

Módy proměnlivosti atmosférické cirkulace: Nové poznatky a metody výzkumu

Modes of atmospheric circulation variability: New findings and research methods

Romana Beranová

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4
✉ rber@ufa.cas.cz

Radan Huth

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ huth@ufa.cas.cz

Vladimír Piskala

Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ vladimir.piskala@natur.cuni.cz

Jan Stryhal

Ústav fyziky atmosféry AV ČR
Boční II/1401, 141 00 Praha 4;
Univerzita Karlova
Přírodovědecká fakulta
Albertov 6, 128 43 Praha 2
✉ stryhal@ufa.cas.cz

The investigation of atmospheric circulation is one of the main topics at the Department of Climatology, IAP. Throughout the years, we have studied atmospheric circulation from various perspectives, with one aspect being the exploration of modes of atmospheric circulation variability. In this paper, we introduce the issue of teleconnections detection and present two recent findings from our study of circulation modes as illustrative cases. First, we highlight a weakness of principal component analysis (PCA), the most commonly used method for mode detection. Specifically, the improper application of unrotated PCA leads to the identification of unrealistic modes, often incorrectly interpreted as genuine circulation patterns – a notable example being the Arctic Oscillation. Second, we demonstrate that PCA can be used to detect changes in the spatial-temporal structure of modes in long observational data sets. However, the application of PCA to this end often leads to artefacts due to the sensitivity of the method to subtle changes in the analysed data.

KLÍČOVÁ SLOVA: cirkulace atmosférická – vazby dálkové – oscilace Severoatlantická – oscilace Arktická – analýza hlavních složek

KEYWORDS: atmospheric circulation – teleconnections – North Atlantic Oscillation – Arctic Oscillation – principal component analysis

1. Úvod

Atmosférická cirkulace zásadním způsobem ovlivňuje přízemní klima. Cirkulační faktory přispívají k pozorovaným i očekávaným změnám klimatického systému a mají významný vliv na vznik a vývoj extrémních a nebezpečných jevů. Studium atmosférické cirkulace je jedním z hlavních témat výzkumu na oddělení klimatologie ÚFA. V průběhu let jsme atmosférickou cirkulaci zkoumali z různých pohledů, z nichž dominují dva. První představuje klasifikace polí cirkulačních proměnných. Kromě studií metodologických (Huth 1996) mají klasifikace v našem výzkumu bohatá uplatnění. Zabývali jsme se studiem persistence a trendů cirkulačních typů (Kučerová et al. 2017), vztahem mezi cirkulací a klimatickými trendy (Cahynová, Huth 2016), vztahem mezi cirkulací a extrémní počasí (Stryhal, Plavcová 2023) či vlivem sluneční aktivity na atmosférickou cirkulaci (Huth et al. 2008). V posledních letech jsme řešili na téma cirkulace několik projektů financovaných GAČR, zejména pak projekt Dálkové vazby – hlavní stavební kameny atmosférické cirkulace. Právě dálkové vazby představují druhý dominantní pohled na cirkulaci atmosféry a tento článek má za cíl představit některé z našich nejnovějších příspěvků k tomuto tématu.

2. Atmosférické dálkové vazby

Atmosférické dálkové vazby (angl. teleconnections) je pojem používaný pro geograficky vzdálené oblasti, v nichž mají změny tlaku vzduchu, geopotenciálních výšek, příp. i jiných klimatických prvků podobný časový průběh (tj. jsou spolu vysoce korelované). Zkoumání dálkových vazeb sahá až do počátku dvacátého století ke studii Walkera a Blisse (1932), která jako první zavedla tento pojem do věd o atmosféře. Moderní klimatologie dálkové vazby studuje zejména v souvislosti s nízkofrekvenčními oscilačními módy proměnlivosti

velkoprostorových cirkulačních polí, resp. akčních center atmosféry. Pro výstupy statistických metod při analýze polí meteorologických prvků se ustálil pojem módy nebo režimy proměnlivosti. Jejich nejznámějšími příklady jsou Severoatlantická oscilace (NAO) a Pacificko/Severoamerický mód (PNA) v mimotropických oblastech severní polokoule, Jižní oscilace v tropech a Antarktická oscilace (Jižní prstencový mód) na jižní polokouli. Módy proměnlivosti lze pokládat za základní stavební prvky atmosférické cirkulace, protože atmosférickou cirkulaci v daný časový okamžik lze dobře aproximovat jejich lineární kombinací.

3. Metody detekce

K detekci a popisu módů proměnlivosti se používají dvě hlavní metody. Starší a koncepčně jednodušší metoda je založena na autokorelačních mapách (např. Wallace, Gutzler 1981), které zobrazují korelace určitého referenčního bodu se všemi ostatními body. K popisu kompletní autokorelační struktury přízemního tlakového pole nebo geopotenciálních výšek by však bylo zapotřebí velkého množství takových map, což je nepraktické. V praxi se tedy z výsledků vytváří nová mapa, ve které je každému bodu přiřazena absolutní hodnota nejvyšší nalezené záporné korelace; oblasti s nejvyššími hodnotami pak představují akční centra dálkových vazeb (módů proměnlivosti).

V současnosti nejběžněji používanou metodou je analýza hlavních složek (angl. principal component analysis, PCA). Ta převádí soubor původních časových řad v jednotlivých bodech sítě do nového souboru časových řad neboli hlavních složek, které jsou lineární kombinací původních proměnných. Přitom několik prvních hlavních složek vysvětluje značnou část rozptylu původního souboru dat. Vhodnost PCA pro detekci módů atmosférické cirkulace prokázaly průkopnické studie Horela (1981) či Barnstona a Livezey (1987). Aby takto definované módy byly v souladu se známými autokorelačními strukturami, bývá nutné podrobit hlavní složky tzv. rotaci, tedy lineární transformaci, s cílem přiblížit se tzv. „jednoduché struktuře“ (angl. simple structure; Richman 1986). V praxi toto ovšem bývá někdy opomíjeno a nalezené nerealistické módy jsou vydávány za skutečné se vyskytující režimy proměnlivosti. Jeden takový příklad uvádíme v následující kapitole.

I při optimálním postupu nicméně není snadné (či dokonce možné) spojit výsledky PCA s konkrétními fyzikálními procesy. Metoda PCA totiž nebyla primárně navržena pro odhalování dynamického chování atmosféry, ale k efektivnímu zachycení variability dat. Navíc je to metoda lineární, která nemůže efektivně zachytit nelineární dynamiku. Jako možné alternativy byly mj. navrženy postupy založené na neuronových sítích. Jejich užitečnost byla nicméně prozatím zkoumána značně povrchně a na jejich limity jsme poukázali v nedávné studii (Stryhal et al. 2023).

4. Arktická oscilace jako artefakt PCA

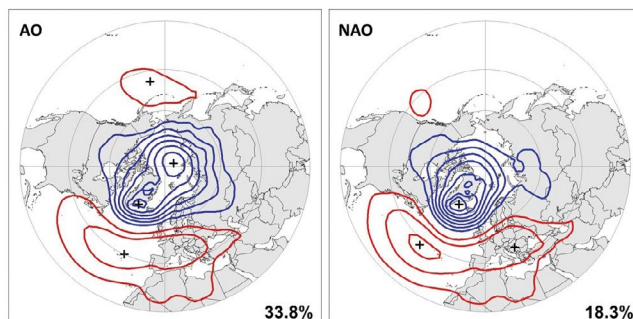
Arktická oscilace (AO) byla definována Thompsonem a Wallacem (1998) jako první nerotovaná hlavní složka v poli měsíčních anomálií tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře (SLP) v mimotropických šířkách severní polokoule. Ačkoli byla fyzikální realita AO mnohokrát zpochybňována (Itoh 2002), tak je koncept AO široce používán až do současnosti.

Na obr. 1 je zobrazena prostorová struktura AO a NAO. Pro tuto studii jsme použili data z NCEP/NCAR reanalýzy a období 1948–1997. NAO je použita jako referenční mód, pro jejíž detekci se rutinně používá rotovaná PCA a její existence je obecně přijímána a jsou známy fyzikální procesy, kterými se řídí (např. Woolings et al. 2008). NAO je charakterizována severo-j jižním dipólem s jižním centrem, které sahá od centrálního severního Atlantiku do jižní Evropy, a severním centrem, které se nachází západně od Islandu. NAO je druhou rotovanou hlavní složkou v poli SLP a vysvětluje 18,3 % celkového rozptylu v oblasti severně od 20° severní šířky.

AO je trojpól, jeden z jeho středů se nachází nad Arktidou, další dva středy opačného znaménka se nacházejí nad severním Atlantikem až jihozápadní Evropou (v oblasti Azorské výše) a nad severním Pacifikem (v oblasti Aleutské níže). Pacifické centrum je ve srovnání s ostatními dvěma centry podstatně slabší. AO vysvětluje 33,8 % celkového rozptylu.

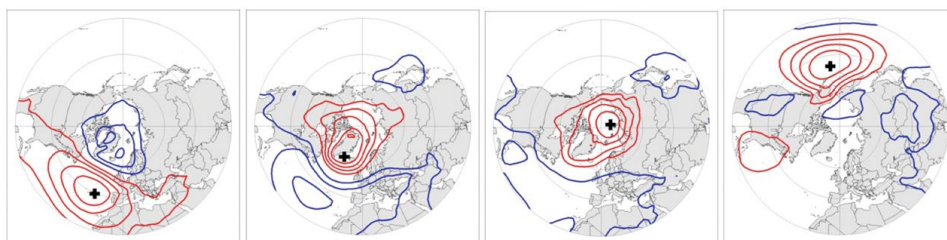
Autokorelační mapy pro AO jsou zobrazeny na obr. 2 pro hlavní body jeho tří center (pro arktické centrum mapujeme 2 body). Vzhledem k tomu, že bod azorského středu AO je blízko centra NAO, je očekávatelné, že odpovídající autokorelační mapa se podobá mapě NAO. Zjevná je absence aleutského centra. Korelační mapy pro dva body arktického centra se vzájemně značně liší. Mapa pro grónský bod se velmi podobá NAO; je vidět, že oblast slabých negativních korelací se středem nad severním Japonskem je daleko od oblasti, kde se vyskytuje aleutské centrum, a nespojuje s ním. Mapa druhého arktického bodu vykazuje pouze slabé korelace s pásem středních šířek nad severním Atlantikem a neexistuje zde ani žádné spojení s aleutským centrem. Aleutské centrum vůbec nekoreluje s Azorským centrem a korelace s arktickým centrem také nejsou zjevné, s výjimkou malé oblasti nad Východosibiřským mořem. Ve skutečnosti autokorelační mapa aleutského centra připomíná třetí rotovanou hlavní složku v SLP severní polokoule, známou jako PNA (např. Yeh et al. 2018).

Protože se prostorová struktura AO neshoduje s autokorelačními mapami a protože při změně prostorové a časové domény analýzy je její struktura nestabilní (Huth, Beranová 2021), tak by AO měla být považována pouze za artefakt analytické metody. Je to vlastně jen takový duch (angl. ghost pattern): ačkoli ve



Obr. 1 Mapy hlavních složek v poli SLP odpovídající Arktické oscilaci (AO) a Severoatlantické oscilaci (NAO). Interval vrstevnic je 1 hPa. Pozitivní/negativní isolinie jsou červené/modré, nulová je vynechána. Křížky označují akční centra, pro která jsou zobrazeny autokorelační mapy.

Fig. 1. Principal component maps in SLP corresponding to the Arctic Oscillation (AO) and the North Atlantic Oscillation (NAO). Contour interval is 1 hPa. Positive/negative are in red/blue, zero is omitted. Crosses indicate action centres for which autocorrelation maps are shown.



Obr. 2 Autokorelační mapy pro centra AO, označené na obrázku 1 křížky. Interval isolinií je 0,2. Kladné korelace jsou znázorněny červeně, záporné modře. Poloha referenčního bodu je označena tučným křížkem.

Fig. 2. Autocorrelation maps for the centres of the AO, indicated in Fig. 1 by crosses. Contour interval is 0.2. Positive correlations are shown in red, negative in blue. The position of the reference point is indicated by a bold cross.

skutečnosti neexistuje, mnoho lidí v jeho existenci věří, a někteří jsou dokonce přesvědčeni, že jej viděli.

5. Citlivost metody PCA na výběr analyzovaného období

Jednou z možných aplikací PCA je detekce změn prostorové struktury módů v čase (Beranová, Huth 2008). Díky dlouhodobým atmosférickým reanalýzám máme nyní možnost sledovat tyto změny v průběhu celého dvacátého století. Jednou z nejdelších dostupných datových řad je Twentieth Century Reanalysis (20CR), pokrývající ve své verzi 2c období 1872–2012 a ve verzi 3 startuje rokem 1836. Tato reanalýza asimuluje pouze pozorování přízemního tlaku vzduchu, měsíční teploty hladiny moře a koncentrace mořského ledu (Compo et al. 2011), data z vyšších vrstev atmosféry nejsou zahrnuta.

Piskala a Huth (2023) ve své studii využili zimní měsíční hodnoty geopotenciálních výšek hladiny 500 hPa z 20CR pro popis změn cirkulačních módů v období 1872–2012. Za tímto účelem byly porovnány prostorové struktury cirkulačních módů získané pro klouzavá období trvající 20, 30, 40 a 50 let s časovým krokem 1 rok. Na základě této analýzy lze rozeznat 3 typy prostorových změn.

Prvním typem je pomalá a postupná změna, jejímž příkladem je mírný posun severního centra NAO směrem na východ od 70. let 20. století do roku 2000. Tento trend byl už dříve popsán (např. Jung et al. 2003). Posuny tohoto druhu odrážejí skutečné změny v atmosférické cirkulaci, protože jsou obvykle doprovázeny i změnami v autokorelačních mapách.

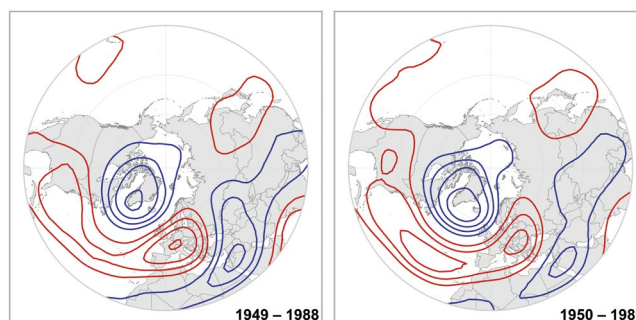
Druhým typem je rychlý a náhlý posun mezi dvěma po sobě jdoucími klouzavými obdobími, který není doprovázen změnou ve vysvětleném rozptylu. Příkladem je náhlá změna NAO mezi obdobími 1949–88 a 1950–89 (obr. 3). Takto rozsáhlé změny ale neodrážejí skutečné změny v atmosféře, protože obě po sobě následující období obsahují téměř identická vstupní data. Nejpravděpodobnějším důvodem tohoto typu změn je přidání dodatečné variability do vstupních dat. Tou dodatečnou variabilitou může být silná anomálie. Právě takovou anomálií byla zima 1988/89, která patří mezi několik zim s nejsilnějším pozitivním NAO indexem (Jones et al. 1997).

Třetím typem změn je náhlý posun doprovázený výraznou změnou vysvětleného rozptylu. V tomto případě je příčinou

citlivost PCA na počet rotačních módů. I relativně malá modifikace vstupních dat totiž může způsobit, že se změní i optimální počet požadovaných módů. Při použití klouzavé PCA a zachování stejného počtu požadovaných módů pro všechna dílčí období může nastat efekt přerotování nebo podrotování (O'Lenic, Livezey 1988). V takovém případě se signál z jednotlivých dálkových vazeb může sloučit do jednoho módu, nebo se naopak rozpadnout do více módů, kdy jednu dálkovou vazbu popisuje více módů. Využití klouzavé PCA pro-

kázalo, že tento efekt může doprovázet i nejsilnější módy jako je NAO nebo PNA.

Výskyt náhlých změn módů je víceméně náhodný. Čím je zkoumané období kratší, tím častěji se vyskytují tyto náhlé změny. Z tohoto důvodu doporučujeme pro studium dlouhodobých změn cirkulačních módů používat PCA s klouzavým krokem, což umožňuje identifikovat tyto náhlé změny. Bohužel, většina autorů pro různé studie s využitím PCA používá pouze pevná nepřekrývající se období, což může jejich výsledky zkreslit výše popsanými náhodnými efekty. Mírnou změnou v analyzovaném období lze získat výrazně odlišné výsledky.



Obr. 3 Mapy Severoatlantické oscilace pro období 1949–1988 (vlevo) a pro období 1950–1989 (vpravo). Pozitivní/negativní isolinie jsou červené/modré, nulová je vynechána.

Fig. 3. Maps of the North Atlantic Oscillation for the period 1949–1988 (left) and 1950–1989 (right). Positive/negative isolines are in red/blue, zero is omitted.

6. Závěr

V tomto článku jsme představili stručný úvod do problematiky detekce dálkových vazeb atmosféry a jako příklad jsme uvedli dva z našich nejnovějších výsledků studia módů proměnlivosti atmosférické cirkulace. Poukázali jsme na slabiny metody PCA, která je nejpoužívanější metodou popisu módů. Předně při chybném použití nerotované PCA dochází k identifikaci nerealistických módů, které jsou interpretované jako skutečně se vyskytující režimy proměnlivosti. Příkladem takového módu je Arktická oscilace. Dále jsme ukázali, že prostorová struktura módů získaná metodou PCA je citlivá na výběr analyzovaného období. Na závěr chceme zdůraznit, že pro detekci módů atmosférické cirkulace metodou PCA je nezbytné věnovat pozornost

srovnání s prostorovými autokorelacemi a kontrole jejich prostorové a časové stability.

Literatura:

- BARNSTON, A. G., LIVEZEY, R. E., 1987. Classification, seasonality and persistence of low-frequency atmospheric circulation patterns. *Monthly Weather Review*, Vol. **115**, s. 1083–1126. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1987\)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1987)115%3C1083:CSAPOL%3E2.0.CO;2).
- BERANOVÁ, R., HUTH, R., 2008. Time variations of the effects of circulation variability modes on European temperature and precipitation in winter. *International Journal of Climatology*, Vol. **28**, s. 139–158. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.1516>.
- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R., 2016. Atmospheric circulation influence on climatic trends in Europe: an analysis of circulation type classifications from the COST733 catalogue. *International Journal of Climatology*, Vol. **36**, s. 2743–2760. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.4003>.
- COMPO, G. P., WHITAKER, J. S., SARDESHMUKH, P. D., MATSUI, N., ALLAN, R. J. et al., 2011. The Twentieth Century Reanalysis Project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, Vol. **137**, s. 1–28. ISSN 0035-9009. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/qj.776>.
- HOREL, J. D., 1981. A rotated principal component analysis of the interannual variability of Northern Hemisphere 500 mb height field. *Monthly Weather Review*, Vol. **109**, s. 2080–2092. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C2080:ARPCAO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C2080:ARPCAO%3E2.0.CO;2).
- HUTH, R., 1996. Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Vol. **59**, s. 217–233. ISSN 0177-7971. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/BF01030145>.
- HUTH, R., KYSELÝ, J., BOCHNÍČEK, J., HEJDA, P., 2008. Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Annales Geophysicae*, Vol. **26**, s. 1999–2004. ISSN 0992-7689. Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/angeo-26-1999-2008>.
- HUTH, R., BERANOVÁ, R., 2021. How to recognize a true mode of atmospheric circulation variability. *Earth and Space Science*, Vol. **8**, e2020EA001275. ISSN 2333-5084. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2020EA001275>.
- ITOH, H., 2002. True versus apparent Arctic oscillation. *Geophysical Research Letters*, Vol. **29**, 109. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2001GL013978>.
- JONES, P. D., JONSSON, T., WHEELER, D., 1997. Extension to the North Atlantic oscillation using early instrumental pressure observations from Gibraltar and south-west Iceland. *International Journal of Climatology*, Vol. **17**, s. 1433–1450. ISSN 0899-8418. Dostupné z: [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1097-0088\(19971115\)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P](https://doi.org/10.1002/(SICI)1097-0088(19971115)17:13%3C1433::AID-JOC203%3E3.0.CO;2-P).
- JUNG, T., HILMER, M., RUPRECHT, E., KLEPPEK, S., GULEV, S. K. et al., 2003. Characteristics of the recent eastward shift of interannual NAO variability. *Journal of Climate*, Vol. **16**, s. 3371–3382. ISSN 0894-8755. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2003\)016%3C3371:COTRES%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2003)016%3C3371:COTRES%3E2.0.CO;2).
- KUČEROVÁ, M., BECK, C., PHILIPP, A., HUTH, R., 2017. Trends in frequency and persistence of atmospheric circulation types over Europe derived from a multitude of classifications. *International Journal of Climatology*, Vol. **37**, s. 2502–2521. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.4861>.
- O' LENIC, E. A., LIVEZEY, R. E., 1988. Practical considerations on the use of rotated principal component analysis (RPCA) in diagnostic studies of upper-air height field. *Monthly Weather Review*, Vol. **116**, s. 1682–1689. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1988\)116%3C1682:PCITUO%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1988)116%3C1682:PCITUO%3E2.0.CO;2).
- PISKALA, V., HUTH, R., 2023. Identifying shifts in modes of low-frequency circulation variability using the 20CR reanalysis ensemble. *Journal of Climate*, Vol. **36**, s. 7771–7783. ISSN 0894-8755. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/JCLI-D-22-0620.1>.
- RICHMAN, M. B., 1986. Rotation of principal components. *Journal of Climatology*, Vol. **6**, s. 293–335. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.3370060305>.
- STRYHAL, J., BERANOVÁ, R., HUTH, R., 2023. Representation of modes of atmospheric circulation variability by self-organizing maps: A study using synthetic data. *Journal of Geophysical Research – Atmospheres*, Vol. **128**: e2023JD039183. ISSN 2169-8996. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2023JD039183>.
- STRYHAL, J., PLAVCOVÁ, E., 2023. On using self-organizing maps and discretized Sammon maps to study links between atmospheric circulation and weather extremes. *International Journal of Climatology*, Vol. **43**, s. 2678–2698. ISSN 0899-8418. Dostupné z: <https://doi.org/10.1002/joc.7996>.
- THOMPSON, D. W. J., WALLACE, J. M., 1998. The Arctic oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters*, Vol. **25**, s. 1297–1300. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/98GL00950>.
- WALKER, G. T., BLISS, E. W., 1932. World weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society*, Vol. **4**, s. 53–84. Dostupné z: <https://www.rmets.org/sites/default/files/ww5.pdf>.
- WALLACE, J. M., GUTZLER, D. S., 1981. Teleconnections in the geopotential height field during the Northern Hemisphere winter. *Monthly Weather Review*, Vol. **109**, s. 784–812. ISSN 0027-0644. Dostupné z: [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1981\)109%3C0784:TITGHF%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1981)109%3C0784:TITGHF%3E2.0.CO;2).
- WOOLINGS, T., HOSKINS, B., BLACKBURN, M., BERRISFORD, P., 2008. A new Rossby wave-breaking interpretation of the North Atlantic oscillation. *Journal of the Atmospheric Sciences*, Vol. **65**, s. 609–626. ISSN 0022-4928. Dostupné z: <https://doi.org/10.1175/2007JAS2347.1>.
- YEH, S.-W., YI, D.-W., SUNG, M.-K., KIM, Y. H., 2018. An eastward shift of the North Pacific oscillation after the mid-1990s and its relationship with ENSO. *Geophysical Research Letters*, Vol. **45**, s. 6654–6660. ISSN 0094-8276. Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2018GL078671>.

Lektoři (Reviewers):

Mgr. Martin Hynčica, Ph.D., prof. RNDr. Petr Dobrovolný, CSc.