

Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Környezettudományi Doktori Iskola
Környezetfizika Program

Topál Dániel

**A sarkvidéki krioszféra és a közép-európai
hidroklíma nagyléptékű, légköri cirkuláció által
vezérelt változásai
- a paleoklíma bevonásával**

-doktori értekezés tézisei-

Témavezetők: Hatvani István Gábor Ph.D. habil. és Kern
Zoltán Ph.D.

Külső konzulens: Prof. Qinghua Ding (University of
California Santa Barbara)

Doktori Iskola vezetője: Prof. Turányi Tamás egyetemi tanár

Programvezető: Horváth Ákos, Ph.D. habil

Budapest, 2022

Tartalomjegyzék

Bevezetés	2
Anyag és Módszer	4
Eredmények	5
Köszönetnyilvánítás	8
Publikációk a disszertációhoz kapcsolódóan	9
Legfontosabb irodalmak jegyzéke	9

Bevezetés

Az antropogén tevékenység következtében évente körülbelül 1%-kal növekszik a CO₂ légköri koncentrációja, amely az éghajlati rendszer kényszerű változásait eredményezi. A nyári (június-július-augusztus, JJA) északi-sarkvidéki tengeri jég kiterjedésének és vastagságának drámai csökkenése, valamint a grönlandi jégtakaró (GrIS) 1990-es évek óta tartó felgyorsult olvadása a folyamatban lévő éghajlatváltozás ikonikus szimbólumává vált (IPCC, 2021). Míg a globális felszíni átlaghőmérséklet tekintetében a kényszerkomponens dominanciája nagy valószínűségű (Hawkins et al. 2020), a regionális változások tekintetében továbbra is nagy a bizonytalanság (Ding et al. 2014;2017;2019; Topál et al. 2022). Mindazonáltal a megfigyelt sarkvidéki felmelegedés jelentős – de még bizonytalan – része kétségtelenül az antropogén kényszer és a hozzá kapcsolódó pozitív visszacsatolásoknak tulajdonítható, amelyeket együttesen sarkvidéki felerősödésnek (Arctic amplification)

neveznek (Deser et al, 2010; Screen and Simmonds, 2010; Notz and Stroeve, 2016; Screen et al, 2018).

Korábbi kutatások rámutattak, hogy a nyári nagytérségi légköri cirkuláció közvetlenül hatást gyakorol az Arktisz felszíni viszonyaira, egy, a Grönland és a Jeges-óceán felett elhelyezkedő anticiklonális cirkulációs mintázat formájában (Ding et al, 2017;2019). A grönlandi jégtakaró (GrIS) olvadása a jelenlegi legnagyobb egyedüli hozzájáruló a globális tengerszint emelkedéshez (Hofer et al. 2020). A GrIS olvadását az antropogén kényszert jól közelítő modellszimulációk szépen visszaadják, azonban érdemi szimulált cirkulációs változások nélkül, miközben a megfigyelések alapján egyértelműen együtt jár a nagytérségi cirkuláció megváltozása a grönlandi jégtakaró olvadásával. Ez arra enged következtetni, hogy a háttérben álló fizikai folyamatok a modellekben és a valóságban eltérőek lehetnek (Hanna et al. 2020; Topál et al. 2022). Mindezek alapján az Arktikus felerősítést hajtó mechanizmusok még mindig jelentős bizonytalanságokkal terheltek (Goosse et al. 2018).

Célkitűzés

A disszertáció fő céljai közé tartozik az Északi-sarkvidék természetes és kényszerű változásainak jobb megértése, valamint a jelenleg elérhető modellszimulációk hibáinak felderítése. Ezek kulcsfontosságúak az északi-sarkvidéki tengeri jég, a globális tengerszint-emelkedés és a közép-európai csapadék projekciók bizonytalanságainak csökkentése érdekében.

Anyag és Módszer

Az alkalmazott módszerek:

- leíró statisztikák és „elemi” idősorelemzés az adatok áttekintése érdekében.
- főkomponens-elemzés; lineáris regresszióanalízis; Mann-Kendall teszt; maximum kovariancia analízis a meteorológiai mezők közötti kapcsolatok feltárására
- az északi-sarkvidéki/grönlandi áramfüggvény index bevezetése az északi-sarkvidéki/grönlandi felszíni viszonyok nagyléptékű légköri cirkulációs

változásokra való érzékenységének számszerűsítésére (Topál és mts. 2022).

- új metrika bevezetése a modellek légtöri cirkulációval szembeni érzékenységének és a jövőbeli jégmentes sarkvidéki előrejelzésekre gyakorolt hatásának korlátozására (Topál és Ding előkészületben).

Eredmények

1) Eredményeim arra utalnak, hogy egy részben belső változékonyságból eredő légtöri folyamat nemcsak az elmúlt évtizedekben járult hozzá jelentős mértékben az északi-sarki tengeri jég oladásához, hanem a jövőbeli kibocsátási forgatókönyvek esetén is.

(2) A modellérzékenységi problémák mintegy megkerülése érdekében, a „wind-nudging” szimulációk felhasználásával számszerűsítettem a nagytérségi légtöri cirkuláció által hajtott grönlandi jégtakaró (GrIS) oladását. A jég tömegének jelentős része, $-71,7 \text{ Gt év}^{-1}$ évtized⁻¹ (a teljes $-132,8 \text{ Gt év}^{-1}$ évtized⁻¹ oladásból) teljes jégtömegváltozásából, ami $\sim 0,2 \text{ mm év}^{-1}$ évtized⁻¹ tengersizint-emelkedés gyorsulásnak felel meg, a szél által

hajtott adiabatikus felmelegedéshez kapcsolódik 1990 és 2012 között, ami magában hordozza annak lehetőségét, hogy a légköri cirkuláció hasonló mértékben befolyásolja a tengerszint-emelkedés ütemét a következő évtizedekben is.

(3) Paleoklimatikus bizonyítékok megerősítik, hogy a GrIS olvadásának 1990 és 2012 közötti jelentős felgyorsulása és a tengerszint-emelkedés ütemének ehhez kapcsolódó gyorsulása az éghajlati rendszer természetes változékonyságának megnyilvánulása, amely évtizedes, alacsony frekvenciás trópusi tengerfelszínhőmérséklet-változékonyságból ered.

(4) A „wind-nudging” kísérletekből levont tanulságok vezettek a következő lépéshez, melyben ténylegesen értelmeztem a modellbizonytalanságokat a sarkvidéki ún. éghajlati érzékenység szempontjából. A szén-dioxid kényszerre adott globális átlaghőmérséklet-válasz elégtelennek tűnik az Északi-sarkvidék éghajlati érzékenységének skálázásához. A modellek kevésbé érzékenyek a légköri kényszerre, mint azt a megfigyelések

mutatják, ami túlzott sarkvidéki felmelegedést eredményezhet a szimulációkban ha a modellek kiértékelésének alapjául a globális átlaghőmérséklet CO₂ kényszerre adott válaszát vesszük skálaparaméterül.

(5) A modellezett és a megfigyelt sarkvidéki tengeri és szárazföldi jég légköri cirkulációra való érzékenysége közötti fő különbség az, hogy a modellek nem szimulálnak a megfigyelésekben látott alacsony frekvenciás változékonyságot a sarki szelek tekintetében. A globális felmelegedéssel párhuzamosan a trópusokon inkább horizontálisan egyenletes tengerfelszíni hőmérséklet emelkedést mutatnak, ami ellentétben áll a megfigyelésekben látott trópusi divergencia anomáliák által hajtott Rossby-hullámok kialakulásával.

(6) Ezt az eltérést figyelembe véve azt találtam, hogy az első várható jégmentes északi-sarkvidék nyár és a GrIS széleskörű olvadásának valószínűsége 9-15 évvel későbbre tolódik, 2050 utánra.

(7) Azokat a modelleket, amelyek Közép-Európában a legjobban teljesítenek az évtizedes hidroklíma-

változékonyság szimulálásában, jelenleg nem használják a regionális klímamodell (RCM) szimulációk meghajtására Kelet-Közép-Európában. Ez eredményeim szerint a jövőbeli hidroklima projekciók téves értelmezéséhez is vezethet térségünkben, különösen fontos, hogy a belső változékonyság által vezérelt változásokat tévesen kényszerű hidroklimatikus válasznak titulálva. A modellek közötti fizikai különbségek tehát fontos szerepet játszanak a jövőbeli nyári hidroklima bizonytalanságának szabályozásában, és óvatosságra intenek a legmodernebb SMILE-szimulációk jövőbeli nyári csapadék-előrejelzéseinek értelmezésekor.

Köszönetnyilvánítás

Hálával tartozom Hatvani István Gábor és Kern Zoltán témavezetőimnek, valamint Demény Attila professzor úrnak szakadatlan támogatásukért. Köszönöm Qinghua Ding-nek a számos tanácsát és, hogy bevezetett a nagytérségi éghajlatdinamika rejtelseibe. Továbbá köszönettel tartozom számos munkatársamnak, korábbi témavezetőimnek is, akik nagy mértékben formálták a gondolkodásom. Így, Haszpra Tímea, Herein Mátyás, Bódai Tamás, Thomas Ballinger, Edward Hanna, Xavier Fettweis és sokan mások.

Publikációk a disszertációhoz kapcsolódóan

TUDOMÁNYOS REFERÁLT FOLYÓIRATCIKKEK

Topál, D, Ding, Q, Ballinger, TJ et al. (2022) Discrepancies between observations and climate models of large-scale wind-driven Greenland melt influence sea-level rise projections. *Nat Commun* **13**, 6833 <https://doi.org/10.1038/s41467-022-34414-2>

Topál, D, Ding, Q, Mitchell, J, Baxter, I, Herein, M, Haszpra, T, Luo, R, Li, Q, (2020a). An Internal Atmospheric Process Determining Summertime Arctic Sea Ice Melting in the Next Three Decades: Lessons Learned from Five Large Ensembles and Multiple CMIP5 Climate Simulations, *J Clim*. **33**(17), 7431-7454. <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-19-0803.1>

Topál, D, Hatvani, IG, Kern, Z, (2020b) Refining projected multidecadal hydroclimate uncertainty in East-Central Europe using CMIP5 and single-model large ensemble simulations. *Theor Appl Climatol* **142**, 1147-1167. <https://doi.org/10.1007/s00704-020-03361-7>

Topál, D & Ding, Q (in prep) Constrained model sensitivity recalibrates projected Arctic climate change. in review in *Nat Clim Change*

Legfontosabb irodalmak jegyzéke

Deser, C, Tomas, R, Alexander, M, Lawrence, D (2010) The Seasonal Atmospheric Response to Projected Arctic Sea ice Loss in the Late Twenty-First Century. *J Clim*, **23**, 333-351. <https://doi.org/10.1175/2009JCL13053.1>

Ding, Q et al. (2017) Influence of high-latitude atmospheric circulation changes on summertime Arctic sea ice. *Nat Clim Chang* **7**, 289-295. <https://doi.org/10.1038/nclimate3241>

Ding, Q, Schweiger, A, L'Heureux, M et al. (2019) Fingerprints of internal drivers of Arctic sea ice loss in observations and model simulations. *Nat Geosci* **12**, 28-33. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0256-8>

Ding, Q, Wallace, JM, Battisti, DS et al (2014) Tropical forcing of the recent rapid Arctic warming in northeastern Canada and Greenland. *Nature* **509**, 209-212. <https://doi.org/10.1038/nature13260>

Goosse, H, Kay, JE, Armour, KC et al. (2018) Quantifying climate feedbacks in polar regions. *Nat Commun* **9**, 1919. <https://doi.org/10.1038/s41467-018-04173-0>

Hanna, E et al. (2020) Mass balance of the ice sheets and glaciers – progress since AR5 and challenges, *Earth Sci Reviews* **201**, 102976. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.102976>

Hawkins, E, Frame, D, Harrington, L et al. (2021) Observed emergence of the climate change signal: from the familiar to the unknown, *Geophys Res Lett* **47**(6) e2019GL086259, <https://doi.org/10.1029/2019GL086259>

Hofer, S et al. (2020) Greater Greenland Ice Sheet contribution to global sea level rise in CMIP6. *Nat. Commun.* **11**, 6289. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-20011-8>

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 2391 pp. doi:10.1017/9781009157896.

Notz, D, Stroeve, JC (2016) Observed Arctic sea-ice loss directly follows anthropogenic CO₂ emission. *Science*, **354**(6313), 747-750. DOI: 10.1126/science.aag2345

Screen, J.A., Deser, C., Smith, D.M. et al. (2018) Consistency and discrepancy in the atmospheric response to Arctic sea-ice loss across climate models. *Nature Geosci* **11**, 155–163. <https://doi.org/10.1038/s41561-018-0059-y>

Screen, JA & Simmonds, I (2010) The central role of diminishing sea ice in recent Arctic temperature amplification. *Nature* **464**, 1334–1337. <https://doi.org/10.1038/nature09051>