich J, Burešová D, Mošna Z, Koucká Knížová P, Barta V** (2023): Investigating the effect of large solar flares on the ionosphere based on novel Digisonde data comparing three different methods. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 10, 1201625. doi: 10.3389/fspas.2023.1201625.
- Doglioni C, Ismail-Zadeh A, Panza G, Riguzzi F** (2011): Lithosphere-aesthenosphere viscosity contrast and decoupling. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 189(1-2), 1-8. doi: 10.1016/j.pepi.2011.09.006.
- Facsó G, Koban G, Biro N, Lkhagvadorj M** (2024): Space Weather Effects on Critical Infrastructure, in "Critical Infrastructure Protection in the Light of the Armed Conflicts - Selected Proceedings of the 4th International Conference on Central European Critical Infrastructure Protection, November 17-18, 2022. Budapest, Hungary", edited by T. Kovács and Z. Nyikes, *Advanced Sciences and Technologies for Security Applications*. doi: 10.1007/978-3-031-47990-8_5.
- Fodor C, Varga P, Sneeuw, N** (2024): Impact of tidal friction on the motion of lithospheric plates and earthquake activity. *Terra Nova*, 36(1), 8-14. doi: 10.1111/ter.12685.
- Haszpra L** (1999): Measurement of atmospheric carbon dioxide at a low elevation rural site in Central Europe. *Időjárás*, 103, 93-106.
- Haszpra L** (2024): Multi-decadal atmospheric carbon dioxide measurements in Hungary, central Europe. *Atmos. Meas. Tech.*, 17, 4629-4647. doi: 10.5194/amt-17-4629-2024.
- Haszpra T, Drótos G, Herein M, Topál D** (2024): A pillanatkép-megközelítés az éghajlatváltozás vizsgálatának szolgálatában – Légköri távkapcsolatok nyomában sokasági éghajlati szimulációkkal. *Légkör*, 69(3). doi: 10.56474/legkor.2024.3.1.
- Hencz M, Németh K, Spránitz T, Bíró T, Karátson D, Berkesi M** (2024): Evolution and polycyclic nature of a maar-diatreme volcano as constrained by changing external factors. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 453, 108158. doi: 10.1016/j.jvolgeores.2024.108158.
- Jin ZM, Green HW, Zhou Y** (1994): Melt topology in partially molten mantle peridotite during ductile deformation. *Nature*, 372(6502), 164-167. doi: 10.1038/372164a0.
- Lkhagvadorj M** (2023): Propagation of interplanetary shocks in the heliosphere. MSc thesis in Physics, Eötvös Loránd University, Budapest, Hungary. doi: 10.48550/arXiv.2307.03328.
- Lkhagvadorj M, Facsko G, Opitz A, Kovacs P, Sibeck DG** (2024): Propagation of Interplanetary Shocks in the Heliosphere. *Astrophysical Journal*, 980(1), 137. doi: 10.3847/1538-4357/ad9d12.
- Mosna Z, Barta V, Berényi KA, Mielich J, Verhulst T, Kouba D et al.** (2024): March and April 2023 ionospheric storms in the period of the Solar Cycle 25. *Frontiers in Astronomy and Space Sciences*, 11, 1462160. doi: 10.3389/fspas.2024.1462160.
- Nesi V, Bruno O, Zaccagnino D, Mascia C, Doglioni C** (2023): Tidal drag and westward drift of the lithosphere. *Geoscience Frontiers*, 101623. doi: 10.1016/j.gsf.2023.101623.
- Sátori G, Bozóki T, Williams E, Párcser E, Herein M, Albrecht RI, Beltran RP** (2024): How do Schumann resonance frequency changes in the vertical electric field component reflect global lightning dynamics at different time scales? *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 129, e2024JD041455. doi: 10.1029/2024JD041455.
- Szárnya Cs, Mošna Z, Igaz A, Kouba D, Verhulst TG, Koucká Knížová P et al.** (2024): Technical possibilities and limitations of the DPS-4D type of digisonde in individual meteor detections. *Remote Sensing*, 16(14), 2658. doi: 10.3390/rs16142658.
- Timar A, Nemeth Z, Burch JL** (2024a): The response of the cometary ionosphere to space weather forcing. *MNRAS*, 532, 2, 1402-1409. doi: 10.1093/mnras/stae1556.
- Timar A, Opitz A, Nemeth Z, Bebesi Zs, Biro N, Facsko G, Koban G, Madar A** (2024b): 3D pressure-corrected ballistic extrapolation of solar wind speed in the inner heliosphere. *JSWSC*, 14, 14. doi: 10.1051/swsc/2024010.
- Tomasik M** (2024): Elektromos áramok változásainak megfigyelése a földi magnetoszférában, műholdas mérések alapján (in Hungarian). Msc. Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem.
- Topál D, Herein M, Haszpra T** (2025): Northern Annular Mode. In B. Guan (Ed.), *Atmospheric oscillations* (pp. 203–219). Elsevier. doi: 10.1016/C2022-0-01304-0.
- Varga P, Fodor C** (2021): About the energy and age of the plate tectonics. *Terra nova*, 33(3), 332-338. doi: 10.1111/ter.12518.
- Varga P, Győri E, Fodor C, Timár G** (2023): An Attempt to Determine the Magnitudes and Epicenters of Significant Historical Earthquakes in the Pannonian Basin. *Seismological Society of America*, 94(3), 1715-1728. doi: 10.1785/0220220161.
- Vass B, Kadlecik Á, Vincze M** (2024): A Laboratory Model of the Large-Scale Atmospheric Circulation of Tidally Locked Exoplanets. *Atmosphere*, 15(8), 982. doi: 10.3390/atmos15080982.
- Zaccagnino D, Vespe F, Doglioni C** (2020): Tidal modulation of plate motions. *Earth-Science Reviews*, 205, 103179. doi: 10.1016/j.earscirev.2020.103179.