

A 2017/18-AS TELET LEZÁRÓ HIDEG IDŐSZAK ELEMZÉSE SZTRATOSZFÉRA–TROPOSZFÉRA KÖLCSÖNHATÁSOK ÉS TRÓPUSI–MÉRSÉKELT ÖVEZETI TÁVKAPCSOLATOK SEGÍTSÉGÉVEL

ANALYSIS OF THE 2017/18 LATE WINTER COLD SPELL BY STRATOSPHERE– TROPOSPHERE COUPLING AND TROPICAL–EXTRATROPICAL TELECONNECTIONS

Grasics Péter

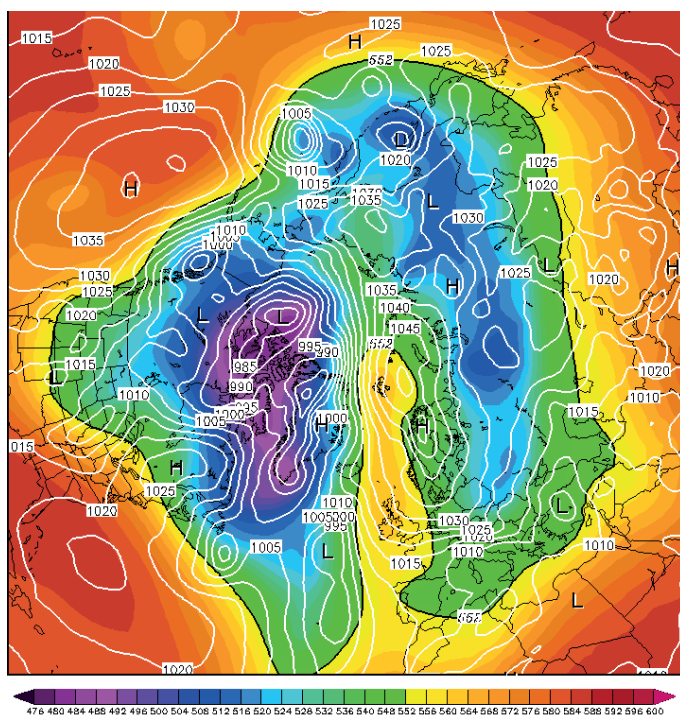
Mercatura Bt., 1055 Budapest, Nagy Ignác utca 14., gepetil@gmail.com

Összefoglaló: Ez az írás a 2017/18-as tél végi európai hideghullám kialakulásának okait elemzi. A sztratoszférában és a trópusokon néhány héttel korábban megfigyelhető légköri folyamatok távkapcsolati hatásai segíthették a zord időjárás kialakulását. Azonban amíg a sztratoszféra légáramlásának megváltozása kimutathatóan elősegítette a hideg levegő betörését a kontinensre, a trópusi területek időjárásának hatása csak áttételesen lehetett jelen. Az átlagosnál hidegebb időjárás a numerikus időjárás-előrejelző modellek segítségével két–három héttel a bekövetkezése előtt prognosztizálható volt.

Abstract: The reasons of the 2017/18 late winter European cold wave is analyzed in this paper. This cold weather pattern was driven by atmospheric teleconnections. Firstly, a coupling between the stratosphere and the troposphere certainly supported the cold air outbreak. Secondly, tropical–extratropical interactions could also influenced the weather in Europe. The anomalous cold weather was predictable two–three weeks ahead by numerical weather prediction models.

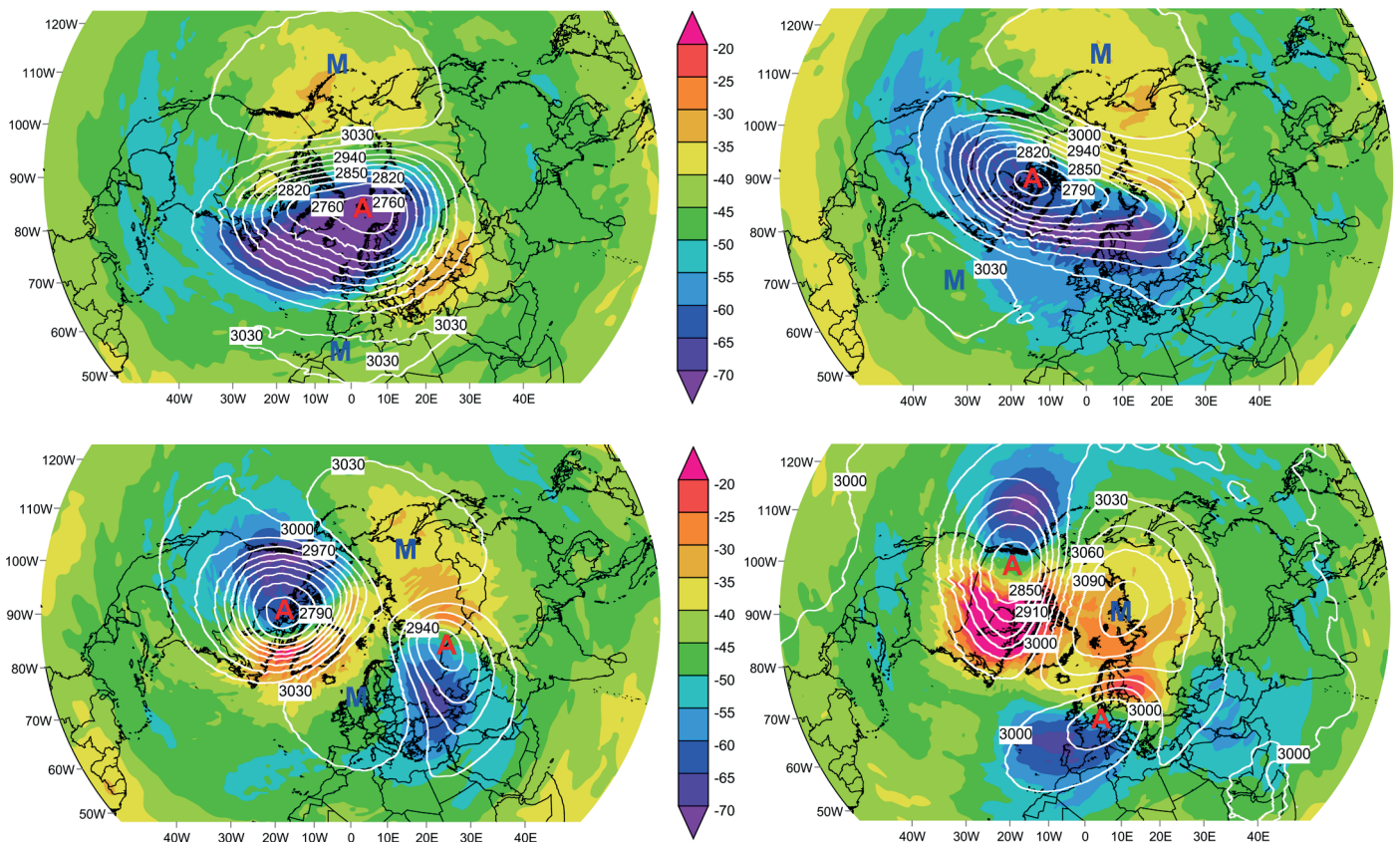
Bevezetés. 2018. február végén szibériai eredetű hideg levegő árasztotta el Európát. Az átlagosnál enyhébb tél zord február végével és március elejével zárult a kontinens nagy részén. Hazánkban ezekben a napokban a középhőmérséklet 10–12 fokkal elmaradt a sokévi átlagtól, a téli félév leghidegebb hőmérsékletét (–24,6 fok) pedig a március 1-jére virradó éjszakán mérték (OMSZ adat). A makroszinoptikus helyzetet egy, a poláris területeken

(Skandinávia, Barents-tenger, Szibéria északi része) kialakuló hatalmas anticiklon jellemezte, melynek déli peremén érkezett a fagyos levegő a kontinensre (1. ábra). A nagytérségű időjárási helyzet kialakításában szerep jutott a sztratoszféra és a troposzféra kölcsönhatásának, illetve a trópusi területek–magasabb szélességek közti távkapcsolati összefüggéseknek. Érdekes megvizsgálni, hogyan hatottak ezek a kölcsönhatások az északi féltekére, azon belül is az atlanti és eurázsiai területek légnyomási mezejére, illetve az ezekben a térségekben jelenlévő makrocirkulációs rendszerekre. Két rendszert érdemes kiemelni, az Arktikus Oszcillációt és az Észak-Atlanti Oszcillációt (Arctic Oscillation, AO¹ és North Atlantic Oscillation, NAO). Mindkettő a légnyomás ill. a különböző izobárszintek geopotenciális magassági mezejében jelentkező oszcillációs jelenség, előbbi az egész északi féltekén érezteti hatását, utóbbi inkább az euroatlanti térségben. Két fázissal (pozitív és negatív) rendelkeznek. Az AO pozitív (negatív) fázisában az arktikus területeken a szokásosnál alacsonyabb (magasabb) a légnyomás, a mérsékelt övezetben pedig magasabb (alacsonyabb). A NAO pozitív (negatív) fázisában Izland térségében a szokásosnál erősebb (gyengébb) a ciklontevékenység, az Azori szigetek és az Ibériai-félsziget térségében a megszokottnál erősebb (gyengébb) anticiklon található. Az oszcillációt jellemző AO indexet leggyakrabban az 1000 hPa-os, a NAO indexet pedig az 500 hPa-os nyomásszintre számítják ki (Tabi, 2010; Grasics, 2017). A következőkben bemutatom a sztratoszférában és a trópusokon lezajlott légköri folyamatokat, és kitérek arra is, hogyan befolyásolták ezek az AO és a NAO viselkedését.



1. ábra: Tengerszinti légnyomás (izobárok, hPa) és az 500 hPa-os szint magassága (színes izohipszák, gpm) 2018.02. 25. 0 UTC-kor (forrás: Wetterzentrale)

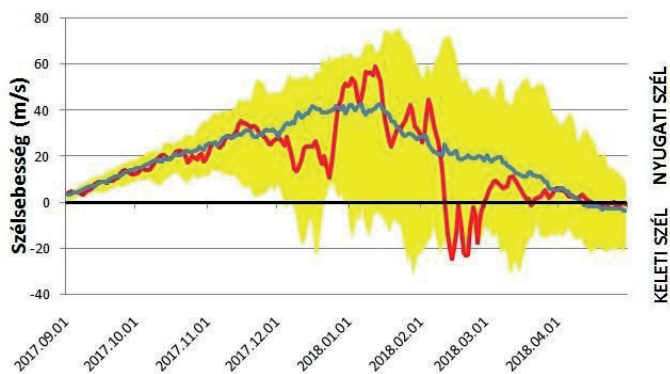
¹ Az Arktikus Oszcillációt az angol szakirodalomban gyakran Northern Annular Mode (NAM) néven említik.



2. ábra: A 10 hPa-os izobárszint magassága (izohipszák, 30 gpm értékkel ábrázolva) és hőmérséklete (színezés, °C) 2018 február a) 3-án, b) 7-én, c.) 11-én, d) 15-én 0 UTC időpontban az ERA5 reanalízis alapján (forrás:ECMWF/Copernicus)

Sztratoszféra–troposzféra kölcsönhatások. A sztratoszféra és a troposzféra cirkulációs állapota időnként szoros kölcsönhatásban áll, a téli félévben jelen lévő sztratoszférikus poláris örvény erősségében bekövetkező változások hatására. A sztratoszférikus poláris örvény a pólus körüli területeket körbeölelő, igen erős nyugat-keleti áramlású zónával szegélyezett alacsony nyomású képződmény, melynek határa általában a 60. szélességi kör térségében húzódik. Vertikálisan pedig átfogja szinte a teljes sztratoszférát. (Grasics, 2017). Az örvényben tapasztalható szélereőség és szélirány megváltozásának legdrámaibb formái a gyors sztratoszférikus felmelegedési események

(Sudden Stratospheric Warming, SSW), melyek a troposzfé-rából felfelé haladó, az örvény lassulását okozó planetáris hullámoknak köszönhetően alakulnak ki. Az SSW események során a légkörzésben kialakuló változások hajlamosak lefelé, a felszín irányába terjedni (Marshall és Scaife, 2010). 2018. február közepén egy markáns SSW esemény zajlott le, egyes területeken kevesebb, mint egy hét leforgása alatt 50 fokot emelkedett a hőmérséklet a 10 hPa-os izobárszinten, kb. 30 km-es magasságban. A folyamatot a sztratoszféra örvényének legyengülése és kettészakadása kísérte, ami a poláris sztratoszférában a geopotenciális magasság értékek megemelkedésével, és anticiklonális cirkuláció kialakulásával járt. (2. ábra). Ennek hatására a téli félévben normálisan fennálló pólus körüli nyugatias áramlás nagy területeken keletiesre fordult a sztratoszférában.



3. ábra: Zonális szélkomponens átlagos nagysága az é.s. 60°-a mentén, a 10 hPa-os szinten. Sárga terület és kék görbe: sokévi adattartomány és átlag (1978–2018); piros görbe: 2017/18-as értékek (NASA adatok alapján)

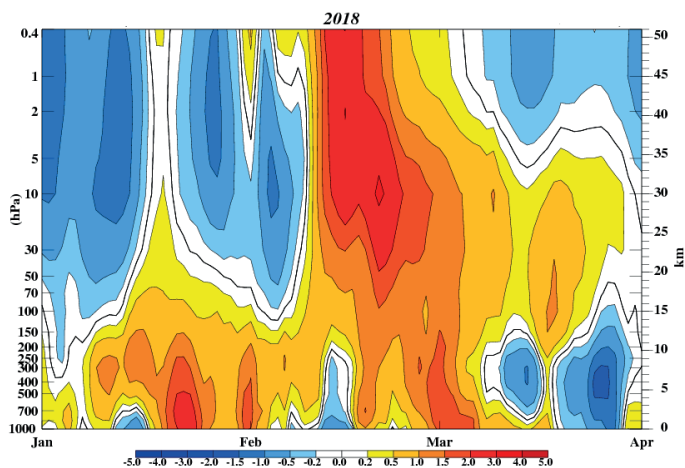
A poláris örvény szélviszonyait leggyakrabban a 10 hPa-os szinten, a 60. szélességi kör menti zonális szélkomponens átlagos nagyságával jellemezzük. A pár nap alatt lezajlott szélfordulás nyugatiból (pozitív értékek) keletibe (negatív értékek) a 2017–18-as tél szél idősorában is jól megfigyelhető (3. ábra). Ha ez a fajta átlagos zonális szélfordulás a téli hónapokban következik be, akkor heves ill. jelentős (angolul major) SSW eseményről beszélünk, (Butler et al., 2017). 2018 februárjában több napon keresztül az eddig megfigyelt legerősebb keleti áramlást regisztrálták az adott napok múltbeli adataihoz képest (3. ábra). A poláris örvény szétszakadásának egyik következménye a sztratoszférában módosuló áramlási viszonyok és a geopotenciál mező anomáliáinak lefelé terjedése (Limpasuvan et al., 2004).

Ezért az izobárszintek geopotenciális magasságának megnövekedése lefelé terjedve elérheti a troposzférát is, innentől kezdve pedig már jelentős hatást gyakorolhat a felszíni időjárási folyamatokra. Az egyes izobárszintek geopotenciális magasságának anomáliái a poláris térségek felett (a 65. szélességi foktól északra) átlagolva is megadhatóak (Baldwin és Thompson, 2009; Garfinkel et al., 2012). Az anomáliák időbeli fejlődése is ábrázolható, például a 4. ábrán látható módon. Amint azt az ábráról is leolvashatjuk, az egész sztratoszférában február közepén hirtelen bekövetkezett a nyomásszintek megemelkedése (piros színezés), majd a troposzférában lefelé haladva hozzávetőlegesen másfél hét alatt elérte a felszín közeli légrétegeket is a folyamat. Ebben az időszakban alakult ki a magas szélességeken a már említett markáns nyomási gerinc illetve anticiklon. A kialakult felszíni légnyomási elrendeződés (magas szélességeken anticiklonok, pozitív légnyomási anomáliával, a ciklonpályák dél felé tolódása) megfelel az Arktikus Oszcilláció negatív fázisának. Ennek megfelelően február végétől az AO index erősen negatív értékeket vett fel (6. ábra). Érdeemes megjegyezni, hogy a 4. ábrán bemutatott poláris geopotenciális magassági anomáliákból egy-egy nyomási szinten következtethetünk arra, hogy az adott magassági tartományban milyen fázisban van az AO (Baldwin és Thompson, 2009). A piros (kék) színnel megjelenő pozitív (negatív) anomáliák az adott szinten negatív (pozitív) fázisú AO-t jelentenek. Vagyis azt is mondhatjuk, hogy a sztratoszférában kialakuló erős negatív AO fázis kiterjedt a felszín irányába is.

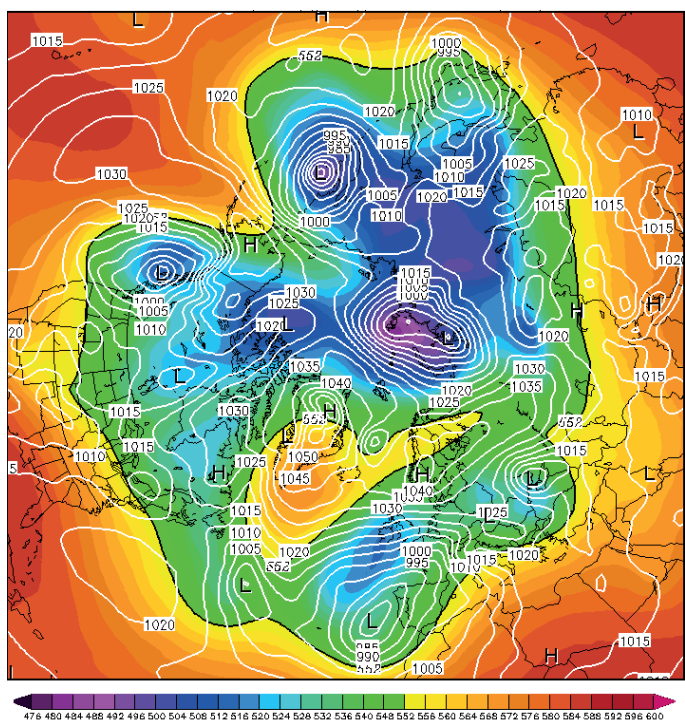
Az anticiklon, melynek déli peremén Európa felett nagy területen fordult keletiesre az áramlás a talaj közelében, március elejére középpontjával nyugat felé mozdult el. Ezáltal pozitív légnyomási anomália alakult ki Izland, illetve Grönland térségében is, a ciklonok az óceánon ettől délre vonultak el (5. ábra). Ez az Észak-Atlanti Oszcilláció negatív fázisának megfelelő nyomási elrendeződés. Néhány nappal az AO után tehát a NAO index is negatív tartományba került (6. ábra).

Trópusi távkapcsolat: Madden–Julian Oszcilláció (MJO). Az MJO egy 30–60 napos ciklikus változás a trópusi légkörben, legerősebben az Indiai-, és a Csendes-óceán egyenlítői vidékén jelentkezik. Egy konvektív aktív csapadékos zónából, és egy szárazabb területből áll. Ezek egymást követve keleti irányba mozognak. Az alsó légkörben (850 hPa) a konvektív zóna (konvergens terület) előtt a szokásosnál erősebb keleti áramlás az uralkodó, mögötte pedig gyengébb vagy akár nyugatias a szél. A felső troposzférában (200 hPa) ellentétes az áramlás a divergenca miatt. A csapadékos területen a hideg Cumulonimbus felhőtövek miatt a szokásosnál kisebb a kimenő hosszuhullámú sugárzás (Zhang, 2005). Az oszcilláció erősségét, mozgását fázisdiagramon szokás megadni, leggyakrabban a Wheeler és Hendon-féle Real-Time Multivariate MJO (RMM) index (Wheeler és Hendon, 2004) alapján. Az indexet a 200 és 850 hPa-os zonális szélkomponens és a kimenő sugárzás értékeiből számítják, az Egyenlítő menti területekre kiátlagolva.

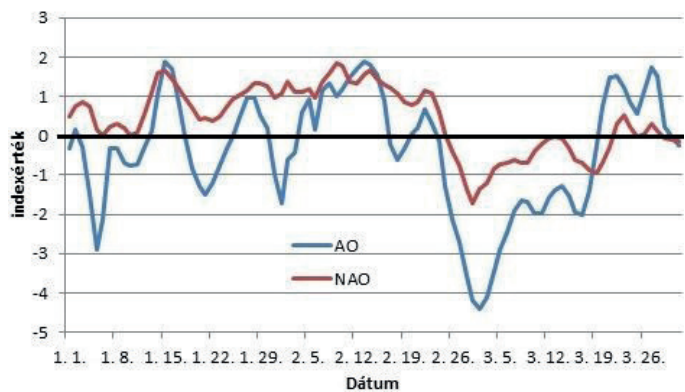
A diagramon minden egyes napra feltüntetik az oszcilláció konvektív zónájának helyzetét és erősségét. 8 fázist különböztetnek meg, melyek egy-egy földrajzi térségnek felel-



4. ábra: Nyomásszintek geopotenciális magasságának normalizált anomáliái 2018. január–március hónapokban a poláris területeken (területi átlag a 65. szélességtől északra) a sztratoszférában és a troposzférában. (forrás: NOAA CPC [1])



5. ábra: Tengerszinti légnyomás (izobárok, hPa) és az 500 hPa-os szint magassága (színes izohipszák, gpm) 2018.03.01. 0 UTC-kor (forrás: Wetterzentrale)



6. ábra: AO/NAO index idősora 2017–2018 telén (NOAA CPC [2] adatok alapján)

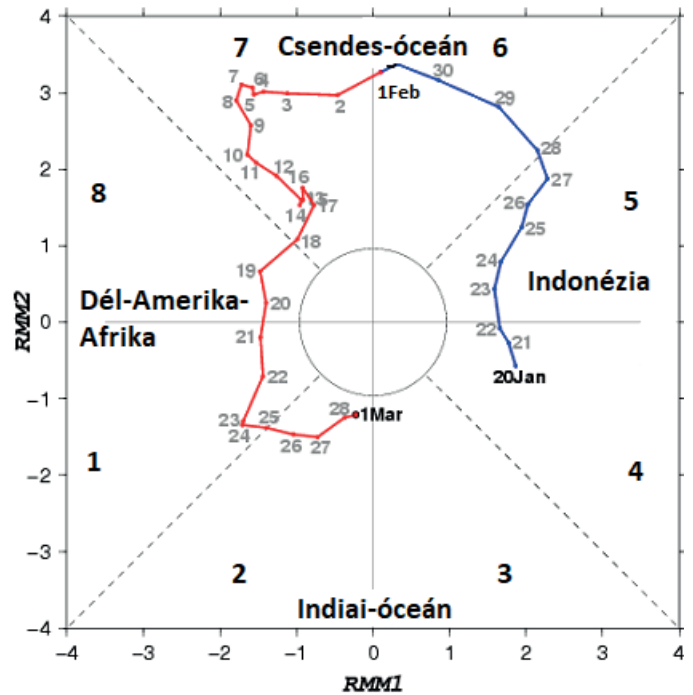
nek meg az Egyenlítő mentén. Ha a körön belül helyezkedik el egy adott napnak megfelelő pont, akkor inaktív az MJO. A körön kívül pedig minél távolabb helyezkednek el a pontok, annál erősebb az oszcilláció az adott térségben. A 7. ábra egy ilyen fázisdiagramot ábrázol, melyen az MJO az óramutató járásával ellentétes irányban halad, ami a valóságban a nyugatról kelet felé tartó vándorlást jelenti.

Az euroatlanti térség magasabb szélességein télen a nyugati áramlást blokkoló anticiklonok gyakrabban alakulnak ki az MJO 6-os és 7-es fázisait követő egy-két hétben (Henderson et al., 2016). Ezt az MJO Rossby-hullámokat befolyásoló hatásának tulajdoníthatjuk (troposzféra belüli távkapcsolat). Emiatt összefüggést találtak az AO/NAO index negatív fázisai és az MJO 6-os–7-es fázisai közt is. (Schwartz és Garfinkel, 2017, Vitart, 2017). Az MJO ezen fázisait erős konvekció jellemzi a Csendes-óceán nyugati-és középső részén.

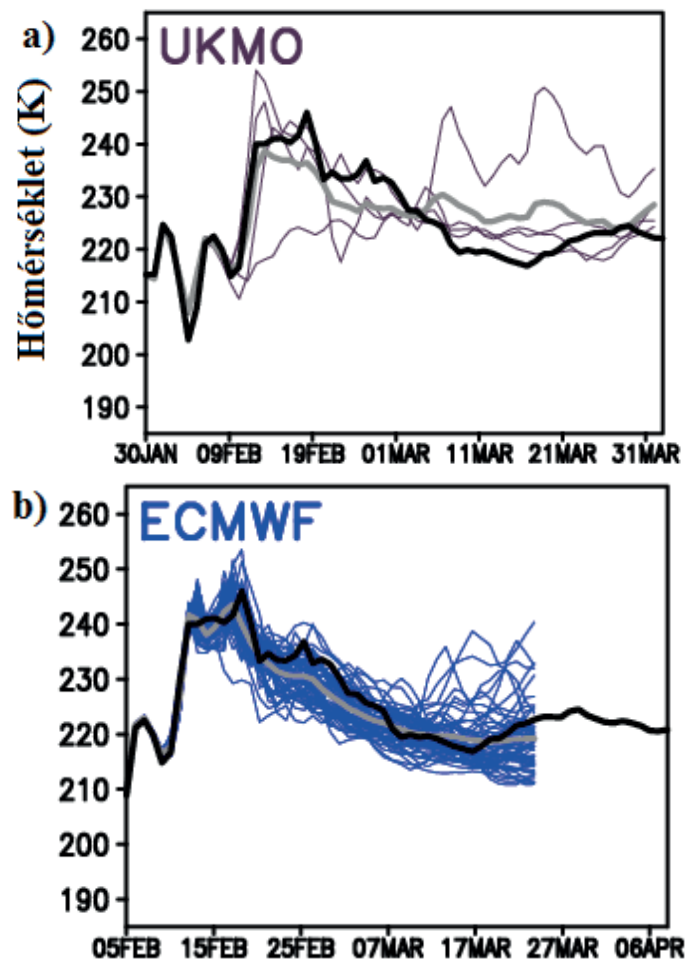
Ugyanakkor az MJO planetáris hullámokra gyakorolt hatása megjelenhet a sztratoszférában is, mert ezek a hullámok vertikálisan felfelé is terjednek, és gyengítik a poláris örvényt (Garfinkel et al., 2012). Ezt alátámaszthatja az is, hogy az elmúlt évtizedek SSW eseményeinek több mint a felét az MJO konvektív aktivitása előzte meg, a már említett Csendes-óceáni térségekben (Schwartz és Garfinkel, 2017). Ha az MJO 6-os–7-es fázisát SSW is követi, akkor erősebbek lesznek a magas szélességeken a vele összefüggésbe hozható légnyomási anomáliák, mintha csak önmagában, SSW nélkül jelentkezett volna (sztratoszféra által „közvetített” távkapcsolat). Ilyenkor az AO legalacsonyabb értékei 30–40 nappal a trópusi oszcilláció után jelentkeznek (Schwartz és Garfinkel, 2017).

Az MJO-nak a vizsgált hidegbetörésben játszott szerepének tisztázásához komolyabb elemzésre van szükség. Annyi viszont megállapítható, hogy a 2018 telén bekövetkezett események nagyon hasonló időrendben játszódtak le, mint ahogy az a fentiek alapján várható. Január végén–február első felében igen erőteljesen jelentkezett az MJO-hoz kapcsolódó konvekció és jellegzetes áramlási kép a Csendes-óceán nyugati, majd középső részén. (7. ábra). Egy nagyon erős MJO epizód február 1-jén lépett át a 6.-ból a 7. fázisába, a sztratoszféra szélfordulása 11 nappal később, február 12-én jelentkezett, majdnem két héttel később pedig az AO és a NAO index is negatív tartományba került. A legalacsonyabb indexértékeket pedig egy hónappal a 7. MJO fázis kezdete után, március elején regisztrálták.

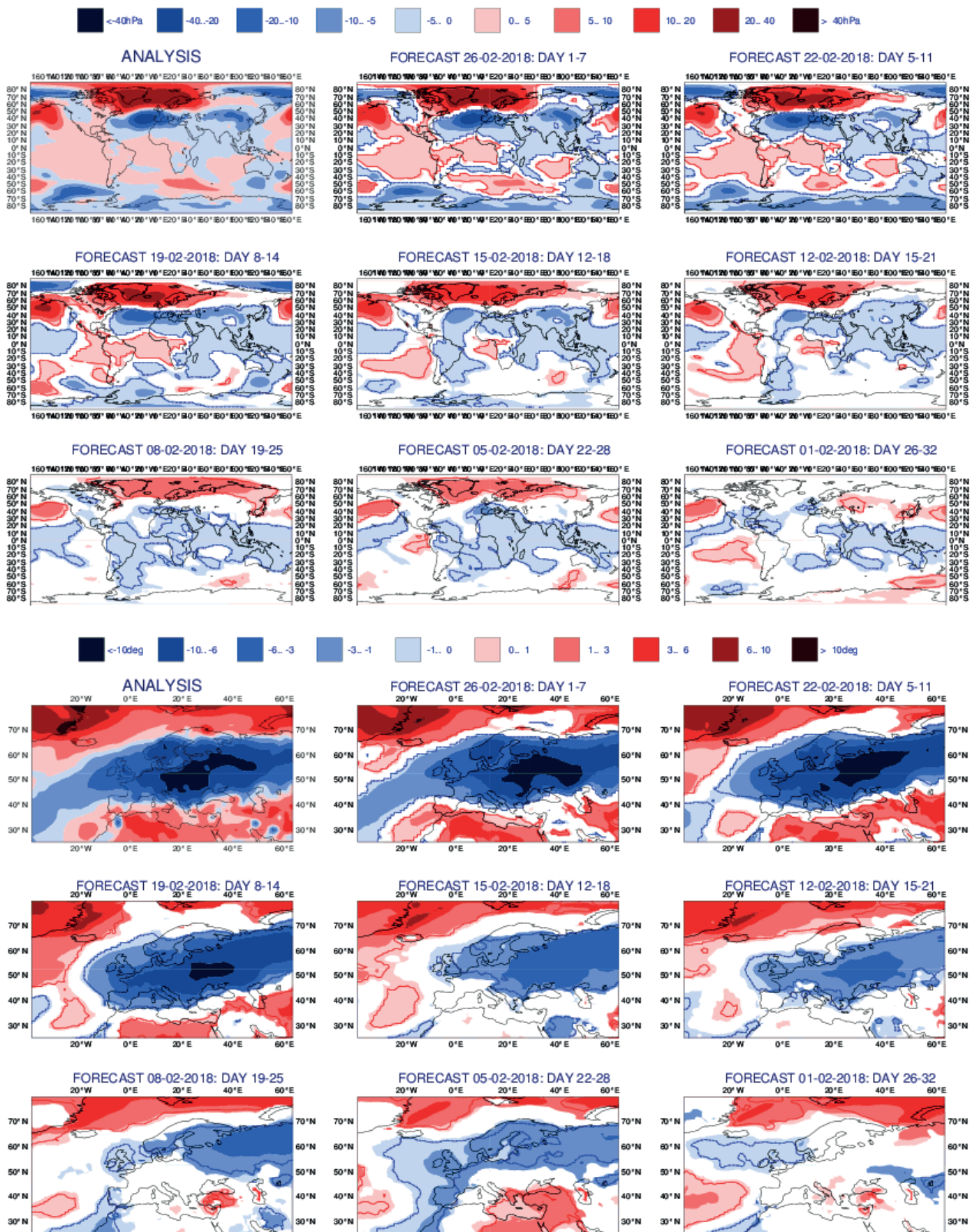
Előrejelezhetőség. A 2018 tél végi hideghullám meglepően jól előrejelezhető volt a szokásos középtávú előrejelzési időtartományon (7–10 nap) túl is. Valószínűleg ez részben a fent említett két jelenségnek (SSW, MJO) is köszönhető. Az SSW eseményeknek a troposzféra cirkulációjára gyakorolt hatása ugyanis akár egy-két hónapon keresztül is észrevehető marad. A sztratoszférában zajló folyamatok hatását a troposzféra légköri viszonyaira pedig a numerikus időjárási modellek is képesek szimulálni (Marshall és Scaife, 2010). Az MJO magas szélességeken észlelhető távkapcsolati hatását pedig szintén visszaadják ezek a modellek (Vitart, 2017).



7. ábra: Az MJO fázisdiagramja 2018.01.20.–2018.03.01 között. A feltüntetett számok 1-től 8-ig az MJO 8 fázisát jelölik. (Japan Meteorological Agency ábrája magyarázattal kiegészítve)



8. ábra: A 10 hPa-os izobárszint hőmérsékletének zonális átlaga Kelvinben a 80. szélességi kör mentén (szürke: ensemble átlag, fekete: bekövetkezett értékek az NCEP analízise szerint)
 a) az UKMO modelljének 2018.01.30-i előrejelzésében.
 b) az ECMWF modelljének 2018.02.05-i előrejelzésében.
 (forrás: University of Tsukuba)



9. ábra: Az ECMWF havi ensemble előrejelzéseiből különböző időpontokban készült globális légnyomás-anómia (fent, hPa) és európai 2 méteres hőmérséklet-anómia (lent, °C) előrejelzések a 2018.02.26.-03.04-i hétre. A felső ábrákon az analízis látható. (forrás:ECMWF)

Maguk az SSW-k, és így az örvény szakadások kialakulása csak egy-két hétre jelezhető előre (Marshall és Scaife, 2010). Ez 2018-ban is így volt, a Subseasonal to Seasonal (S2S) Projectben (Vitart, 2017) szereplő numerikus előrejelző modellekben a legelső előrejelzések a sztratoszféra felmelegedésére vonatkozóan a január 30-i futtatásokban, 11–12 nappal az esemény előtt jelentek meg. Onnantól kezdve néhány modell minden nap nagyon következetesen adta ezt az előrejelzést. A 8. ábra két modell ensemble előrejelzésének fáklya diagramját mutatja be, melyen a sztratoszféra 10 hPa-os izobárszintjére vonatkozó hőmérséklet előrejelzés látható, összevetve az analízissel.

Az ECMWF az S2S projekt résztvevőjeként hetente kétszer készít több hétre előre ensemble modellfuttatást. Az előrejelzett mezőkből heti bontású anomália előrejelzéseket készítenek az elmúlt 20 év modellklímájához viszonyítva (Grasics, 2017). Ilyen anomália előrejelzést mutat be február–március fordulójára vonatkozóan a 9. ábra. Különböző időpontokban indított modellfuttatások láthatók rajta, így nyomon lehet követni, hogyan vált egyre pontosabbá az előrejelzés, ahogy közeledtünk a kérdéses időszakhoz. A felszíni időjárási paraméterek közül a hatalmas anticiklonban kialakult pozitív légnyomás anomáliát (9. ábra fent) és az Európában tapasztalt hideg időjárást (9. ábra lent) már több, mint 15 nappal a hideghullám előtt következetesen jelezte. Már a február 12-i futtatásban mind az anticiklon, mind a negatív hőmérsékleti anomália területe nagyjából a megfelelő helyre van előrejelezve, bár az anomália kevésbé markánsan jelenik meg, mint az analízis szerint. Sőt, a még korábban készült előrejelzésekben, vagyis a 3 héten túli előrejelzési tartományban is voltak jelei a hideg levegő európai előretörésének. Fontos tudni, hogy az ábrán bemutatott modellfuttatásokra igaz, hogy vagy már a kezdeti adataikba bekerült a sztratoszféra bekövetkezett felmelegedése, vagy pedig az előrejelzési időszak során ennek kialakulását már az ensemble tagok többsége valószínűsítette (lásd 8.b ábra).

Összefoglalás. A 2018 tél végi lehülés szép példája a sztratoszféra és a troposzféra közti kölcsönhatások időjárásunkat alakító szerepének. Mivel a földi légkörzés igen komplex rendszer, ezért a poláris örvény összeomlása nem mindig jár együtt a felszíni cirkuláció fentiekben bemutatott átalakulásával, de a hidegbetörések valószínűségét néhány héten keresztül megnövelheti. A trópusi Madden–Julian oszcilláció hatásait a bemutatott időszakban bekövetkezett eseményekre komolyabban szükséges vizsgálni, mert annak szerepe kevésbé tisztázott.

Irodalom

- Baldwin, M. P. and Thompson, D. W., 2009: A critical comparison of stratosphere–troposphere coupling indices. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 135(644), 1661–1672.
- Butler, A. H., Sjoberg, J. P., Seidel, D. J. and Rosenlof, K. H., 2017: A sudden stratospheric warming compendium. *Earth System Science Data* 9(1), 63–76.
- Garfinkel, C. I., Feldstein, S. B., Waugh, D. W., Yoo, C. and Lee, S., 2012. Observed connection between stratospheric sudden warmings and the Madden–Julian Oscillation. *Geophysical Research Letters* 39, L18807.
- Grasics, P., 2017: Havi és évszakos előrejelzések módszertana. BSc szakdolgozat, *Eötvös Loránd Tudományegyetem*, Budapest, pp. 38
- Henderson, S. A., Maloney, E. D. and Barnes, E. A., 2016. The influence of the Madden–Julian oscillation on Northern Hemisphere winter blocking. *Journal of Climate* 29(12), 4597–4616.
- Limpasuvan, V., Thompson, D. W. and Hartmann, D. L., 2004: The life cycle of the Northern Hemisphere sudden stratospheric warmings. *Journal of Climate* 17(13), 2584–2596.
- Marshall, A. G. and Scaife, A. A., 2010: Improved predictability of stratospheric sudden warming events in an atmospheric general circulation model with enhanced stratospheric resolution. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 115, D16114
- Schwartz, C. and Garfinkel, C.I., 2017: Relative roles of the MJO and stratospheric variability in North Atlantic and European winter climate. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 122(8), 4184–4201.
- Tabi, K., 2010: Makrocirkulációs rendszerek és kapcsolatuk a téli időszak időjárásával Magyarországon. Diplomamunka. *Eötvös Loránd Tudományegyetem*, Budapest, pp.129
- Vitart, F., 2017: Madden–Julian Oscillation prediction and teleconnections in the S2S database. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 143(706), 2210–2220.
- Wheeler, M. C. and Hendon, H. H., 2004. An all-season real-time multivariate MJO index: Development of an index for monitoring and prediction. *Monthly Weather Review* 132(8), 1917–1932.
- Zhang, C., 2005: Madden-Julian oscillation. *Reviews of Geophysics* 43(2), 1–36.

Internetes források

- ECMWF/Copernicus: <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-pressure-levels>
- ECMWF: https://www.ecmwf.int/en/forecasts/charts/mofc_multi/
- Japan Meteorological Agency : https://ds.data.jma.go.jp/tcc/tcc/products/clisys/mjo/moni_mjo.html
- NOAA CPC [1]: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/stratosphere/strat-trop>
- NOAA CPC [2]: http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/precip/CWlink/daily_ao_index/teleconnections.shtml
- University of Tsukuba: http://gvpjma.ccs.hpcc.jp/S2S/S2S_SSW.html
- Wetterzentrale <http://www.wetterzentrale.de/de/reanalysis.php>