

A KÖZÉP-EURÓPAI ÉVTIZEDES HIDROKLÍMA-ELŐREJELZÉSEK BIZONYTALANSÁGAIRÓL

ON THE DECADAL HYDROCLIMATE PROJECTION UNCERTAINTIES IN CENTRAL-EUROPE

Topál Dániel¹, Hatvani István Gábor², Kern Zoltán³

¹PhD, topal.daniel@csfk.org

²PhD

³PhD

Eötvös Loránd Kutatási Hálózat Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Földtani és Geokémiai Intézet, Budapest

ÖSSZEFOGLALÁS

A globális klímamodellek (GCM) Kelet-Közép-Európára vonatkozó jövőbeli csapadék-előrejelzéseit jelentős bizonytalanságok terhelik. Cikkünkben két egymástól független tényezőt vizsgálunk: (i) a modellek eltérő fizikai felépítéséből adódó ún. modellbizonytalanságot és (ii) az éghajlati rendszer természetes változékonyságából adódó, eddig csak kevésbé figyelembe vett bizonytalanságot. Azon GCM-ek, amelyek realisztikusabban szimulálják a térségünk hosszú időszakot átfogó műszeres mérései alapján megállapított évtizedes hidroklima-változékonyságot, rendre mérsékelt csapadékcsökkenést jósolnak (kevésbé száraz nyarak, nedvesebb telek). Ennek háttérében a pontosabban szimulált felszín-légkör kölcsönhatások állhatnak. E modellek továbbá az éghajlat természetes változékonyságából adódó lehetséges kimeneteleken is túlmutató csapadékmérséklődést jeleznek, ami támogatja azon elképzelésünk helyességét, hogy a modellek közötti különbségek háttérében valós fizikai folyamatok állhatnak. Így ez a bizonytalanság csökkenthető a fizikai folyamatok jobb megértésével. Tanulmányunk a modellbizonytalanság és a természetes változékonyság egyidejű figyelembevételére hívja fel a figyelmet a regionális hidroklima-előrejelzések elemzése során, valamint ösztönözzük a regionális éghajlati modellekkel (RCM) készített sokasági szimulációk végzését és azok kiértékelését az alkalmazkodási stratégiákhoz készülő szakmai jelentések során.

ABSTRACT

Global climate models' (GCM) projections of future precipitation for East-Central Europe are subject to considerable uncertainties. In this paper, two independent factors are considered: (i) the so-called model uncertainty due to the different physical structure of the models and (ii) the uncertainty due to the natural variability of the climate system, which has not been thoroughly assessed so far. GCMs that more realistically simulate the decadal hydroclimate variability seen in our region from instrumental measurements covering a long time interval tend to project more moderate precipitation decline (less dry summers, wetter winters). This may

be due to more accurately simulated land-atmosphere interactions. These models also project more moderate precipitation changes that are beyond the possible outcomes from natural climate variability, supporting our idea that real physical processes may underlie the differences between the spread in model projections. Thus, this uncertainty can be reduced by improving our understanding of the underlying physical processes. Our study draws attention to the parallel consideration of model uncertainty and natural variability in the analysis of regional hydroclimate projections and encourages the execution of single-model large ensemble simulations with regional climate models (RCMs).

Kulcsszavak: csapadék, bizonytalanság, éghajlatváltozás

Keywords: precipitation, uncertainty, climate change

BEVEZETÉS

Az emberi tevékenység okozta éghajlati változások napjainkra már széles térbeli és időskálán mutathatóak ki (Sippel et al., 2020). A globális skálájú események mellett jelentős regionális szintű változásokat is megfigyelhetünk, különös tekintettel az éghajlati szempontból átmeneti zónában elhelyezkedő közép-európai térségben, ahol az időjárási szélsőségek gyakoriságának növekedését prognosztizálják a kutatók az elkövetkezendő évtizedekben (Seneviratne et al., 2006; Bartholy–Pongrácz, 2007). A globális éghajlati modellek hasznos eszközei a jövőben várható éghajlati változások előrejelzésének. Ezeket a prognózisokat alapvetően háromfajta bizonytalansági tényező árnyékolja be: scenárióbizonytalanság, modellbizonytalanság és a természetes változékonyság jelenlétéből adódó bizonytalanság (Stainforth et al., 2007; Knutti, 2008; Hawkins–Sutton, 2009).

A scenárióbizonytalanság fogalma az antropogén üvegházgáz-kibocsátás méréséklésének érdekében várható kormányzati döntések, valamint az ipari és a mezőgazdasági szektor átalakulásának jövőbeli kimeneteleit tömörítő, ún. éghajlati forgatókönyvek bizonytalanságát foglalja magában. A modellbizonytalanság a különböző felépítésű éghajlati modellekre utal, ez főként az ún. parametrizációs eltérésekre vezethető vissza (a modellezhető térbeli vagy időskála alatt lezajló fizikai jelenségek, például a felhőképződés mikrofizikája). Ez utóbbi bizonytalanság méréséklésére jöttek létre az ún. Coupled Model Intercomparison projektek (CMIP), amelyek során a különböző felépítésű modellek kimeneteleit hasonlíthatják össze (Knutti, 2008; Harrison et al., 2015). A harmadik bizonytalanság az éghajlati rendszer természetes vagy belső változékonysága, amelyet sokasági éghajlati szimulációk használatával térképezhetünk fel. A természetes változékonyságot Tél Tamás és szerzőtársai (2020) után „párhuzamos éghajlati realizációknak” is nevezhetjük, amely jól jellemzi az éghajlat azon tulajdonságát, miszerint a műszeres méréseink csupán lehetséges realizációi annak a statisztikai eloszlásnak, amely adott időpilla-

natban meghatározza az éghajlatot. A gyakorlatban ugyanazzal a modellel készült számos, egymástól csak kissé különböző kezdeti feltételből indított szimuláció feltérképezi a modellezett belső változékonyságot (ún. egymodell-sokaság; Deser et al., 2020). Ezek a futtatások rendkívül számításgigényesek, ezért sokáig az éghajlat önkényesen definiált normálperiódusára készített (például harminc év) időátlaggal helyettesítették a sokaság feletti statisztikákat. Mára azonban már egyértelmű, hogy ez a módszertan nem alkalmazható, amikor az éghajlat külső kényszerre (például az antropogén üvegházgáz-kényszer) történő változásainak matematikailag helyes leírására törekszünk (Tél et al., 2020).

Ebben a cikkben egy korábbi tanulmányunk (Topál et al., 2020) legfontosabb eredményeit foglaljuk össze. Ahhoz, hogy elkülöníthessük a modellbizonytalanságot a természetes változékonyság jövőre vonatkozó csapadék-előrejelzésekre gyakorolt hatásaitól, 32 CMIP5-modellt rangsoroltunk azon képességük alapján, hogy az évtizedes éghajlati változékonyságot milyen mértékben képesek valósághűen szimulálni. Ezek után összehasonlítottuk a hat egymodell-sokaság által reprezentált természetes csapadékváltozékonyságot az általunk rangsorolt modellek előrejelzéseivel. Ezzel a modellbizonytalanságot a természetes változékonyság kontextusába is helyeztük. A különböző éghajlati modellek közötti fizikai eltérések figyelembevétele és az egymodell-sokaságok együttes alkalmazása jelöli ki az utat a jövőben várható változások pontosabb megértése felé.

EREDMÉNYEK ÉS DISZKUSSZIÓ

Eredményeink (Topál et al., 2020) alapján három CMIP5 GCM (MRI-CGCM3, MRI-ESM1 és FGOALS-s2) került a legjobbnak ítélt modellek körébe, ezeket röviden „korlátozott” modellegyüttesnek neveztük. Különösen érdekelt bennünket, hogy vajon a „korlátozott” modellegyüttes jövőbeli hidroklima-előrejelzései kevésbé szórnak-e Kelet-Közép-Európa területén. A három legjobb helyre rangsorolt modell egyöntetűen mérsékeltebb nyári szárazodást és csapadékosabb téli viszonyokat jelez a felszíni hőmérséklet jelentős emelkedésével egyidejűleg az elkövetkező évtizedekben. A nyári csapadékmennyiség évtizedenkénti $-0,7$ és $+1\%$, a téli csapadék $+1$ és $+5\%$ közti változását jelzik Kelet-Közép-Európára az 1971–2000 közötti időszakhoz képest (1. ábra). Fontos, hogy ezek ellentmondanak a korábbi várakozásoknak, amelyek jóval markánsabb nyári szárazságot vetítenek előre a közép-európai régióban (Polade et al., 2015; Pflieger et al., 2019). Mielőtt mélyebben foglalkozunk ezzel az ellentmondással, röviden tekintsük át a prognosztizált szárazodás fizikai mechanizmusait.

A szubtrópusi (és részben a mediterrán) térségben várt nyári csapadékcsökkenés egyik okának a légköri vertikális hőmérséklet-gradiensnek (a hőmérséklet-csökkenés mértéke a magassággal) a globális felmelegedéssel párhuzamosan

bekövetkező átalakulását tartják (Brogli et al., 2019). Egy másik mechanizmus a nagytérségi légköri cirkulációs rezsimek változásaira vezethető vissza. A klíma-modellek egyetértenek a Hadley-cella leszálló ágának az antropogén kényszerre adott válaszként bekövetkező eltolódásával a pólus irányába. Ez szintén azt sugallja, hogy a fokozott sugárzási kényszer a régió jövőbeli hidroklímáját szárazodással sújtja (Perez et al., 2014; Mann et al., 2018). Azonban nincs összhang a hidroklíma régióinkban várható változásairól mindezen ismert fizikai folyamat ellenére sem (Taylor et al., 2012; Kröner et al., 2017). Ezeken túl a friss tanulmányok főként a felszín-légkör kölcsönhatások döntő szerepét hangsúlyozzák, jelezve, hogy még mielőtt regionális éghajlati modellek alapján értékelnénk a regionális modellek előrejelzéseit, az azokat meghajtó globális modellek fizikája is pontosításra szorulhat (Boberg–Christensen, 2012; Taylor et al., 2012; Vogel et al., 2018; Selten et al., 2020).

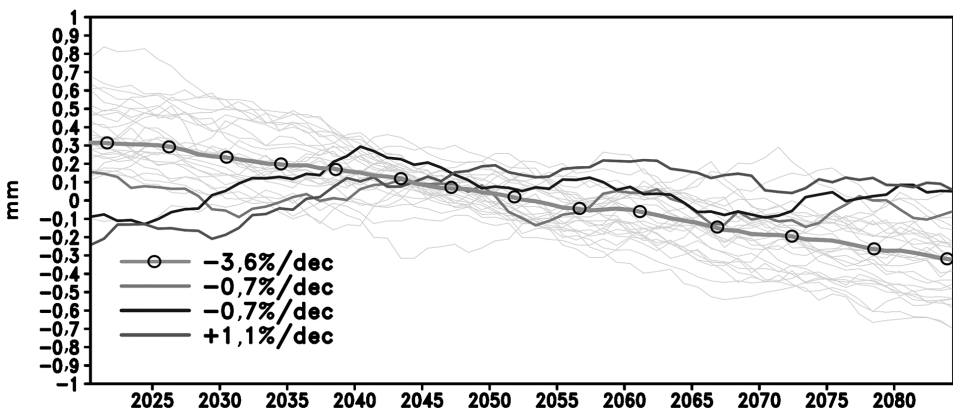
Ami az általunk kapott eredményeket illeti, a Topál Dániel és szerzőtársai (2020) által kiválasztott GCM-ek azon CMIP5-modellek csoportjába tartoznak, amelyek Martha M. Vogel és szerzőtársai (2018) szerint a felszín-légkör kölcsönhatásokat realizistikusabban szimulálják a többi CMIP5-modellhez képest, valamint amelyek kevésbé intenzív nyári szárazodást vetítenek előre. Egy korai tanulmányában Dai (2006) kimutatta, hogy az MRI-CGCM3 egy korábbi változata (az MRI-CGCM 2.3.2a verziója) jobban szimulálta a megfigyelt globális csapadékmintázatokat, mint más modellek, ami azt jelzi, hogy a modell fizikájában gyökerező néhány alapvető jellemző (valószínűleg a konvektív és a melegfronti csapadékparametrizációs sémák) valóban okozhat eltéréseket a modellek előrejelzései között. Mindezek megerősítik azt az elképzelésünket, hogy a különböző CMIP5-modellek jövőbeli hidroklíma-előrejelzéseit a múltra vonatkozó prediktív képességeik értékelése alapján rangsoroljuk.

Beláttuk, hogy a felszín-légkör kölcsönhatások és a különböző csapadékparametrizációs sémák kulcsfontosságúak lehetnek a CMIP5-modellek régióinkra vonatkozó hidroklíma-projekciói között látott eltérések megmagyarázásában, valamint, hogy egyes modellek megbízhatóbbak is lehetnek, mint mások. Ezzel a „modelldemokrácia” (Knutti, 2010) megkérdőjelezhetőségét is támogatjuk.

Most tekintsük át az egyedüli modellsokaságok vizsgálatunkba való bevonásának előnyeit. Ilyen módon ugyanis egyértelműen elkülöníthetjük az üvegházhatású gázok kibocsátása által hajtott (a sokaságátlag), valamint a természetes változékonyság következtében szimulált (sokasági tagok közti szórás) hidroklíma-változásokat. Ezzel pedig az általunk kiválasztott CMIP5-modelleket a belső változékonyság kontextusába is helyezhetjük. A sokaságátlag-alapú csapadékprojekciók egyértelmű szárazodást mutatnak a régióinkban a nyári negyedévre vonatkozóan: az 1971–2000 közötti időszakhoz képest -2% /évtized és -7% /évtized közötti csapadékváltozást (2. ábra). A hat (különböző fizikájú modellel készített) egymodell-sokaság egyenkénti sokaságátlagai azonban jelentősen szórnak, ami

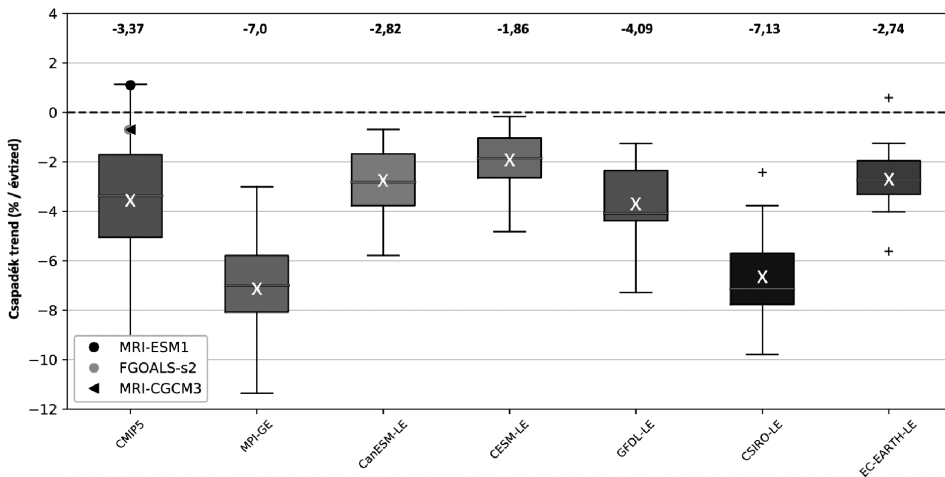
szintén a modellbizonytalanság szerepét hangsúlyozza. Mindinkább beszédes, hogy az általunk megbízhatóbbnak vélt három modell által a jövőre (2021–2085) vonatkozó nyári csapadékváltozás (átlagosan $-0,1\%$ évtizedenként) kilóg a hat egymodell-sokaság összes tagja által szimulált csapadékváltozás-tartományból (-8% és -1% évtizedenként) (2. ábra). Az összesen 256 sokasági szimuláció és az általunk jónak rangsorolt három CMIP5-modell által lefedett jövőbeli csapadéktrendek közötti különbség a 99%-os szignifikanciaszinten is szignifikáns. Ez megerősíti, hogy a megfigyelések alapján legjobbnak rangsorolt három modell valóban fizikai parametrizációk miatt különbözhet a többitől, ezáltal pedig reálisabb előrejelzéseket kaphatunk velük (Topál et al., 2020).

Hangsúlyozzuk, hogy annak eldöntése, hogy a modellek közötti különbségek valós fizikai okokra vezethetők-e vissza, vagy pedig csupán a természetes változékonyságnak tudhatók be, kizárólag sokasági éghajlati szimulációk elemzésével dönthető el. Ez azt is jelenti, hogy még akkor is érdemes globális klímamodellek alapján készült sokasági szimulációkat bevonni a jövőbeli hidroklima-változásokkal foglalkozó tanulmányokba, ha azok kisebb felbontásúak, mint a regionális klímamodellek. A nagyobb elérhető felbontás ugyanis csak az általunk érdekelt mechanizmusok szempontjából megbízható modellfizika tükrében jelent valós előnyt. Tanulmányunk szerint a legfontosabb előrejelzési bizonytalanságok nem a modell térbeli felbontásához kapcsolódnak, hanem részben a természetes változékonysághoz és a modellek közötti fizikai különbözőségekhez.



1. ábra. Standardizált (az 1971–2010 időszakra, mm-ben) nyári (június–július–augusztus) átlagoscsapadék-idősorok az északi szélesség 43° és 50° közötti és a keleti hosszúság 13° és $19,5^\circ$ közötti területre átlagolva a CMIP5-klímamodell-sokaságból (a körökkel jelzett szürke vonallal az átlag és vékony háttérbeli vonalakkal az egyes modellek), a három legjobban „teljesítő” modell vastagabb vonallal kiemelve. Az ábrafeliraton a teljes időszakra (2021–2085) számolt lineáris csapadéktrend látható $\%/évtized$ ($\%/dec$) mértékegységben.

(URL1, International CC BY 4.0 licenc alapján)



2. ábra. Box- és whiskers diagramon ábrázolt nyári átlagos csapadéktrendek a 2021–2085 időszakra vonatkozóan az x tengely alatt jelzett modellsokaságok minden egyes sokaságtagjában.

A vízszintes vonal a boxdiagramok felett számmal is látható mediánt, a fehér „X” az átlagot jelöli az egyes sokaságokban. A területi átlag az északi szélesség 43° és 50° közötti és a keleti hosszúság 13° és 19,5° közötti területre készült. A három legjobban „teljesítő” CMIP5-modell külön kiemelten is szerepel az első boxdiagramon az ábrafeliraton jelzett szimbólumokkal.

(URL1, International CC BY 4.0 licenc alapján)

ÖSSZEFOGLALÁS

Bemutatott eredményeink szorgalmazzák a jelenleg a régiókban használt regionális klímamodellek felszín-légkör visszacsatolási folyamatainak kiértékelését, hiszen az elérhető nagyobb felbontással a parametrizációk helyessége felértékelődhet. Továbbá hangsúlyozzuk a korábban feltételezettnél kevésbé száraz nyári körülmények lehetőségét a következő évtizedekben, és annak tényét, hogy a közelmúltban tapasztalt szélsőséges aszályos időszakok egyelőre nem tekinthetők kizárólag az antropogén kibocsátás következményének. Az antropogén kibocsátásból származó csapadékváltozások a természetes változékonysághoz viszonyított relatív szerepének pontosabb becsléséhez a természetes változékonyság jelenleginél pontosabb figyelembevételére, regionális éghajlati modellekkel készített sokasági szimulációkra lenne szükség. Véleményünk szerint ezek elengedhetetlen részei kell hogy legyenek az alkalmazkodási stratégiákra készített szakmai jelentéseknek.

IRODALOM

- Bartholy Judit – Pongrácz Rita (2007): Regional Analysis of Extreme Temperature and Precipitation Indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. *Global and Planetary Change*, 57, 1–2, 83–95. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2006.11.002, <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0921818106002785?via%3Dihub>
- Boberg, Fredrik – Christensen, Jens H. (2012): Overestimation of Mediterranean Summer Temperature Projections Due to Model Deficiencies. *Nature Climate Change*, 2, 6, 433–436. DOI: 10.1038/nclimate1454
- Brogli, Roman – Kröner, Nico – Sørland, Silje Lund et al. (2019): The Role of Hadley Circulation and Lapse-Rate Changes for the Future European Summer Climate. *Journal of Climate*, 32, 2, 385–404. DOI: 10.1175/JCLI-D-18-0431.1, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/32/2/jcli-d-18-0431.1.xml>
- Dai, Aiguo (2006) Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *Journal of Climate*, 19, 18, 4605–4630. DOI: 10.1175/JCLI3884.1, <https://journals.ametsoc.org/view/journals/clim/19/18/jcli3884.1.xml>
- Deser, Clara – Lehner, Flavio – Rodgers, Keith B. et al. (2020): Insights from Earth System Model Initial-Condition Large Ensembles and Future Prospects. *Nature Climate Change*, 10, 277–286. DOI: 10.1038/s41558-020-0731-2, <https://escholarship.org/uc/item/0rw1qlcj>
- Harrison, Sandy P. – Bartlein, Patrick J. – Izumi, Kenji et al. (2015): Evaluation of CMIP5 Palaeo-Simulations to Improve Climate Projections. *Nature Climate Change*, 5, 735–743. DOI: 10.1038/nclimate2649, <https://centaur.reading.ac.uk/49003/>
- Hawkins, Ed – Sutton, Rowan (2009): The Potential to Narrow Uncertainty in Regional Climate Predictions. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 90, 8, 1095–1108. DOI: 10.1175/2009BAMS2607.1, https://journals.ametsoc.org/view/journals/bams/90/8/2009bams2607_1.xml?tab_body=pdf
- Knutti, Reto (2008): Should We Believe Model Predictions of Future Climate Change? *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 366, 4647–4664 DOI: 10.1098/rsta.2008.0169
- Knutti, Reto (2010): The End of Model Democracy? *Climate Change*, 102, 395–404. DOI: 10.1007/s10584-010-9800-2, <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/23411>
- Kröner, Nico – Kotlarski, Sven – Fischer, Erich et al. (2017): Separating Climate Change Signals into Thermodynamic, Lapse-Rate and Circulation Effects: Theory and Application to the European Summer Climate. *Climate Dynamics*, 48, 3425–3440. DOI: 10.1007/s00382-016-3276-3, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-016-3276-3>
- Mann, Michael E. et al. (2018): Projected changes in persistent extreme summer weather events: the role of quasi-resonant amplification. *Science Advances*, 4, 10, eaat3272. DOI: 10.1126/sciadv.aat3272, <https://www.science.org/doi/full/10.1126/sciadv.aat3272>
- Perez, Jorge – Menendez, Melisa – Mendez, Fernando J. et al. (2014): Evaluating the Performance of CMIP3 and CMIP5 Global Climate Models over the North-East Atlantic Region. *Climate Dynamics*, 43, 2663–2680. DOI: 10.1007/s00382-014-2078-8
- Pfleiderer, Peter – Schleussner, Carl-Friedrich – Kornhuber, Kai et al. (2019): Summer Weather Becomes More Persistent in a 2 °C World. *Nature Climate Change*, 9 666–671, DOI: 10.1038/s41558-019-0555-0, https://research.vu.nl/ws/files/118939110/Summer_weather_becomes_more_persistent_in_a_2_C_world.pdf
- Polade, Suraj D. – Pierce, David W. – Cayan, Daniel R. et al. (2015): The Key Role of Dry Days in Changing Regional Climate and Precipitation Regimes. *Scientific Reports*, 13, 4, 4364. DOI: 10.1038/srep04364, <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24621567/>

- Selten, Frank M. – Bintanja, Richard – Vautard, Robert et al. (2020): Future Continental Summer Warming Constrained by the Present-Day Seasonal Cycle of Surface Hydrology. *Scientific Reports*, 10, 4721. DOI: 10.1038/s41598-020-61721-9, <https://www.nature.com/articles/s41598-020-61721-9>
- Seneviratne, Sonia I. – Lüthi, Daniel – Litschi, Michael et al. (2006): Land–Atmosphere Coupling and Climate Change in Europe. *Nature*, 443, 205–209. DOI: 10.1038/nature05095
- Sippel, Sebastian – Meinshausen, Nicolai – Fischer, Erich M. et al. (2020): Climate Change Now Detectable from Any Single Day of Weather at Global Scale. *Nature Climate Change*, 10, 35–41. DOI: 10.1038/s41558-019-0666-7, <https://tinyurl.com/5hd7evvk>
- Stainforth, D. A. – Allen, M. R. – Tredger, E. R. et al. (2007): Confidence, Uncertainty and Decision-Support Relevance in Climate Predictions. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 365, 1857, 2145–2161. DOI: 10.1098/rsta.2007.2074
- Taylor, Christopher M. – de Jeu, Richard A. M. – Guichard, Françoise et al. (2012): Afternoon Rain More Likely over Drier Soils. *Nature*, 489, 423–426. DOI: 10.1038/nature11377, <https://nora.nerc.ac.uk/id/eprint/19573/1/N019573.pdf>
- Tél Tamás – Bódai Tamás – Drótos Gábor et al. (2020): The Theory of Parallel Climate Realizations. *Journal of Statistical Physics*, 179, 1496–1530. DOI: 10.1007/s10955-019-02445-7, <https://tinyurl.com/yz4kfn8j>
- Topál Dániel – Hatvani István Gábor – Kern Zoltán (2020): Refining Projected Multidecadal Hydroclimate Uncertainty in East-Central Europe Using CMIP5 and Single-Model Large Ensemble Simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1147–1167. DOI: 10.1007/s00704-020-03361-7, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-020-03361-7>
- Vogel, Martha M. – Zscheischler, Jakob – Seneviratne, Sonia I. (2018): Varying Soil Moisture–Atmosphere Feedbacks Explain Divergent Temperature Extremes and Precipitation Projections in Central Europe. *Earth System Dynamics*, 9, 1107–1125. DOI: 10.5194/esd-9-1107-2018, <https://esd.copernicus.org/articles/9/1107/2018/>
- URL1: Topál Dániel – Hatvani István Gábor – Kern Zoltán (2020): Refining Projected Multidecadal Hydroclimate Uncertainty in East-Central Europe Using CMIP5 and Single-Model Large Ensemble Simulations. *Theoretical and Applied Climatology*, 142, 1147–1167. DOI: 10.1007/s00704-020-03361-7, <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-020-03361-7>