

Validace zimní atmosférické cirkulace nad Evropou v globálních klimatických modelech

Mgr. Jan Stryhal

*Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze
katedra fyzické geografie a geoekologie
Albertov 6, 12843 Praha 2*

Anotace

Cílem práce je analýza cirkulace atmosféry nad Evropou v zimních měsících (prosinec až únor) v globálních klimatických modelech. Validace historických běhů celkem 35 modelů z projektu CMIP5 pro období 1961–2000 je provedena srovnáním s třemi atmosférickými reanalýzami. Hlavní použitou výzkumnou metodou jsou objektivní (automatizované) klasifikace atmosférické cirkulace.

Klíčová slova

globální klimatické modely, validace, atmosférická cirkulace, klasifikace

Annotation

The main objective of this paper is to analyse winter (December to February) atmospheric circulation over Europe in global climate models. We validate historical runs of 35 CMIP5 models for 1961–2000 by means of a comparison with 3 atmospheric reanalyses. The main research method we use are objective (automated) classifications of atmospheric circulation patterns.

Key words

global climate models, validation, atmospheric circulation patterns, classification

Abstract

The goal of the present article is to validate winter (December to February) atmospheric circulation over Europe in the outputs of 33 CMIP5 global climate models (GCMs). GCMs are extensively used in studies of the climate system, including potential impacts of anthropogenic forcings on future climate. Therefore, validation of these models is an important task.

In regions with a strong relationship between the large-scale circulation and local climate elements, validating the circulation properties should be done as an addition to the widespread interest in temperature and precipitation. Here, we present a study utilizing three automated (objective) classification methods (Grosswettertypes, SANDRA non-hierarchical clustering, and PCA in t-more), based on which six catalogues of circulation types are computed, both for the GCM ensemble and three atmospheric reanalyses.

Types are defined separately on both datasets (GCMs and reanalyses) and subsequently projected into the other dataset. Several biases are apparent in GCMs: 1. the frequency of types with W and SW advection over Europe and the intensity of the advection tend to be overestimated by GCMs; 2. circulation in these types is slightly more zonal; 3. types with blocking anticyclones over the North Atlantic ocean and stationary anticyclones or ridges over Europe tend to be underestimated by GCMs, both in their frequency and persistence.

Based on the classifications, we define a simple score in order to rank the ability of individual GCMs to simulate winter atmospheric circulation over Europe; the best simulations are those of HadGEM2, CNRM-CM5 and EC-EARTH GCMs. This may aid researches in choosing a GCM for their studies on future climate changes. Considerably large differences have been found in the score of individual classification methods, which points at the importance of using a multi-method approach if validating the atmospheric circulation in GCM outputs.

Validace zimní atmosférické cirkulace nad Evropou v globálních klimatických modelech

1. Úvod

Modelování klimatu je v současné klimatologii jednou z nejrozšířenějších metod. Je hojně využíváno jak ke studiu atmosféry, tak za účelem poznání dopadů antropogenních změn vlastností zemského povrchu a složení atmosféry na (globální) klimatický systém. Validace modelových výstupů je neoddelitelnou součástí vývoje každého modelu; slouží jako zpětná vazba programátorům poukazující na slabiny modelů, v případě ensemblových simulací/projekcí (které jsou v současnosti stále více a více preferovány) ovšem zároveň poskytuje zpřesnění většinou velmi širokých mezí odhadu vývoje klimatu (jednoduše eliminací těch modelů, jejichž kontrolní běhy se pro daný klimatický prvek nejvíce odchyľují od známé skutečnosti).

Mezi nejčastěji validované prvky patří bezesporu teplota a srážky, a to vzhledem k jejich těsné vazbě na přírodní sféru i činnost člověka. Sama znalost odchylek skutečných a simulovaných teplotních či ombrických charakteristik klimatu na lokálním či regionálním měřítku je zásadní, ovšem neposkytuje podstatnou informaci o jejich genezi, tedy který klimatotvorný proces či faktor je vyvolal. Vzhledem k nutnosti parametrizovat v modelech velké množství atmosférických procesů a jevů jsou rozdíly mezi modely přirozené a vzhledem k jejich komplexnosti je prakticky nemožné konkrétní systematické chyby modelu přiřadit ke konkrétním řádkům kódu. Všechny procesy v modelech (ať už výsledkem řešení rovnic či parametrizací) mohou mít nicméně dopad na výsledný charakter cirkulace atmosféry. A atmosférická cirkulace velkého měřítka je v mírných zeměpisných šířkách známa svojí poměrně těsnou vazbou na hodnoty přízemních meteorologických i klimatických prvků; v Evropě je tato vazba obzvláště patrná v zimních měsících (Cahynová a Huth 2014).

Schopnost globálních modelů klimatu (GCMs) simulovat reálnou cirkulaci je tedy minimálně stejně tak důležitá jako jejich schopnost simulovat termodynamické a vlhkostní parametry atmosféry (McKendry a kol. 1995), klimatická změna totiž nebude mít pouze podobu jakési systematické změny v hodnotách teplot a srážek, ale projeví se také změnami vlastností cirkulace (Plavcová a Kyselý 2011). Zjištěné odchylky cirkulace v modelových simulacích současného klimatu od skutečnosti tedy znamenají značnou nespolehlivost projekcí vývoje cirkulace (klimatu) v budoucnosti. To je obzvlášť významné v případě těch typů cirkulace, na které jsou vázány nebezpečné (hydro)meteorologické jevy (McKendry a kol. 2006).

Atmosférická cirkulace je spojitou veličinou nabývající nekonečného množství různých stavů; v mimotropických zeměpisných šířkách je to zároveň veličina značně časově i prostorově proměnlivá. Nejčastěji užívaným přístupem, jak cirkulaci zjednodušeně popsat, jsou klasifikace. V zásadě lze při klasifikaci postupovat dvěma způsoby (Huth a kol. 2008) – prvním je analýza pouze některých, účelově vybraných znaků, jako jsou např. režimy drah cyklon, zpětné trajektorie pohybu vzduchových

částic či hmot či pole větru. Druhým je třídění cirkulačních polí jako celku, jedná se přitom nejčastěji o pole tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře (SLP) či vybraných geopotenciálních výšek (GPH) ve spodní či střední troposféře, s prostorovou a časovou dimenzí regionální či kontinentální, resp. denních průměrů. Zmíněné proměnné jsou z hlediska cirkulace klimatologicky nejvýznamnější, navíc jsou relativně nejlépe reprodukovány reanalýzami atmosféry a klimatickými modely (Vrac a kol. 2007). Samotný proces klasifikace probíhá standardně: jednotlivá pole proměnných jsou na základě určitých pravidel (definovaných předem nebo automaticky během klasifikačního procesu) shlukovány do tříd, které se v literatuře (více méně zaměnitelně) označují jako cirkulační, synoptické či povětrnostní typy. Celý postup je potom nejčastěji označován jako klasifikace polí atmosférické cirkulace nebo jednoduše jako cirkulační (synoptické) klasifikace.

Synoptických klasifikací bylo v době předcházející vzniku modelů atmosféry využíváno v synoptické meteorologii pro účely předpovědi počasí (Brádka 1968; Brázdil a Štekl 1986), v poslední době se těžiště jejich využití stále více posouvá do oblastí klimatologického výzkumu. Pro účely analýzy modelů klimatu ovšem klasické manuální kalendáře povětrnostních typů nevyhovují, a to zejména z důvodu jejich obrovské pracnosti a také kvůli jejich omezené prostorové platnosti. Dalším často diskutovaným negativem manuálních metod je jejich značná subjektivita, která může vést k nehomogenitám v kalendářích: např. v Brádkově kalendáři (HMÚ 1972) byly Cahynovou a Huthem (2007a, 2009) objeveny nesrovnalosti v četnostech některých typů a průměrné době trvání (perzistenci) jednotlivých povětrnostních situací. Nehomogenity se ovšem zřejmě týkají i nejznámějších katalogů – Hesse a Brezowského a Lambova (Jones a kol. 1993; Cahynová a Huth 2007b).

V praxi se proto v klimatologických studiích stále častěji dává přednost metodám, které buď celý proces klasifikace (tedy definici typů i následné třídění polí), nebo část tohoto procesu automatizují. Tyto metody bývají často označovány jako objektivní, nicméně toto označení nevhodně maskuje celou řadu nevyhnutelných více či méně subjektivních zásahů, jako jsou volba klasifikační metody a jejích parametrů, počtu tříd, výběr proměnných, území a časové řady aj (Yarnal a White 1987). Ačkoli průkopnické práce využívající automatizovaných postupů klasifikace cirkulace atmosféry spadají do 60. let 20. století (Lund 1963), většina studií byla publikována až zhruba v posledních 20 letech, v případě analýzy klimatických modelů se potom jedná převážně o posledních několik let. Důvodem tohoto boomu jsou jak dostupnost kvalitních dat (GCMs, reanalýz a dlouhých řad SLP), tak i stále výkonnější a dostupnější výpočetní technika.

Validaci cirkulačních typů (především jejich četnosti a perzistence) v simulacích GCMs pro různé regiony v Evropě dosud provedli Anagnostopoulou a kol. (2009), Demuzere a kol. (2009), Pastor a Casado (2012) a Belleflamme a kol. (2014), pro regionální modely (RCMs) poté např. Plavcová a Kyselý (2012, 2013) a Landgren a kol. (2013). S výjimkou poslední citované práce byly k validaci využity typicky jedna, maximálně dvě různé klasifikační metody. Tato skutečnost

potenciálně mohla vést k chybným závěrům, neboť každá metoda dělí jednotlivé realizace polí proměnných specifickým způsobem, takže výsledné typy se vždy podstatně liší; výsledek klasifikace se dokonce může značně lišit i pokud opakujeme postup na stejných datech jednou a tou samou metodou a s totožným nastavením parametrů metody; to je typické např. pro algoritmy shlukové analýzy (Philipp a kol. 2014). Na toto nebezpečí bylo v minulosti opakovaně upozorňováno (Yarnal a White 1987; Huth 1996a; Huth a kol. 2008), vzhledem k pracnosti klasifikace a obtížnosti interpretace výsledků není tato výstraha autory reflektována.

V předkládané práci uvádíme vybrané dosavadní výsledky analýz zimní atmosférické cirkulace nad Evropou v historických bězích GCMs, dosažené pomocí tří odlišných metod. Každou metodou definujeme cirkulační typy dvěma různými způsoby, výsledkem je tedy 6 různých kalendářů atmosférické cirkulace (pro celkem 36 souborů modelů a reanalýz). Následná analýza těchto kalendářů (resp. porovnání kalendářů pro GCMs s 3 reanalýzami) je využita k popsání hlavních systematických odchylek v simulované cirkulaci atmosféry a také k vytvoření žebříčku GCMs s ohledem na jejich schopnost simulovat 4 vybrané charakteristiky cirkulačních typů: četnost, perzistenci a relativní četnost epizod trvajících právě 1 den, resp. 5 a více dnů.

2. Data a metody

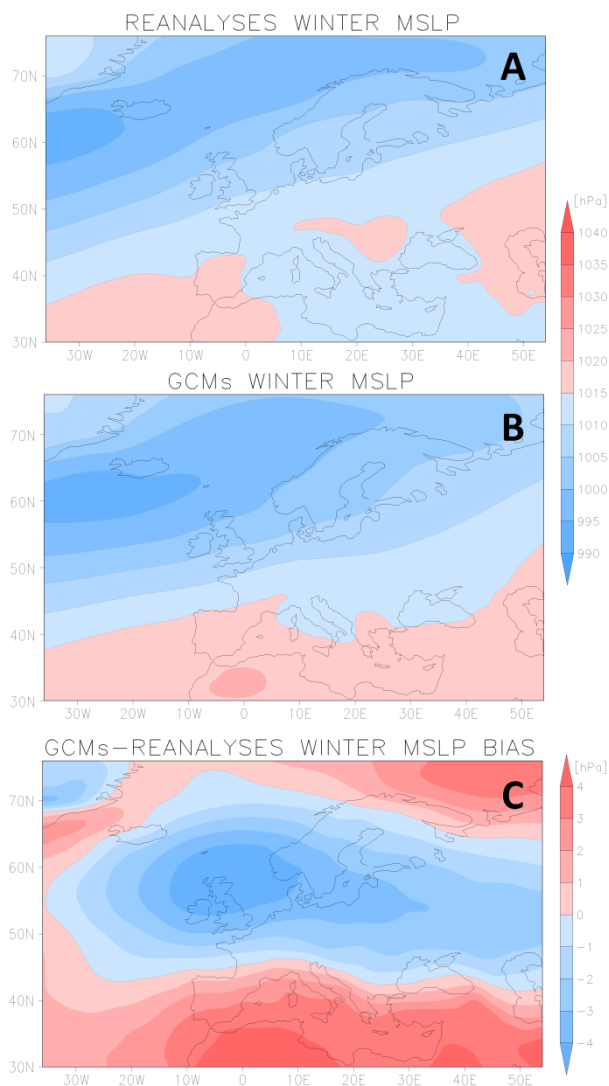
Tato práce koncepčně i metodicky navazuje na rozsáhlou mezinárodní iniciativu COST733 „*Harmonisation and Applications of Weather Type Classifications for European regions*“ (Philipp a kol. 2014), v jejímž rámci byla vytvořena rozsáhlá databáze klasifikačních metod a také publikována řada prací porovnávajících metody s ohledem na jejich různé aplikace v synoptické klimatologii. Volně dostupný software umožňující provádět klasifikace a vzájemně je porovnávat je dostupný online (<http://cost733.geo.uni-augsburg.de/cost733wiki>). Z celkového počtu 33 dostupných metod zde využíváme tři: 1. Grosswettertypes (GWT) – hybridní metodu, která manuálně definuje celkem 10 typů (8 direkcionálních, 1 cyklonální a 1 anticyklonální), 2. SANDRA (SAN, *Simulated Annealing*) – nehierarchickou metodu shlukové analýzy navrženou s ohledem na minimalizaci rozptylu prvků náležících jednotlivým třídám a maximalizaci rozptylu tříd samotných a 3. metodu hlavních složek v t-módu¹ se šikmou rotací hlavních složek (PCT). Více informací o těchto metodách lze najít ve studiích Becka a kol. (2007), Philippa a kol. (2007), resp. Hutha (1996b).

Využitými datovými zdroji jsou průměrné denní mapy SLP (zimní měsíce 1961–2000) z historických běhů všech volně dostupných (celkem 33) GCMs použitých v projektu CMIP5, resp. 5. hodnotící zprávě IPCC (<http://www-pcmdi.llnl.gov>). Tento ensemble porovnáváme s 3 reanalýzami atmosféry (ERA-40, NCEP/NCAR a 20CRv2). Cirkulační typy definujeme pro každou metodu

¹ Tj. časové realizace považujeme za proměnné (uspořádané ve sloupcích) a hodnoty v uzlových bodech sítě za jejich realizace (uspořádané po řádcích). Toto uspořádání umožňuje vidět jednotlivé typy cirkulace zobrazením skóre hlavních složek do mapy; váhy naopak udávají, nakolik se příslušné pole cirkulační proměnné podobá jednotlivým typům (a dle toho klasifikovat).

dvakrát – zvlášť na souboru (118800 map) GCMs (katalog typů „simulovaných“) a na souboru (10800 map) reanalýz (katalog typů „skutečných“) a oba tyto katalogy následně „promítáme“ do druhého datového souboru (tedy každá modelem simulovaná mapa je přiřazena k tomu skutečnému typu, ke kterému je v multidimenzionálním fázovém prostoru nejbližší ve smyslu Euklidovské vzdálenosti; analogicky je každá skutečná mapa přiřazena k nejbližšímu simulovanému typu); ze všech map přiřazených jednotlivým typům jsou vypočítány průměrné mapy. Taková projekce je v případě SAN a PCT (resp. i všech ostatních metod, které definují typy automaticky v průběhu klasifikace) nezbytná, neboť typy skutečné a simulované se ani v nejmenším neshodují, a není tedy možné je srovnávat.

Porovnání cirkulace ve reanalýzách a modelech je provedeno dvěma způsoby: 1. paralelním zobrazením typů (skutečných či simulovaných) a průměrných map vypočtených ze všech denních polí SLP k těmto typům přiřazených a 2. zobrazením boxplotů pro každou metodu a každý cirkulační typ, které vztahují statistické rozdělení ensamble GCMs (popsané pomocí kvartilů, maxima a minima) k hodnotám jednotlivých reanalýz, a to celkem pro 4 parametry cirkulace – četnost a perzistenci cirkulačních typů a četnosti epizod s délkou trvání právě jeden, resp. 5 a více dnů.



Klasifikační SW vyžaduje, aby všechna vstupní data byla ve stejném formátu, proto originální (globální) data transformujeme kubickou interpolací na „lon-lat“ grid s rozlišením 3° z. d. $\times$ 2° z. š. a následně ořezáváme na oblast 37W–56E a 30N–76N, tedy region „D00“ definovaný v rámci projektu COST733 (Philipp a kol. 2014).

Obr. 1. Průměrné pole SLP (zimy 1961–2000). **A** kompozit tří reanalýz (ERA-40, NCEP/NCAR, 20CRv2), **B** kompozit 33 GCMs, **C** systematická odchylka GCMs ($C=B-A$).

3. Výsledky a diskuze

Cirkulace atmosféry nad Evropou a severním Atlantikem je určena především polohou dvou akčních center atmosféry – Islandské tlakové níže (IC) a Azorské tlakové výše (AAC). Význam těchto center pro cirkulaci nad Evropou roste v zimních měsících, kdy jsou tlakově výraznější, plošně rozsáhlejší a posouvají se více k východu (IC), resp. severovýchodu (AAC) (Barry a Carleton 2001). Poloha těchto útvarů v reanalýzách a GCMs je částečně patrná z obr. 1A a 1B.

Na první pohled je vidět, že modely poměrně dobře simulují přízemní tlakové pole, při bližším pohledu jsou ovšem zřejmé některé odchylky. Poloha i hloubka islandského minima je v modelech zachycena obstojně, ovšem simulace je protaženější v zonálním směru; významně menší odklon izobar k SV je patrný nad většinou západní a střední Evropy – nad Britskými ostrovy, Severním mořem a Pobaltím vytváří systematickou zápornou odchylku SLP (viz obr. 1C). Vzhledem k odchylce opačného znaménka nad Středomořím lze v průměru v modelech proto očekávat častější a silnější advekci od západu nad západní a střední Evropou. Oblasti islandského minima a islandsko-karské brázdy jsou typické intenzivní cyklogenezí (Barry a Carleton 2001), takže lze také očekávat určité odchylky v prostorovém rozdělení srážek mezi severní a střední Evropou.

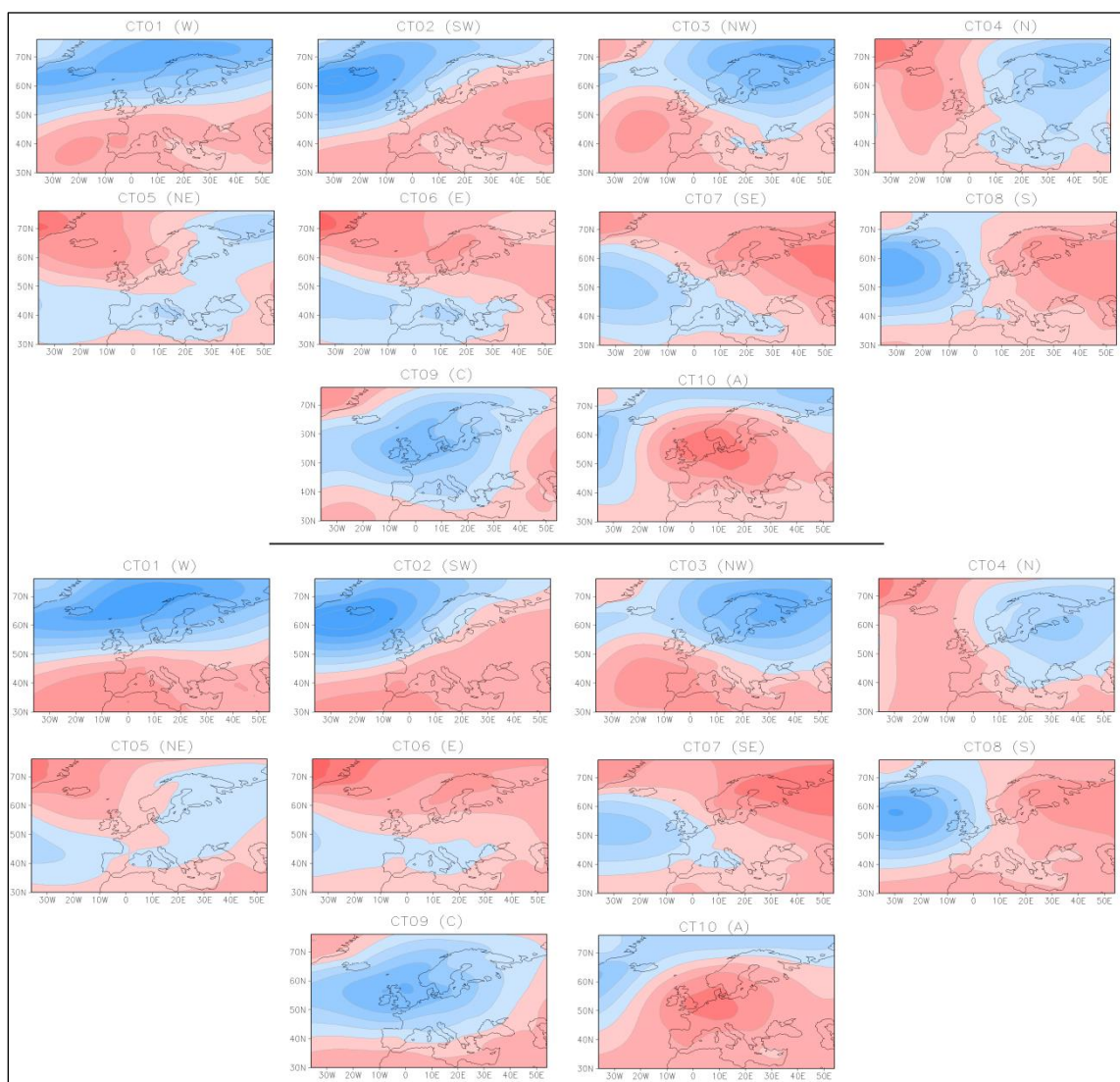
Vytvořené kalendáře cirkulačních typů v mnoha případech potvrzují výše zmíněné hypotézy. Nejjednodušeji interpretovatelné jsou výsledky dosažené metodou Grosswettertypes, která třídí dny do typů podle zonality, meridionality a vorticity izobar nad Evropou (s důrazem na Evropu střední) – výsledkem je tedy hybridní typizace ne nepodobná manuálním katalogům povětrnostních situací. Na obr. 2 je výsledek klasifikace touto metodou do 10 typů a projekce těchto typů do datového souboru GCMs. Ze vzájemného srovnání tvaru typů je patrných několik odchylek mezi reanalýzami a GCMs: typy SW, W a NW v GCMs mají vyšší hodnotu horizontálního tlakového gradientu mezi řídicími tlakovými útvary, oblast s největší intenzitou proudění je posunuta více k jihu (typ W), resp. je zonálnější (typy NW a SW). Na tyto typy připadá v reanalýzách cca 2/3 dnů (viz obr. 3), a proto zmíněné odchylky jsou klimaticky nejvýznamnější. Kupodivu četnost i perzistence jsou simulovány dobře, typy W a SW jsou modely dokonce lehce podhodnoceny; důvodem je zejména to, že řada dnů je klasifikována k typu cyklonálnímu (9). Tento typ je v modelech tvarově bližší typu W (chybí např. brázda nižšího tlaku nad Středomořím) s tím rozdílem, že oblast minima tlaku vzduchu je nasunuta blíže Britským ostrovům. Tento znak cirkulace je v dobré shodě se systematickou odchylkou tlaku vzduchu uvedenou na obr. 1.

Definování typů na souboru map GCMs a jejich projekce do souboru reanalýz značně nadhodnocení typů s advekcí od Z a JZ v modelech již ukazuje velmi dobře. Nadhodnocena je i perzistence těchto typů. Vzhledem k omezené kapacitě článku a také faktu, že mapy jsou velmi podobné těm uvedeným na obr. 2, zde uvádíme pouze boxploty s vlastnostmi typů (obr. 4). Při definování typů přímo v GCMs vyvstává i další charakteristický rys modelů, tedy neschopnost správně

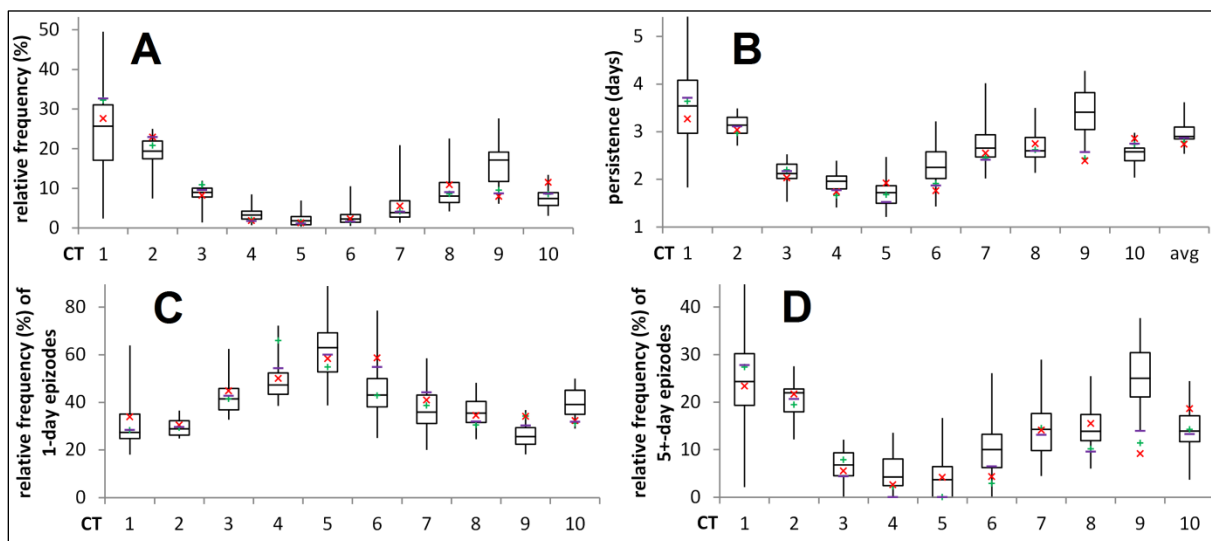
simulovat výskyt blokujících anticyklon nad S Atlantikem a SZ Evropou (Scaife a kol. 2011). To se projevuje extrémním podhodnocením typů N, NE, a obzvlášť typu AC.

Plně automatizované metody, mezi které patří i SANDRA a PCA v t-modu, produkují typy až na náhodné výjimky nepodobné typům expertně stanoveným. Zde pro srovnání uvádíme typizaci metodou SANDRA (obr. 5 a 6), a to verzi s typy definovanými v reanalýzách a promítnutými do GCMs. Pro metody SANDRA a PCT jsme zvolili třídění do 9 typů; tato hodnota je jednou z doporučených s ohledem na ulehčení srovnávání výsledků různých studií (Philipp a kol. 2014).

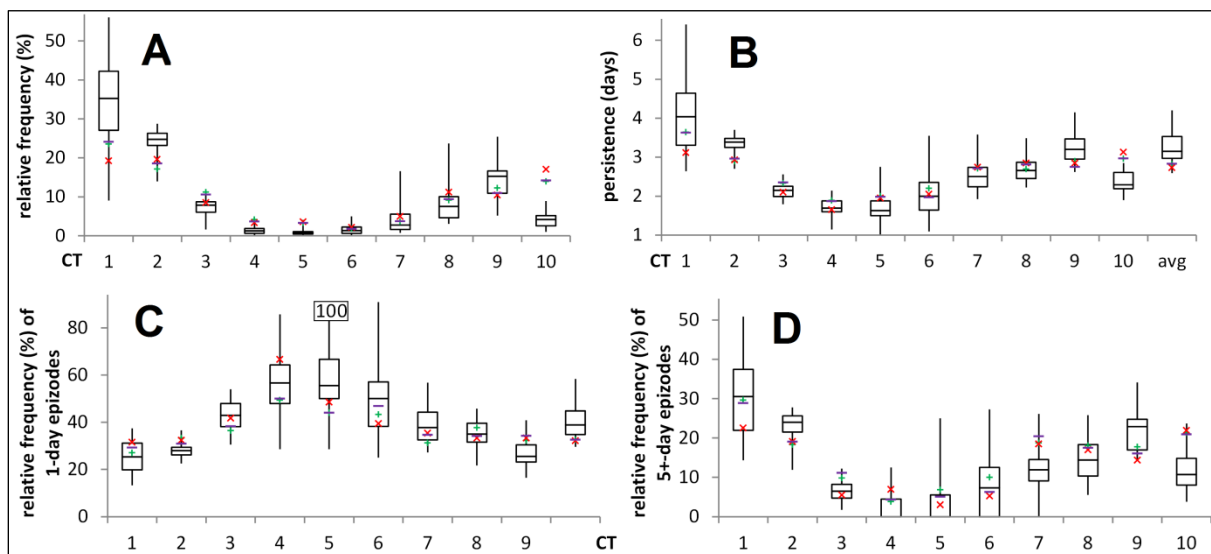
Obr. 2. Klasifikace atmosférické cirkulace nad Evropou do 10 typů (zimy 1961–2000) metodou Grosswettertypes. **Nahoře** typy „skutečné“, definované na průměrných denních mapách SLP třech atmosférických reanalýz (ERA-40, NCEP/NCAR, 20CRv2), **dole** průměrné mapy denních polí 33 CMIP5 GCMs přiřazených k jednotlivým „skutečným“ typům dle nejmenší Euclidovské vzdálenosti. Legenda viz obr. 1.



Obr. 3. Vlastnosti cirkulačních typů zobrazených na obr. 2. **A** relativní četnost, **B** perzistence, **C** relativní četnost 1denních epizod, **D** relativní četnost epizod s délkou trvání 5 a více dnů. Boxploty zobrazují kvartily, maximum a minimum ensmbu 33 GCMs, barevné symboly pak hodnoty pro reanalýzy (modře ERA-40, zeleně NCEP/NCAR, červeně 20CRv2).



Obr. 4. Vlastnosti cirkulačních typů definovaných metodou Grosswettertypes na souboru GCMs a promítnutých do souboru reanalýz dle nejmenší Euklidovské vzdálenosti. Legenda viz obr. 3.



Metoda SANDRA má tendenci produkovat třídy s podobnou relativní četností (četnosti typů v reanalýzách kolísají mezi 8 a 14 %). Četnost i vlastnosti typů v modelech kolísají značně, ovšem zajímavé je, že medián ensmbu modelů simuluje realitu poměrně přesně, výjimkou jsou podhodnocení typů s blokující AC nad Islandem (typ 7), AC nad Evropou (typ 5) a nadhodnocení typů s výraznou C s centrem mezi Islandem a Velkou Británií. Nejpodstatnější odchylky modelů jsou tedy dobře patrné ve všech výše zobrazených kalendářích (a také v katalogu PCA v t-modu (nezobrazeno)), byť jejich výraznost se pro jednotlivé metody liší.

Na základě výsledků dosažených porovnáním 6 párů kalendářů (3 metody, 2 směry projekce) můžeme kvantifikovat schopnost modelů simulovat reálnou atmosférickou cirkulaci a vytvořit

žebříček jednotlivých modelů (tab. 1). Výsledné skóre modelu je vypočteno jako suma všech případů, kdy simulace modelu (četnosti či vlastnosti určitého typu) leží v intervalu průměr $\pm$ rozmezí tří reanalýz. Maximální možné skóre je rovno počtu sledovaných charakteristik (4) $\times$ počet klasifikací (6) $\times$ počet typů (9 či 10 dle metody), tj. 225. Nejlepší výsledky připadly modelům HadGEM2 (99–104), CNRM-CM5 a EC-EARTH (93). Vliv nativního rozlišení modelu na skóre je velmi volný, nejvyšší koeficient determinace (0,14) je při proložení exponenciální křivkou. Lze říci, že velmi nízké rozlišení vede spíše k horšímu výsledku a rozlišení extrémně vysoké nevede k výraznému zlepšení.

Tab. 1. Seznam GCMs použitých ve studii. Za kódem modelu následují rozlišení modelu v rovnoběžkovém a poledníkovém směru (před interpolací) a skóre modelu (více je lépe).

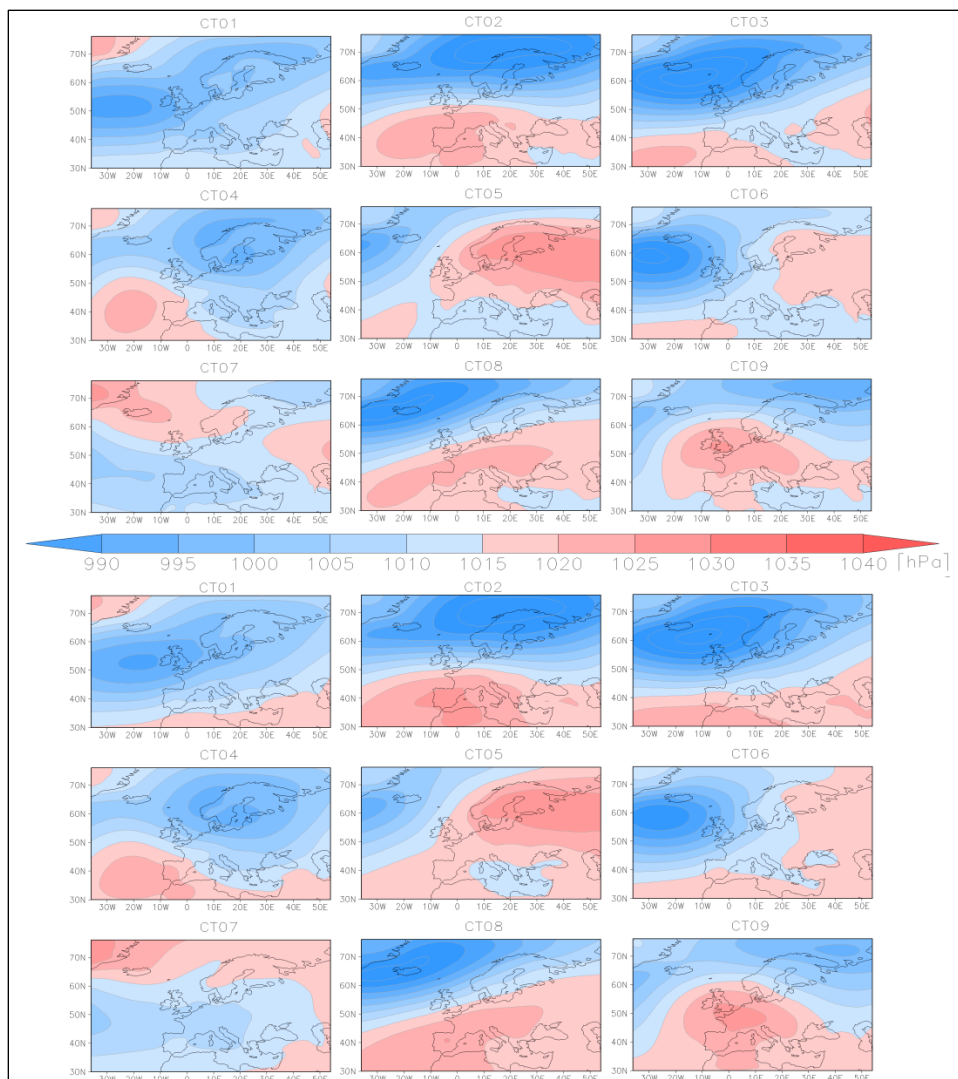
kód modelu	rozlišení	skóre	kód modelu	rozlišení	skóre
HadGEM2-CC	192*145	104	HadCM3	96*73	72
HadGEM2-AO	192*145	99	MRI-ESM1	320*160	71
HadGEM2-ES	192*145	99	INMCM4	180*120	70
CNRM-CM5	256*128	93	IPSL-CM5A-MR	144*143	69
EC-EARTH	320*160	93	MIROC5	256*128	69
MPI-ESM-P	192*96	89	MIROC-ESM	128*64	64
MPI-ESM-LR	192*96	88	CanESM2	128*64	63
CMCC-CM	480*240	85	FGOALS-G2.0	128*60	62
MIROC4h	640*320	85	CMCC-CESM	96*48	57
			MIROC-ESM-		
CMCC-CMS	192*96	82	CHEM	128*64	57
GFDL-CM3	144*90	82	MRI-CGCM3	320*160	55
IPSL-CM5A-LR	96*96	82	CCSM4	288*192	54
GFDL-ESM2G	144*90	81	BCC-CSM_1.1	320*160	53
MPI-ESM-MR	192*96	78	GFDL-ESM2M	144*90	53
CESM1	288*192	77	NorESM1-M	144*96	52
IPSL-CM5B-LR	96*96	73	CSIRO-Mk3L-1-2	64*56	41
CanCM4	128*64	72			

Při validaci metodou SAN je celkové dosažené skóre výrazně vyšší než pro GWT a než pro PCT (904 vs. 803² vs. 629). Toto ovšem nelze interpretovat jako nezpochybnitelnou výhodu dané metody, rozdíl spíše poukazuje na to, jak moc může být výsledek podobných analýz závislý na volbě metody.

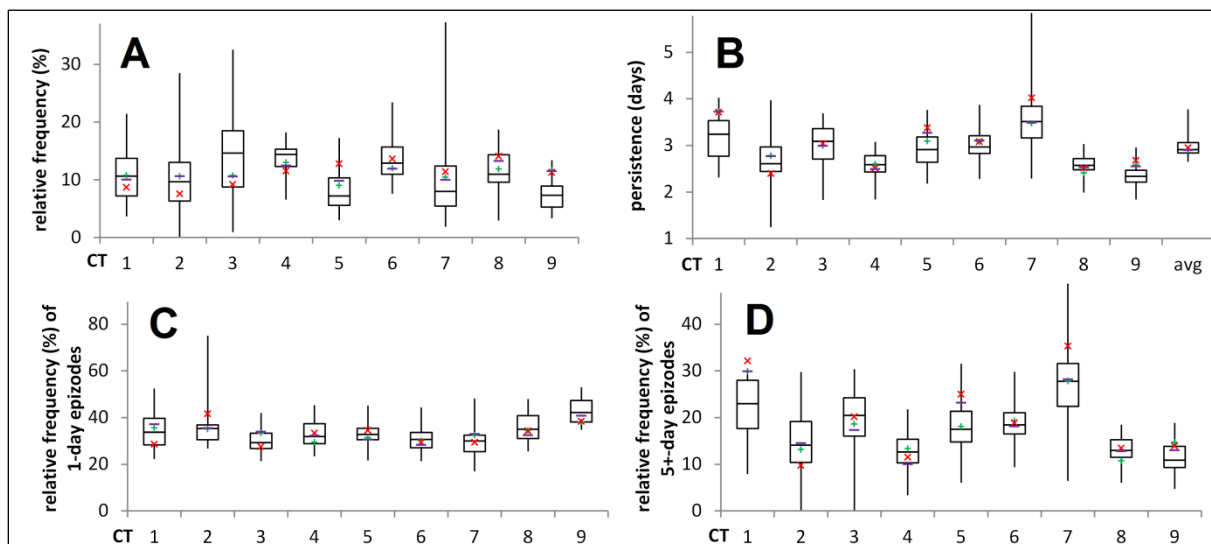
GCMs jsou hojně využívány k projekcím klimatu, vzhledem k poměrně úzkému vztahu mezi cirkulací atmosféry a přízemními hodnotami klimatických prvků v Evropě lze předpokládat, že modely lépe simulující současnou cirkulaci atmosféry budou lépe simulovat i cirkulaci, potažmo klima, pro vzdálenější časové horizonty. Uvedený žebříček GCMs tak může sloužit jako podklad k výběru GCM pro účely studia potenciálních změn klimatu metodami statistického a dynamického downscalingu. Nutno zdůraznit, že dané výsledky jsou směrodatné pouze pro oblast celé Evropy a zimní období.

² Tato hodnota je redukována na 9 cirkulačních typů.

Obr. 5. Klasifikace atmosférické cirkulace nad Evropou do 9 typů (zimy 1961–2000) metodou SANDRA. **Nahore** typy „skutečné“, definované na průměrných denních mapách SLP třech atmosférických reanalýz (ERA-40, NCEP/NCAR, 20CRv2), **dole** průměrné mapy denních polí 33 CMIP5 GCMs přiřazených k jednotlivým „skutečným“ typům dle nejmenší Euklidovské vzdálenosti.



Obr. 6. Vlastnosti cirkulačních typů zobrazených na obr. 5. **A** relativní četnost, **B** perzistence, **C** relativní četnost 1denních epizod, **D** relativní četnost epizod s délkou trvání 5 a více dnů. Boxploty zobrazují kvartily, maximum a minimum ensmbly 33 GCMs, barevné symboly pak hodnoty pro reanalýzy (modře ERA-40, zeleně NCEP/NCAR, červeně 20CRv2).



5. Závěr

Využívání automatizovaných metod klasifikace atmosférické cirkulace v synoptické klimatologii je v důsledku stále dostupnější a výkonnější výpočetní techniky poměrně dynamicky se rozvíjející oblastí klimatologického výzkumu. Autoři se téměř výhradně spoléhají na jedinou klasifikaci, což může vést k chybným závěrům. Předkládaná práce představuje průběžné výsledky práce, jejíž cílem je analyzovat cirkulaci v GCMs (v jednotlivých sezónách a pro různé regiony Evropy) pomocí ensemblu většího počtu klasifikačních metod.

Zde celkem šest uvedených klasifikací, dosažených třemi zcela odlišnými statistickými metodami klasifikace, ukazuje nejvýraznější systematické chyby v současné generaci GCMs, jako jsou nadhodnocení četnosti cirkulačních typů s advekcí od Z a JZ od střední Evropy a odchylky v tvaru těchto typů (větší zonalita proudění, jižnější poloha frontální zóny či větší hodnota tlakového gradientu mezi řídicími útvary), podhodnocení typů s anticyklonou či hřebenem vyššího tlaku vzduchu nad Z a S Evropou a S Atlantikem aj.

Na základě 6 klasifikací byl vytvořen žebříček GCMs s ohledem na jejich schopnost simulovat základní parametry cirkulačních typů v zimě nad Evropou; nejlepších výsledků dosáhly modely HadGEM2, CNRM-CM5 a EC-EARTH. Tyto výsledky mohou být oporou při volbě GCM k analýze možných budoucích změn klimatu nad Evropou, např. při volbě vhodného GCM pro dynamický downscaling.

Citované zdroje

- ANAGNOSTOPOULOU, C., TOLIK, K., MAHERAS, P. (2009): Classification of circulation types: a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, č. 1–2, s. 3–15.
- BECK, C., JACOB, J., JONES, P. D. (2007): Frequency and within-type variations of large-scale circulation types and their effects on low-frequency climate variability in central Europe since 1780. *International Journal of Climatology*, 27, č. 4, s. 473–491.
- BARRY, R. G., CARLTON, M. (2001): *Synoptic and dynamic climatology*. London, Routledge, 620 s.
- BELLEFLAMME, A., FETTWEIS, X., ERPICUM, M. (2014): Do global warming-induced circulation pattern changes affect temperature and precipitation over Europe during summer? *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.4070.
- BRÁDKA, J. (1968): Typisace v meteorologii. *Meteorologické zprávy*, 21, č. 4, s. 122–125.
- BRÁZDIL, R., ŠTEKL, J. (1986): *Cirkulační procesy a atmosférické srážky v ČSSR*. Univerzita J. E. Purkyně, Brno, 298 s.
- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2007a): Short note on inhomogeneities in the Hess-Brezowsky catalogue of circulation types. *Meteorologický časopis*, 10, č. 3, s. 171–174.
- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2007b): Trendy v kalendáři povětrnostních situací HMÚ/ČHMÚ v období 1946–2002. *Meteorologické zprávy*, 60, č. 6, s. 175–182.
- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2009): Changes of atmospheric circulation in central Europe and their influence on climatic trends in the Czech Republic. *Theoretical and Applied Climatology*, 96, č. 1–2, s. 57–68.

- CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2014): Atmospheric circulation influence on climatic trends in Europe: an analysis of circulation type classifications from the COST733 catalogue. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.4003.
- DEMUZERE, M., WERNER, M., VAN LIPZIG, N., ROECKNER, E. (2009): An analysis of present and future ECHAM5 pressure fields using a classification of circulation patterns. *International Journal of Climatology*, 29, č. 12, s. 1796–1810.
- HMÚ (1972): Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR. Hydrometeorologický ústav, Praha, 94 s.
- HUTH, R. (1996a): An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. *International Journal of Climatology*, 16, č. 8, s. 893–922.
- HUTH, R. (1996b): Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 59, č. 3–4, s. 217–233.
- HUTH, R., BECK, C., PHILIPP, A., DEMUZERE, M., USTRNUL, Z., CAHYNOVÁ, M., KYSELÝ, J., TVEITO, O. E. (2008): Classifications of atmospheric circulation patterns: recent advances and applications. *Annals of the New York Academy of Sciences*, 1146, č. 1, s. 105–152.
- JONES, P. D., HULME, M., BRIFFA, K. R. (1993): A comparison of Lamb circulation types with an objective classification scheme. *International Journal of Climatology*, 13, č. 6, s. 655–663.
- LANDGREN, O. A., SKAUGEN, T. E., HAUGEN, J. E. (2013): Evaluation of circulation patterns over Scandinavia from ENSEMBLES regional climate models. Report paper of the Norwegian Meteorological Institute, č. 4. Norwegian Meteorological Institute, Oslo, Norway, nestr.
- LUND, I. A. (1963): Map-pattern classification by statistical methods. *Journal of applied meteorology*, 2, č. 1, s. 56–65.
- MCKENDRY, I. G., STEYN, D. G., MCBEAN, G. (1995): Validation of synoptic circulation patterns simulated by the Canadian climate centre general circulation model for western North America. *Atmosphere-Ocean*, 33, č. 4, s. 809–825.
- MCKENDRY, I. G., STAHL, K., MOORE, R. D. (2006): Synoptic sea-level pressure patterns generated by a general circulation model: comparison with types derived from NCEP/NCAR re-analysis and implications for downscaling. *International Journal of Climatology*, 26, č. 12, s. 1727–1736.
- PASTOR, M. A., CASADO, M. J. (2012): Use of circulation types classifications to evaluate AR4 climate models over the Euro-Atlantic region. *Climate Dynamics*, 39, č. 7–8, s. 2059–2077.
- PHILIPP, A., BECK, C., HUTH, R., JACOBET, J. (2014): Development and comparison of circulation type classifications using the COST 733 dataset and software. *International Journal of Climatology*, DOI: 10.1002/joc.3920.
- PHILIPP, A., DELLA-MARTA, P. M., JACOBET, J., FEREDAY D. R., JONES, P. D., MOBERG, A., WANNER, H. (2007): Long-term variability of daily North Atlantic–European pressure patterns since 1850 classified by simulated annealing clustering. *Journal of Climate*, 20, č. 16, s. 4065–4095.
- PLAVCOVÁ, E., KYSELÝ, J. (2011): Evaluation of daily temperatures in Central Europe and their links to large-scale circulation in an ensemble of regional climate models. *Tellus 63A*, č. 4, s. 763–781.
- PLAVCOVÁ, E., KYSELÝ, J. (2012): Atmospheric circulation in regional climate models over Central Europe: links to surface air temperature and the influence of driving data. *Climate Dynamics*, 39, č. 7–8, s. 1681–1695.
- PLAVCOVÁ, E., KYSELÝ, J. (2013): Projected evolution of circulation types and their temperatures over Central Europe in climate models. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, č. 3–4, s. 625–634.
- SCAIFE, A. A., a kol. (2011): Improved Atlantic winter blocking in a climate model. *Geophysical Research Letters*, 38, doi:10.1029/2011GL049573.
- VRAC, M., HAYHOE, K., STEIN, M. (2007): Identification and intermodel comparison of seasonal circulation patterns over North America. *International Journal of Climatology*, 27, č. 5, s. 603–620.
- YARNAL, B., WHITE, D. A. (1987): Subjectivity in a computer-assisted synoptic climatology I: Classification results. *Journal of Climatology*, 7, č. 2, s. 119–128.