# Klasifikace atmosférické cirkulace

JAN STRYHAL[1], RADAN HUTH[1,2]

[1] Univerzita Karlova v Praze, Přírodovědecká fakulta, katedra fyzické geografie a geoekologie, Praha, Česko (Charles University in Prague, Faculty of Science, Department of Physical Geography and Geoecology, Prague, Czechia); e-mail: jan.stryhal@natur.cuni.cz, radan.huth@natur.cuni.cz
[2] Ústav fyziky atmosféry AV ČR, Praha, Česko (Institute of Atmospheric Physics, Prague, Czechia)

ABSTRACT **Classifications of atmospheric circulation** – The goal of the present article is to provide a brief overview of the development and usage of classifications of atmospheric circulation, particularly classifications of circulation patterns. In the first section, the motivation to conduct research into atmospheric circulation and the role of classifications in this research are discussed. In addition, basic approaches to classification are described. In the second section, manual classification methods are introduced; the focus is on those methods that have been widely used in the Czech literature – the synoptic catalogues of Brádka and Hess-Brezowsky. To our knowledge, such an overview has not been published yet. In the third section, the development of automated methods is described and the most commonly used methods are briefly introduced. We conclude with an overview of one of the fastest developing fields in synoptic climatology – the application of circulation classifications to climate modelling.

KEY WORDS classification – atmospheric circulation – circulation types – synoptic climatology

STRYHAL, J., HUTH, R. (2016): Klasifikace atmosférické cirkulace. Geografie, 121, 2, 300–323.
Do redakce došlo v březnu 2015, přijato do tisku v prosinci 2015.

© Česká geografická společnost, z. s., 2016

## 1. Úvod

Všeobecná cirkulace atmosféry je jedním ze základních faktorů spoluutvářejících klima Země. Poměrně úzký vztah mezi cirkulací velkého měřítka (kontinentálního až hemisférického) na jedné straně a počasím a klimatem na regionální až lokální úrovni na straně druhé je významným motivem k jejímu studiu. Především v minulosti (v době předcházející vzniku modelů atmosféry) byly tyto znalosti zcela zásadní v synoptické meteorologii pro účely předpovědi počasí (Brádka 1968; Brázdil, Štekl 1986); v současnosti ovšem spočívá těžiště využití v disciplínách klimatologických.

Jedna z hlavních nesnází, se kterou se musejí meteorologové i klimatologové vypořádat, plyne ze skutečnosti, že atmosférická cirkulace je spojitou veličinou nabývající nekonečného množství různých stavů. V mimotropických zeměpisných šířkách je to zároveň veličina značně časově i prostorově proměnlivá. Aby bylo možné údajů o cirkulaci využít jako prediktantu různých jevů a procesů, její složitost je třeba nějak výrazně zjednodušit. Nejčastěji užívaným přístupem k tomuto zjednodušení je klasifikace. Ačkoli klasifikační proces může nabývat nesčetných podob, v zásadě je možné rozlišit dvě koncepce – třídění cirkulačních polí jako celku nebo analýza nějakého vybraného znaku (Huth a kol. 2008).

Volba cirkulačního znaku je účelová, opodstatněná snahou o jeho co možná nejpřesnější popis, byť na úkor ztráty jiných informací. Účelem takového výzkumu může být poznání režimů drah tlakových níží – například nad severním Atlantikem (Blender, Fraedrich, Lunkeit 1997). Obdobně byly typizovány i cyklony středomořského původu dle jejich vlivu na vysoké srážkové úhrny v Česku (Hanslian a kol. 2000). Dalšími často klasifikovanými znaky jsou zpětné trajektorie pohybu vzduchových částic či hmot (např. Obregón a kol. 2011) a pole větru (Kaufmann, Weber 1996). Tyto poměrně úzce zaměřené studie cirkulaci atmosféry na větším (synoptickém) měřítku zpravidla nijak neuvažují a výsledků analýz využívají převážně ke studiu lokálních jevů, typicky extrémů počasí a vysokých koncentrací škodlivin v ovzduší.

Druhý přístup ke klasifikaci je o poznání komplexnější v tom smyslu, že se snaží zachytit základní vlastnosti atmosférické cirkulace jako celku, a to převážně na větším (regionálním až kontinentálním) měřítku. Za zdroj informací o cirkulaci je volena některá ze skupiny několika málo proměnných – jedná se především o pole tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře *(sea level pressure)* a/nebo vybrané geopotenciální výšky ve spodní či střední troposféře (většinou 500 či 700 hPa), méně často o směr proudění vzduchu aj. Tyto proměnné jsou z hlediska cirkulace klimatologicky nejvýznamnější, navíc jsou relativně nejlépe reprodukovány reanalýzami atmosféry a klimatickými modely (Vrac, Hayhoe, Stein 2007). Vzhledem k vysoké kolinearitě těchto proměnných se většinou volí pouze jedna z nich. Jejich kombinace a zahrnutí dalších proměnných nicméně mohou zkvalitnit informaci,

kterou nově vzniklá veličina nese o vysvětlovaném prediktantu (například teplotě vzduchu), potenciálně ovšem na úkor prvků jiných – například srážek (Weusthoff 2011). Pole proměnných mohou mít formu původních naměřených (staničních) dat, častěji jsou ale tyto údaje převáděny na hodnoty v uzlových bodech pravidelné sítě. Jednat se může jak o okamžité časoprostorové realizace proměnných (hodnoty změřené v určitých synoptických termínech), tak i o průměry za určité období (typicky den či měsíc), jak absolutní hodnoty, tak odchylky od dlouhodobého průměru. Všechny tyto volby mohou významně ovlivnit podobu výsledku, a musí proto reflektovat konkrétní účel výzkumu.

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 (víceméně zaměnitelně) označují jako cirkulační, synoptické či povětrnostní typy (*circulation, synoptic types*). Celý postup je potom nejčastěji označován jako klasifikace polí atmosférické cirkulace (*classification of atmospheric circulation patterns*) nebo jednoduše jako cirkulační (synoptické) klasifikace. Analogicky s regionalizací, která se snaží nalézt části prostoru s relativně homogenními hodnotami či režimem určitých proměnných (ve vědách o atmosféře typicky teplot a srážek), se při tomto postupu hledají v souboru polí proměnných podobnosti mezi jednotlivými časovými realizacemi (Huth a kol. 2008).

Kromě čistě cirkulačních klasifikací jsou ve vědách o atmosféře hojně užívány i další klasifikace založené taktéž na hledání podobností mezi jednotlivými realizacemi meteorologických polí, lišící se ovšem volbou proměnných a většinou i prostorovým měřítkem. Nelze je tedy sice považovat za klasifikace cirkulační, ovšem vzhledem k řadě podobných atributů (jako cíl výzkumu, metody a výsledná podoba klasifikace a zahrnutí zmíněných cirkulačních proměnných do výpočtu) jsou za ně občas označovány. Jedná se především o typizace počasí a vzduchových hmot.

Typy počasí (*weather types*) jsou výsledkem výpočtu zahrnujícího poměrně široké spektrum proměnných, jako jsou teplota a vlhkost vzduchu, oblačnost, sluneční svit, rychlost a směr větru aj. Jedná se přitom většinou výhradně o přízemní hodnoty prvků změřené na jedné či několika málo lokalitách (Huth a kol. 2008). Klasifikace počasí nemají genetický základ, neříkají tedy nic o tom, proč se daný typ počasí vyskytuje (Brádka 1968).

Typy vzduchových hmot[1] (*air mass types*) se liší od typů počasí tím, že reflektují hodnoty meteorologických prvků ve více výškových hladinách a zpravidla také na řádově větší ploše. Teplotní a vlhkostní charakteristiky vzduchu mají přímou vazbu jak na atmosférickou cirkulaci na jedné straně, tak na řadu prvků, jevů

[1] Vzduchové hmoty jsou definovány jako velké objemy vzduchu s podobnými teplotními a vlhkostními vlastnostmi (Barry, Perry 1973).

a procesů v přírodní sféře na straně druhé. Výhodou klasifikací vzduchových hmot je tedy právě ona přímá (a tudíž o poznání těsnější) vazba na analyzované proměnné (Bower a kol. 2007), nevýhodou ovšem značná náročnost na vstupní data.

Typů počasí a vzduchových hmot bylo úspěšně využito jako prediktorů v bioklimatologických studiích (např. Kyselý, Huth 2004; Davis, Rossier, Enfield 2012), v zemědělských studiích (Jones, Davis 2000), při analýzách znečištění ovzduší (Makra a kol. 2006) a validaci klimatických modelů (Schwartz 1996).

Nutno dodat, že výše vymezené hranice mezi jednotlivými druhy klasifikací jsou v praxi často překračovány. Je tedy poměrně časté, že typy (případně režimy) počasí (povětrnosti), synoptické a cirkulační typy jsou užívány vesměs jako synonyma, případně hranice mezi nimi jsou jednotlivými autory vnímány poněkud odlišně.

V následujících kapitolách se věnujeme cirkulačním klasifikacím; text na několika místech ilustrujeme jednoduchými analýzami, které jsou založeny na atmosférické reanalýze vytvořené v rámci projektu *„The Twentieth century reanalysis project"* (Compo a kol. 2011, ESRL 2015), popisující atmosféru od roku 1871 v horizontálním rozlišení 2° zeměpisné šířky a délky a časovém kroku šest hodin. V práci jsou využity mapy denních průměrů pole tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře pro zimní měsíce 1961–2000 (3 610 dnů) a oblast 40° z. d. až 40° v. d. a 30° až 70° s. š. Dále využíváme databáze povětrnostních typů dle Brádky (ČHMÚ 2014) a průměrných územních měsíčních teplot v Česku (ČHMÚ 2015). Klasifikace jsou vytvořeny pomocí software COST733class2.0 (Philipp a kol. 2014; COST 733 Wiki 2014) a SOM-PAK 3.1 (Helsinki University of Technology 2015).

## 2. Manuální katalogy povětrnostní situace

Jak již bylo uvedeno v samotném úvodu, atmosférická cirkulace velkého měřítka je v relativně těsném vztahu s místním počasím, čehož v minulosti hojně využívala předpovědní služba. Cirkulace nicméně vysvětluje jen část rozptylu meteorologických proměnných, a proto je možné na jejím základě usuzovat spíše na typ počasí, maximálně tvořit určitou elementární pravděpodobnostní předpověď vývoje meteorologických prvků. Nejoblíbenější metodou, využívanou k tomuto typu předpovědí, jsou typizace synoptických (povětrnostních) typů. Především 50. až 70. léta minulého století, než výkonnost synoptických metod v předpovědi počasí postupně předčily metody numerické (Brázdil, Štekl 1986; Šálek, Rada, Král 2006), daly vzniknout velkému množství tzv. katalogů synoptické situace.

Dle Brádky (1968) je možné povětrnostní typy považovat za určitý mezistupeň mezi klasifikacemi počasí a cirkulace, neboť na jedné straně kladou značný důraz na ráz počasí v konkrétní oblasti a na straně druhé zohledňují i genezi jednotlivých uzavřených cirkulačních pochodů velkého měřítka. V mírných zeměpisných

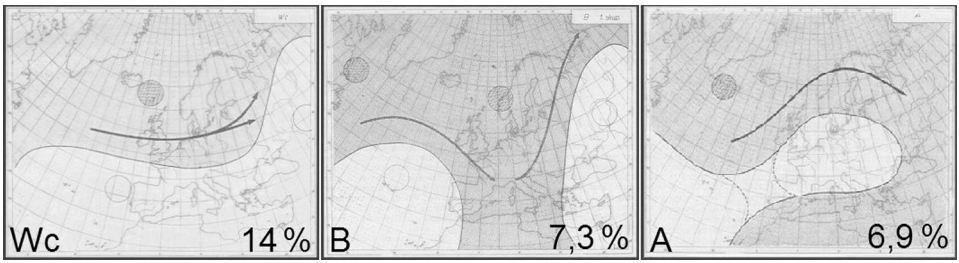
šířkách se jedná zejména o životní cykly tlakových níží a výší, těsně související s vpády chladného vzduchu do jižnějších šířek a jeho následném prohřívání či promíchávání se vzduchem teplejším. Ve střední Evropě se tyto cykly projevují typicky po dobu několika dnů charakteristickým režimem tlakového pole a s ním spjatými horizontálními a vertikálními pohyby vzduchu, přechodem front a přílivem vzduchových hmot určitého původu (HMÚ 1972). Každou takovou epizodu (tzv. přirozené synoptické období) lze tedy rozdělit do sledu několika povětrnostních situací, vzájemně se lišících z cirkulačního hlediska polohou a stádiem vývoje jednotlivých tlakových útvarů, z hlediska charakteru místního počasí pak statistickým rozdělením meteorologických prvků. Takové dělení je nicméně možné pouze pro relativně malá území, pro které je počasí v daném stádiu vývoje tlakového pole dostatečně homogenní (Brádka 1968). Tato omezená platnost je primárním důvodem existence značného množství katalogů povětrnostních typů.

Každý katalog tvoří určitý soubor expertně stanovených typů. Ačkoli je v zásadě možné stanovit i velmi omezený počet typů reprezentujících účelově zvolené stavy tlakového pole vedoucí ke konkrétním projevům počasí (např. hydrometeorologickým extrémům), nejznámější typizace se snaží aproximovat každou (či aspoň naprostou většinu) z reálných konfigurací pole cirkulace. Volba typů je převážně zcela subjektivní, v některých případech je založena poněkud objektivněji na určitých geometrických úvahách, jako jsou např. oktant proudění a zakřivení izobar v poli tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře (Lamb 1972). Počet typů definovaných jednotlivými katalogy se liší, ovšem pohybuje se většinou řádově maximálně v prvních desítkách, což umožňuje pokrýt spektrum stavů cirkulace a zároveň nedefinovat typy, které by se objevovaly pouze velmi sporadicky.

Samotné zařazování dnů k příslušným nejpodobnějším povětrnostním typům[2] je taktéž manuální, prováděné skupinou synoptiků na základě pravidel vlastních danému katalogu. Na podobnost lze usuzovat z řady parametrů, jako jsou okamžitý stav přízemního a výškového proudění, poloha frontální zóny, charakter tlakového pole (cyklonální či anticyklonální zakřivení izobar) či vlastnosti vzduchových hmot (HMÚ 1972, Lamb 1972). Dalším kritériem poměrně významně ovlivňujícím podobu výsledného kalendáře může být například požadavek na minimální délku trvání jednotlivých epizod (typicky 2 či 3 dny).

Je zřejmé, že celý tento subjektivní proces je náchylný k vnášení nehomogenit do kalendářů, zejména v případě personálních změn v autorském kolektivu. Nejednoznačnost a subjektivitu zařazení množství dnů dokládá upozornění pracovníků Českého hydrometeorologického ústavu (ČHMÚ 2014) vztahující se k pracovní verzi synoptických typů definovaných pro území Česka. Oproti ní může ve finální podobě kalendáře, která vzniká na základě porovnání výsledků se slovenskými

[2] Neponechává-li ovšem daný katalog možnost nejasné případy neklasifikovat.




**Obr. 1** – Nejfrekventovanější typy v kalendáři povětrnostních typů dle Brádky (zimní měsíce 1961–2000) a relativní četnost dnů náležících příslušnému typu. Šedě znázorněny oblasti nízkého tlaku vzduchu, kruhy značí polohu řídících tlakových útvarů. Wc – typ západní cyklonální, B – brázda nízkého tlaku nad střední Evropou, A – anticyklona nad střední Evropou. Zdroj dat a nákresů: ČHMÚ (2014), upraveno.

meteorology, změnit kategorii i více než čtvrtina dnů. Podobný výsledek uvádí i Frakes a Yarnal (1997), kteří provedli svoji subjektivní klasifikaci opakovaně.

Navzdory všem zmíněným negativům manuálních katalogů je jejich obliba značná a jejich využití přesáhlo vědy o atmosféře. Jednotlivé typy se díky své poměrně těsné vazbě na počasí dobře interpretují, jsou využitelné coby prediktor různých jevů a procesů. Dostatečná délka kalendářů a aplikace napříč různými obory umožňují porovnávání výsledků. Slabinou jsou ovšem zmíněná omezená prostorová platnost, zcela zásadním negativem potom nepřenositelnost celého postupu do jiného regionu a zejména pak (vzhledem k pracnosti postupu) na nové řady – atmosférické reanalýzy a výstupy klimatických modelů, jejichž počet i význam v posledních desetiletích dramaticky narostl.

V rámci jednoho článku není možné poskytnout vyčerpávající přehled katalogů a jejich aplikací. Dále tedy přednostně uvádíme příklady studií vztahujících se k území Česka[3]. U nás v praxi nejpoužívanější typizací je Brádkův katalog, na jehož základě je sestavován kalendář povětrnostních typů pracovníky ČHMÚ pro území Česka (respektive dříve Československa) a jenž je dostupný od roku 1946. Katalog v současné podobě definuje 28 typů, každému dnu musí být přiřazen právě jeden z nich. Popisy jednotlivých typů jsou uvedeny např. v práci HMÚ (1972) či online (ČHMÚ 2014), tři nejčastěji se vyskytující typy v zimách 1961–2000 jsou zobrazeny na obrázku 1.

Na základě tohoto kalendáře bylo vypracováno několik studií analyzujících typický ráz počasí podmíněný výskytem jednotlivých typů.[4] Jedná se v první řadě

[3] Ve středoevropském regionu se těší značnému zájmu na vesměs národní úrovni i další typizace, z nichž se sluší upozornit alespoň na dvě – Lityńského pro území Polska (viz např. Żmudzka 2013) a Péczelyho pro území Maďarska, resp. Panonské pánve (viz např. Makra a kol. 2009).

o práce Brádky a kol. (1961) a HMÚ (1972). Následně Starý (1989) a Slabý (1989) navázali analýzou období 1945–1985. Křivancová s Vavruškou (1997) jejich práci dále výrazně rozšířili analýzou 192 českých klimatologických stanic za období 1961–1990, což umožnilo pro jednotlivé povětrnostní situace vystihnout také regionální rozdíly prvků, respektive (převážně) jejich denních či měsíčních průměrů. V mapové formě byla prostorová variabilita vybraných prvků ve zvolených skupinách povětrnostních typů zachycena v Atlasu podnebí Česka (Tolasz a kol. 2007). Zmíněné práce se však nijak nevěnovaly dlouhodobým změnám cirkulace, včetně jejich možného podílu na změnách klimatu. Tuto mezeru nedávno zacelili Cahynová s Huthem (2009a), s využitím výsledků řady mezitím provedených, změnám klimatu v Česku po roce 1960 věnovaných studií (mj. Brázdil a kol. 1995; Huth, Pokorná 2004, 2005; Chládová, Kalvová 2005; Brázdil a kol. 2009a).

Mimo jmenované šířeji zaměřené práce je ovšem třeba jmenovat i dlouhou řadu dalších, které v jednotlivých brádkovských typech detailně analyzovaly vybrané jevy a prvky, převážně atmosférické, respektive hydrometeorologické: například studie věnované klimatologii maximálních a minimálních denních teplot (Iľko 1982) a mlh (Minďáš, Škvarenina 1995), obdobím s krátkým a dlouhým trváním slunečního svitu (Fišák 1999), nárazům větru (Šimek 2000), příčinám teplých zim 90. let (Sandev, Šedivka 2002), pražskému tepelnému ostrovu (Beranová, Huth 2005), příčinám letních povodní (Čekal 2007), epizodám sucha (Brázdil a kol. 2009b), smogovým situacím (Knozová, Hora 2010) nebo kalamitnímu sněžení (Květoň, Žák 2011). Kromě zřejmé oblíbenosti v klimatologii si tato metoda zachovává svůj význam i v meteorologii, např. při předpovědi konvekčních jevů (Dejmal, Řezáčová 1997) a hodnocení úspěšnosti předpovědi počasí (Drobek, Šopko 2013).

Druhou manuální typizací, která je v českém prostředí používána, je katalog Hesse a Brezowského (tzv. *Grosswetterlagen*; Hess, Brezowsky 1952), která byla vytvořena sice primárně pro západní Německo, nicméně je považována za reprezentativní minimálně pro celý region střední Evropy (James 2007; Cahynová, Huth 2009a). Nespornou výhodou německého kalendáře je fakt, že byl zpětně vytvořen až k roku 1881, což umožňuje také analýzy sekulárních řad; například za účelem odhalení vlivů cirkulace na teplotu a srážkové úhrny (Brůžek 1982) a na délku trvání slunečního svitu (Brůžek 1986), vztahů cyklonality a zonality proudění s měsíčními a ročními průměry srážkových úhrnů v Čechách (Brůžek 1987), příčin horkých vln v Praze (Kyselý 2002) a na jižní Moravě (Kyselý, Kalvová 1998) nebo variability povodní na Vltavě a Labi (Kyselý, Kakos, Holásková 2008).

S ohledem na využitelnost kalendářů synoptických typů v analýzách změn atmosférické cirkulace a vlivu těchto změn na trendy klimatických prvků vyvstala otázka týkající se jejich homogenity. V kalendáři ČHMÚ byly Cahynovou

[4] Klimatické prvky (resp. jejich hodnoty) vázané na výskyt určitého cirkulačního typu bývají označovány jako tzv. podmíněné klimatické prvky.

a Huthem (2007b, 2009a) objeveny nesrovnalosti týkající se četnosti některých typů a průměrné doby trvání (perzistence) jednotlivých situací. Ty jsou důsledkem jak nevyhnutelných změn v kolektivu autorů (například náhlé zkrácení perzistence typů počínaje rokem 1973), tak i postupného odklonu od snah respektovat přirozené synoptické období, které byly charakteristické zejména v počátečních fázích katalogu (Krška 1969)[5]. Tento odklon souvisí s postupným posunem těžiště využití kalendáře z prognostiky ke klimatologii, neboť kratší situace mohou lépe vystihnout proměnlivost polí atmosférických proměnných. Jednotlivé typy tak mají ve výsledku menší rozptyl hodnot podmíněných prvků, jinými slovy dosažený vztah typů cirkulace a klimatu je těsnější (Rein 1959). Do určité míry se také projevil posun od konstrukce kalendáře pro celé protáhlé území Československa k poměrně kompaktnímu území Česka po roce 1990, byť nikoli statisticky významně (Křivancová, Vavruška 1997).

Možné nehomogenity vzniklé při subjektivním třídění dnů byly diskutovány i v případě jiných manuálních typizací; viz např. Jones, Hulme, Briffa (1993), Cahynová a Huth (2007a, b, 2009b), James (2007) či Weusthoff (2011).[6] Zdá se tedy, že nehomogenity se v určité míře vyskytují ve všech manuálně sestavovaných kalendářích typů. Je tedy vždy potřeba zvážit, jestli jejich potenciální negativní dopad v konkrétním případě nepřevažuje nad jinak nespornými výhodami těchto metod.[7] Jednou z cest, jak nutnost takových úvah zmírnit, je snížení subjektivity automatizací části či celého klasifikačního procesu.

## 3. Automatizované cirkulační klasifikace

S rozvojem výpočetní techniky a zlepšující se dostupností údajů o atmosférické cirkulaci v druhé polovině 20. století se pozvolna zlepšují podmínky pro automatizaci klasifikace. Záměrem průkopnických prací nicméně nebylo nahradit manuální metody, ale vytvořit postupy, které by „samy" byly schopny rozpoznat často se vyskytující pole tlaku vzduchu a následně k nim přiřadit jednotlivé případy, jinými slovy automaticky stratifikovat cirkulaci pro potřeby především klimatologických studií (Lund 1963). Ačkoli samotný výpočet je objektivní, výsledná podoba klasifikace je přesto určena nevyhnutelnými subjektivními kroky – tj. volbou metody a jejích parametrů (Yarnal, White 1987). Stejně tak jako tomu bylo v případě

[5] Typickými projevy jsou pokles perzistence a nárůst počtu situací s délkou trvání právě dva dny.

[6] Specifický problém kalendáře Hesse a Brezowského je způsoben manuálním tříděním dnů po měsíčních úsecích, což vede ke statisticky významně častější změně typu na konci měsíců v porovnání s průměrnou četností změny typu v ostatních dnech (Cahynová, Huth 2007a).

[7] Oblastí, kde se nehomogenity manuálních kalendářů projeví zásadním způsobem, jsou analýzy dlouhodobých změn cirkulace (viz například Kyselý, Huth 2006).

manuálních klasifikací, tedy platí, že veškeré volby v průběhu klasifikace[8] musí být učiněny s ohledem na účel práce. I sama klasifikační metoda by měla být volena s tímto ohledem, ideálně na základě předem provedené srovnávací studie. Každá metoda totiž dělí spojitou atmosférickou cirkulaci jiným způsobem a ne každý výsledek je schopen rozlišit dostatečně uspokojivě právě ty znaky cirkulace, které jsou pro daný výzkum relevantní. Ačkoli na obezřetnost při volbě metody i interpretaci výsledků bylo opakovaně upozorňováno (Yarnal, White 1987; Huth 1996a; Huth a kol. 2008), v mnohých případech výstrahy nepadají na úrodnou půdu.

Jak již bylo zmíněno v předchozí kapitole, každá klasifikace sestává ze dvou kroků. Předně je to výběr cirkulačních typů, tedy určitých reálných či teoretických konstelací tlakového pole v daném regionu; následně je ke každému z typů přiřazena větší či menší část ze souboru reálně se vyskytnuvších případů. V zásadě je možné automatizovat oba kroky klasifikace, v některých případech je ale žádoucí provést výběr typů manuálně.

Příkladem postupu, který automatizuje třídění a přitom konzervuje expertní výběr typů, jsou tzv. objektivizované verze katalogů povětrnostních situací – Lambova (Jones, Harpham, Briffa 2013) a Hesse a Brezowského (James 2007). Výsledkem je hybridní klasifikace, která si ponechává některé žádoucí vlastnosti manuální typizace – zejména výběr synopticky relevantních a dobře interpretovatelných typů, je nicméně výrazně méně pracná. Z důvodu nemožnosti simulovat expertní rozhodování při třídění pouze několika málo jednoduchými algoritmy se obě verze kalendářů podstatně liší. Například původní a Jamesem objektivizovaná verze *Grosswetterlagen* shodně klasifikují méně než 40 % dnů. Proto objektivizované verze není možné považovat za úplné náhrady manuálních metod, ale spíše za jejich rozšíření – o možnost přenést je do jiné geografické oblasti (Chen 2000) a na nové časové řady (James 2006); využity byly i při testování homogenity manuálních katalogů (James 2007; Jones, Harpham, Briffa 2013).

Většina automatizovaných postupů ovšem oba kroky provádí v rámci jednoho výpočtu. Za dobu 50letého užívání bylo těchto metod vyvinuto značné množství – jejich evoluce přitom odráží jak rozvoj klimatologie, matematiky a statistiky, tak i nárůst výkonnosti a dostupnosti výpočetní techniky. Jakkoli není možné obsáhnout všechny tyto metody, v zásadě je možné je rozdělit do několika málo skupin podle jejich koncepce.

První skupina metod, která byla oblíbená zejména v 60. a 70. letech, je založena na analýze podobnosti[9] všech párů denních map zvolené proměnné. Velká část

[8] Tj. zejména volba počtu tříd, oblasti a vstupních dat (proměnných) včetně jejich časového a prostorového rozlišení a délky řady (Yarnal, White 1987).

[9] Podobnost je zjišťována výpočtem prostorové korelace (Lund 1963), respektive sumy kvadratických odchylek (Kirchhofer 1974) mezi všemi páry hodnot (staničních či v síti uzlových bodů).

studií z této doby je věnována výhradně problematice stanovení typů, případně jejich elementární klimatologii (podmíněným průměrným denním teplotám a srážkám). Menší část se věnuje také vlivu cirkulace na přírodní sféru, například bilanci ledovců (Yarnal 1974), a možnostem využití cirkulačních typů ve statistických předpovědních modelech (Paegle 1974). Podrobný přehled klasifikací tohoto druhu publikovali El-Kadi a Smithson (1992).

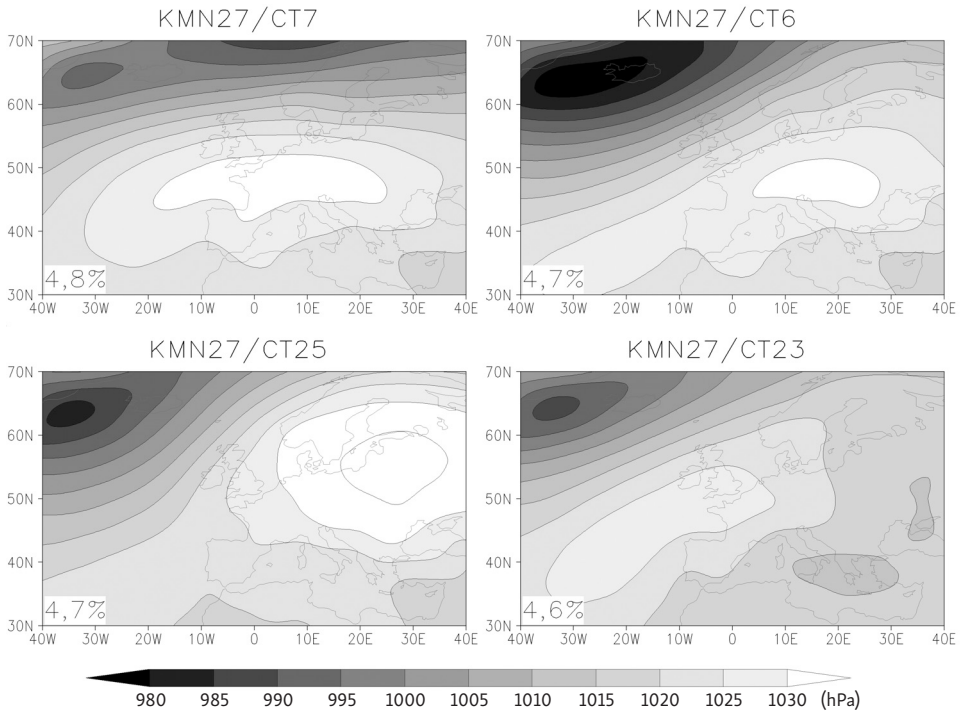
Od 80. let postupně přibývají nové motivace synopticko-klimatologického výzkumu v podobě poznání příčin klimatických extrémů[10] a také možného vlivu narůstající koncentrace $CO_2$ na klima (Cohen 1983). Stále více se také při studiu cirkulace uplatňují pokročilé (vícerozměrné) statistické metody, v první řadě různé varianty shlukové analýzy *(cluster analysis, CA)* a analýzy hlavních složek *(principal component analysis, PCA)*.

Existuje velké množství algoritmů shlukové analýzy, z nichž byly v synoptické klimatologii opakovaně použity metody *k-means* (obr. 2), *centroid*, *average linkage* a Wardova. Huth (1996a) provedl srovnání vybraných metod shlukové analýzy s ohledem na jejich schopnost definovat homogenní typy cirkulace. Existuje řada parametrů, podle kterých je možné metody hodnotit a porovnávat. Mezi důležité patří konzistentnost (nakolik je výsledná podoba typů ovlivněna malými změnami v nastavení parametrů metody) a stabilita (změny typů při zásahu do vstupních dat[11]). Zatímco dobrá klasifikace by měla být přiměřeně stabilní i konzistentní, požadavky na další vlastnosti se již mohou různit podle cíle výzkumu. Jedná se například o počet a velikost tříd a jejich separabilitu (vzájemnou odlišnost); zatímco některé algoritmy vytvářejí podobně velké shluky, jiné spojují většinu map do jedné třídy blízké klimatologickému průměru a zbylé odlehlé situace klasifikují do většího počtu nepočetných typů (tzv. efekt sněhové koule, *snowballing*). Druhá možnost může být žádoucí například při studiu extrémů.

Samotné shlukové analýze většinou předchází analýza hlavních složek za účelem snížení počtu proměnných a odstranění jejich kolinearity (Huth a kol. 2008). Analýza hlavních složek převádí soubor původních časových řad v jednotlivých bodech sítě na soubor jejich lineárních kombinací – tzv. hlavních složek. Ty jsou vzájemně nekorelované a zároveň platí, že několik prvních složek vysvětluje podstatnou část z celkového rozptylu původních dat. Výsledkem analýzy hlavních složek ovšem mohou být i samotné cirkulační typy (obr. 3). Rozhodující pro charakter výsledku analýzy je přitom uspořádání matice vstupních dat. K redukci dat a odstranění kolinearity proměnných se užívá analýzy hlavních složek v tzv. *s*-módu. V tomto případě je datová matice uspořádána tak, že sloupce odpovídají jednotlivým uzlovým bodům sítě (případně stanicím) a v řádcích jsou časové realizace (tj. většinou

[10] Např. období sucha v Sahelu, západní Evropě a severní Americe na konci šedesátých a v 70. letech.

[11] Např. do sítě uzlových bodů, v níž jsou data definována, či změny délky časové řady.

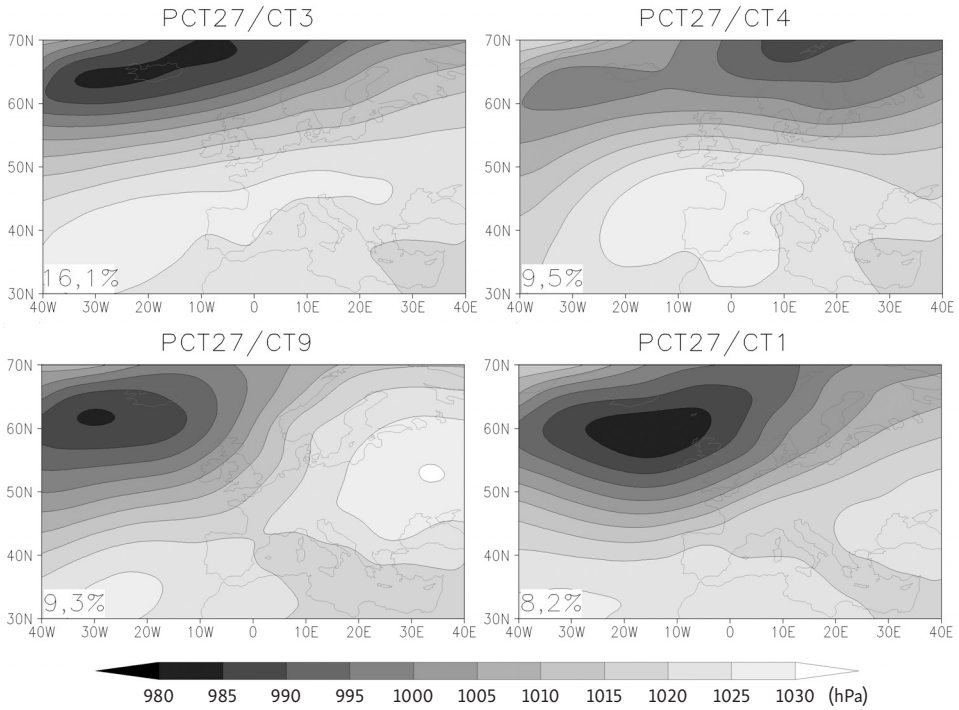



**Obr. 2** – Klasifikace atmosférické cirkulace do 27 tříd pomocí metody *k-means* (KMN27). Zobrazeny jsou 4 typy s nejvyšší relativní četností (viz levý dolní roh panelů) v zimách 1961–2000. Metoda má tendenci vytvářet srovnatelně velké shluky a jednotlivé třídy se prakticky vůbec neshodují s Brádkovými typy (viz obr. 4). Počet typů byl zvolen shodně s Brádkovou typizací (jeden brádkovský typ se v zimě nevyskytuje).

denní průměry) vstupní proměnné. Uspořádání inverzní – tzv. *t*-mód[12] – umožňuje vidět jednotlivé typy cirkulace zobrazením skóre hlavních složek do mapy; váhy naopak udávají, nakolik se příslušné pole cirkulační proměnné podobá jednotlivým typům (Huth 1996b, 2000; Compagnucci, Richman 2008). Výhodou analýzy hlavních složek v *t*-módu je oproti jiným klasifikačním metodám její schopnost odhalit takové shluky dat, které mají skutečně fyzikální základ (Huth 1996a).[13]

[12] Tj. časové realizace považujeme za proměnné (uspořádané ve sloupcích) a hodnoty v uzlových bodech sítě za jejich realizace (uspořádané po řádcích).

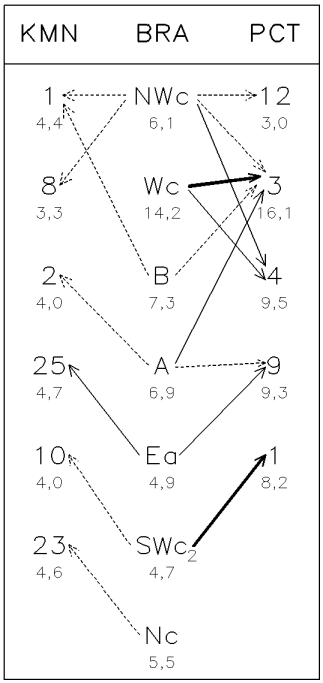
[13] Aby bylo tohoto dosaženo, je nicméně nutné primárně vypočtené hlavní složky podrobit tzv. rotaci, tedy pozměnit jejich směr v původním multidimenzionálním datovém prostoru tak, aby lépe popisovaly reálnou strukturu dat. Tento krok se nicméně neobejde bez ztráty schopnosti složek maximalizovat vysvětlený rozptyl, či dokonce ztráty jejich vzájemné nezávislosti (Richman 1986, Huth 1996b).




**Obr. 3** – Klasifikace atmosférické cirkulace do 27 tříd pomocí metody hlavních složek v *t*-módu a se šikmou rotací složek (PCT27). Zobrazeny jsou 4 typy s nejvyšší relativní četností (viz levý dolní roh panelů) v zimách 1961–2000. Variabilita četnosti jednotlivých typů (0,4–16,1 %) se blíží Brádkovým typům. Ve srovnání s KMN27 je mírně lepší i vzájemná shoda tříd (viz obr. 4); nicméně schopnost rozlišit mezi podobnými typy je špatná – například Brádkovy typy západní cyklonální (Wc; obr. 2) a severozápadní cyklonální (NWc; nezobrazeno) jsou klasifikovány rovnoměrně do CT3 a CT4.

V posledních letech se díky narůstajícímu výpočetnímu výkonu stále více uplatňují i nové metody, které se velmi náročnými výpočty snaží eliminovat některé slabiny metod tradičních. Jedná se zejména o některé optimalizované metody shlukové analýzy (simulované žíhání a SANDRA) a tzv. *self-organizing maps* (dále mapy SOM). Poměrně málo rozšířeným přístupem ke klasifikaci jsou tzv. *fuzzy* metody, které umožňují souběžnou klasifikaci map do více tříd zároveň; viz práce Bárdossyho, Stehlíka, Caspary ho a kol. (2002) a Stehlíka (2002). Tento přístup se sice zdá být vhodný k popisu cirkulace, která není jasně diferencována do rozdílných stavů, výsledek ovšem postrádá snadnou interpretovatelnost, což je jeho podstatným nedostatkem (Huth a kol. 2008).

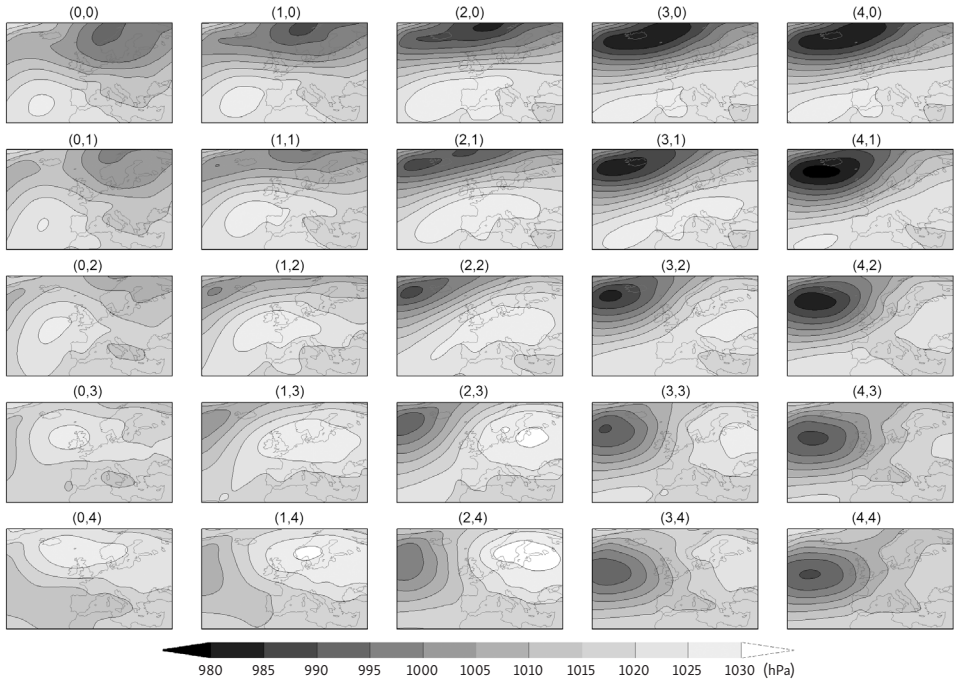
Simulované žíhání *(simulated annealing)* je optimalizovanou verzí metody *k-means*. Nevyhnutelným krokem *k-means* je inicializace výběrem určitého počtu výchozích bodů (tzv. *seed points*, např. denních map pole tlaku vzduchu




**Obr. 4** – Vzájemná shoda Brádkových typů (BRA) s typy definovanými metodami *k-means* (KMN, viz obr. 2) a hlavních složek (PCT, viz obr. 3). Uvedeno sedm nejpočetnějších Brádkových typů v zimách 1961–2000: severozápadní cyklonální (NWc), západní cyklonální (Wc), brázda nízkého tlaku nad střední Evropou (B), anticyklona nad střední Evropou (A), východní anticyklonální (Ea), jihozápadní cyklonální s frontou postupující SV až V směrem ($SWc_2$) a severní cyklonální (Nc). Pro KMN a PCT zobrazeny pouze ty typy, ke kterým je klasifikováno alespoň 15 % ze dnů náležících alespoň jednomu ze zde uvedených BRA. Typ čáry je mírou shody: přerušovaná – shodně klasifikováno 15–20 % dnů, nepřerušovaná slabá – 20–30 % dnů, nepřerušovaná silná – přes 30 % dnů. Pod indexem uvedena relativní četnost (%) typu v příslušném katalogu. V tomto případě považujeme BRA za referenční; srovnání je ale možné provést z pohledu jakékoliv jiné klasifikace. Schopnost automatizovaného postupu reprodukovat reálně se vyskytující typy cirkulace je považována za jednu z žádoucích vlastností metody; ověřit tuto schopnost je možné právě porovnáním s expertně stanoveným katalogem.

přepočteného na hladinu moře). Slabinou této metody je její tendence konvergovat k některému z mnoha tzv. lokálních optim – nejlepšímu možnému roztřídění dat při daném výběru výchozích bodů. Takové řešení přitom bývá výrazně horší než optimum globální, které ovšem není možno najít jinak než opakováním výpočtu ze všech možných variant výchozího nastavení, což je nereálné. V průběhu simulovaného žíhání není přesun objektů mezi třídami určen zvolenou mírou kvality daného řešení, jako tomu je u *k-means*, ale děje se „libovolně" s pravděpodobností přímo úměrnou kvalitě nového řešení a nepřímo úměrnou počtu proběhlých iterací. Tento postup tedy dočasným zhoršením průběžných řešení umožňuje vyhnout se špatným řešením konečným. Speciální, výpočetně extrémně náročnou verzí je tzv. SANDRA (*simulated annealing and diversified randomization)*, která postup simulovaného žíhání mnohokrát opakuje, čímž se dále zvyšuje pravděpodobnost dosažení globálního optima (Philipp a kol. 2007; obr. 4).

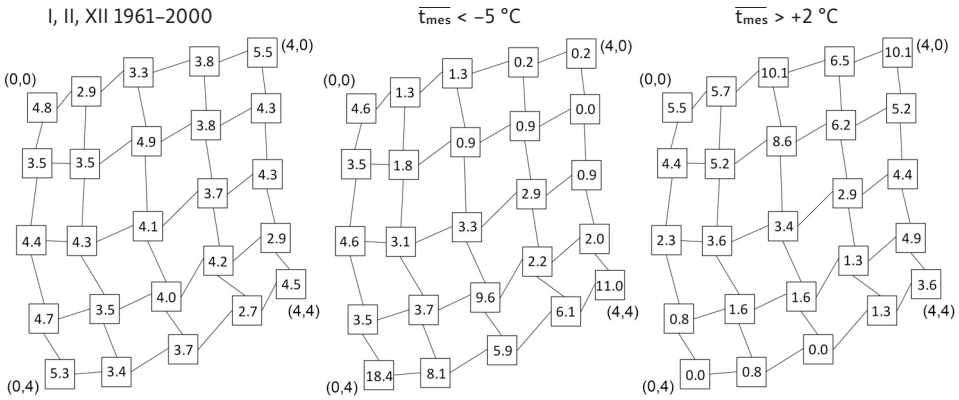
Mapy SOM jsou algoritmem neuronových sítí navrženým Kohonenem (1989) a v synoptické klimatologii jsou nejběžněji užívanou metodou tohoto druhu. Jejím cílem je proložení datového prostoru určitým předem zvoleným počtem tzv. nodů (jež v případě klasifikací cirkulace představují jednotlivé cirkulační typy) tak, aby tyto dobře reprezentovaly dílčí části datového prostoru. Nody lze inicializovat náhodně z množiny objektů (tj. jednotlivých polí cirkulace); všechny objekty se poté postupně (a v mnoha iteracích) porovnávají se všemi nody, jejichž pozice se v každé




**Obr. 5** – Mapa SOM cirkulačních typů nad Evropou. Území a data jako na obr. 2 a 3.

iteraci mění směrem k danému objektu. Velikost této změny je přitom nepřímo úměrná relativní vzdálenosti nodu a objektu – nody tak mají tendenci hromadit se v oblastech fázového prostoru s vysokou datovou hustotou. Samotná klasifikace následně probíhá jednoduše přiřazením objektů k nejbližšímu (nejpodobnějšímu) nodu. Podstatnou výhodou metody je možnost vizualizace nodů v uzlech 2D sítě – „mapy" (pro odlišení od jednotlivých map představujících cirkulační pole nebo cirkulační typy by bylo možná vhodné hovořit o „meta-mapě" – viz obr. 5). Relativní poloha nodů v síti přitom reflektuje jejich vzájemnou podobnost – nejvíce nepodobné typy jsou umístěny v protilehlých rozích. Míru nepodobnosti je možné vizualizovat pomocí tzv. Sammonova mapování (obr. 6), de facto schématu téže sítě, ovšem zdeformované tak, že vzdálenosti mezi všemi páry nodů jsou přímo úměrné jejich nepodobnosti (Hewitson, Crane 2002).

Ve stejné mapě lze ovšem (vedle polí původní proměnné) pro jednotlivé nody zobrazit i řadu dalších parametrů jako četnost a perzistenci typů (a jejich trendy), klimatologii typem podmíněných prvků, pravděpodobnost přechodů mezi typy či výskytu extrémů (Hewitson, Crane 2002; Sheridan, Lee 2011). Díky svým výhodám se mapy SOM těší v poslední době značné oblibě, ovšem vlastnosti takto získaných cirkulačních typů dosud nebyly porovnány s výsledky dosaženými „tradičními" metodami (Huth a kol 2008). Obdobně prozatím nebylo provedeno porovnání




**Obr. 6** – Sammonova mapa pro mapu SOM z obrázku 5. Zobrazena je relativní četnost dnů klasifikovaných k příslušným uzlům pro: všechny zimní měsíce 1961–2000 (vlevo), jen měsíce s průměrnou územní teplotou v Česku nižší než −5 °C (uprostřed), resp. vyšší než +2 °C (vpravo). Zdroj údajů o teplotě: ČHMÚ (2015).

výsledků získaných při velkém počtu různých nastavení parametrů této metody (Sheridan, Lee 2011).

## 4. Využití cirkulačních klasifikací při modelování klimatu

Významnou motivací klimatologického výzkumu je nalezení příčin proměnlivosti a trendů klimatu. Jednou z možných příčin časových změn klimatických prvků jsou přitom dlouhodobé změny cirkulace nebo změny vztahů mezi cirkulací a přízemními prvky. Kvalitativní skok tohoto studia umožnilo sestavení několika dlouhých řad pole tlaku vzduchu přepočteného na hladinu moře[14]. Z výsledků je mj. zřejmé, že vztah cirkulace a klimatických prvků je značně nestacionární, vzájemné korelace se přitom mění nejen co do velikosti, ale i znaménka (Jacobeit a kol. 2003; Beck, Jacobeit, Jones 2007; Philipp a kol. 2007; Cahynová, Huth 2014). Cirkulační klasifikace sehrály v tomto výzkumu značnou roli. Neméně významný se jeví i jejich potenciál při studiu cirkulace v neustále se množících výstupech klimatických modelů.

Schopnost modelů klimatu simulovat reálnou cirkulaci je minimálně stejně tak důležitá jako schopnost simulovat termodynamické a vlhkostní parametry atmosféry, alespoň v oblastech se silnou vazbou počasí a klimatu na atmosférickou cirkulaci. Zde bude mít klimatická změna nejen podobu jakési systematické

[14] V atlanticko-evropské oblasti se jedná například o rekonstrukce denních hodnot pro období 1850–2003 (Ansell a kol. 2006).

změny v hodnotách teplot a srážek, ale projeví se také změnami vlastností cirkulace (McKendry, Steyn, McBean 1995; Plavcová, Kyselý 2011). Zjištěné odchylky cirkulace v simulacích modelů pro současné klima od skutečnosti (většinou reprezentované reanalýzou) znamenají nespolehlivost projekcí vývoje cirkulačních typů v budoucnosti. To je obzvlášť významné v případě typů, na které jsou vázány význačné jevy (McKendry, Stahl, Moore 2006).

Ačkoli první práce zaměřené na studium cirkulace ve výstupech modelů klimatu byly publikovány již v samotných počátcích klimatického modelování, jejich rozvoj spadá až do doby nedávné. Mezi nejčastěji analyzované parametry patří četnost a perzistence cirkulačních typů. Jak bylo ovšem opakovaně ukázáno (Beck, Jacobeit, Jones 2007; Cahynová, Huth 2009a, 2010, 2014; Plavcová, Kyselý 2013), kolísání četnosti typů se na celkové proměnlivosti klimatických prvků podílí menším dílem; neméně významné jsou i další vlastnosti typů jako poloha a intenzita tlakových útvarů, zakřivení izobar či dráhy cyklon.

Stejně jako v jiných oblastech synopticko-klimatologického výzkumu, i analýzy modelů klimatu bývají založeny na jedné, nejvýše dvou klasifikačních metodách (Crane, Barry 1988; McKendry, Steyn, McBean 1995; McKendry, Stahl, Moore 2006; Anagnostopoulou, Tolika, Maheras 2009; Demuzere a kol. 2009; Pastor, Casado 2012; Plavcová, Kyselý 2012, 2013; Belleflamme, Fettweis, Erpicum 2014).[15] Výjimkou je v tomto ohledu práce Landgrena, Skaugena, Haugena (2013), kteří analyzovali ensemble regionálních klimatických modelů současně několika klasifikačními metodami. Díky tomu se podařilo identifikovat některé modely, které nejsou schopné správně simulovat cirkulaci – například její roční chod, což se odrazilo mj. v odchylkách v prostorové proměnlivosti srážkových úhrnů. Jednalo se o první práci tohoto druhu čerpající z výsledků mezinárodního projektu COST733 *„Harmonisation and Applications of Weather Type Classifications for European regions"* (Philipp a kol. 2010), v jejímž rámci byla vytvořena rozsáhlá databáze klasifikačních metod a také publikována řada prací porovnávajících metody s ohledem na různé aplikace v synoptické klimatologii. Volně dostupný software (COST 733 Wiki 2014), umožňující provádět klasifikace a vzájemně je porovnávat, je tak dostupným řešením, jak zvolit pro konkrétní cíl výzkumu tu nejvhodnější klasifikační metodu (Philipp a kol. 2014).

## 5. Závěr

Klasifikování atmosférické cirkulace bylo, je a jistě nadále i bude velmi oblíbenou metodou výzkumu různých oborů věd o atmosféře (v současnosti především

[15] Podrobnější přehled této tematiky je možné nalézt v práci Sheridan, Lee (2010).

synoptické klimatologie). Ačkoli bylo v posledních letech publikováno několik přehledových článků, které se tomuto tématu v různém rozsahu věnovaly, v české odborné literatuře prozatím podobný přehled chyběl. Cílem tohoto článku bylo zacelit tuto mezeru. Vzhledem k šíři problematiky bylo nicméně nutné se zaměřit na vybrané aspekty klasifikací – prostor byl dán přednostně vytvoření přehledu prací, kde byly cirkulační klasifikace využity za účelem poznání různých aspektů klimatu Česka (resp. Československa) a dále diskuzi silných a slabých stránek nejoblíbenějších metod. Vzhledem k silné tradici manuálních katalogů synoptických typů v Česku byl i zde dán této skupině metod prostor relativně výrazně větší, než je v podobných pracích obvyklé. To ovšem nic nemění na skutečnosti, že tváří v tvář novým výzvám klimatologie a ruku v ruce s novými výpočetními a datovými možnostmi význam automatizovaných metod narůstá a právě jim zcela jistě bude patřit budoucnost.

## Literatura

ANAGNOSTOPOULOU, C., TOLIKA, K., MAHERAS, P. (2009): Classification of circulation types: a new flexible automated approach applicable to NCEP and GCM datasets. Theoretical and Applied Climatology, 96, 1–2, 3–15.

ANSELL, T. J. a kol. (2006): Daily mean sea level pressure reconstructions for the European–North Atlantic region for the period 1850–2003. Journal of Climate, 19, 12, 2717–2742.

BÁRDOSSY, A., STEHLÍK, J., CASPARY, H.-J. (2002): Automated objective classification of daily circulation patterns for precipitation and temperature downscaling based on optimized fuzzy rules. Climate Research, 23, 1, 11–22.

BARRY, R. G., PERRY, A. H. (1973): Synoptic climatology. Methods and applications. Methuen, London.

BECK, C., JACOBEIT, 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, 4, 473–491.

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.

BERANOVÁ, R., HUTH, R. (2005): Long-term changes in the heat island of Prague under different synoptic conditions. Theoretical and Applied Climatology, 82, 1–2, 113–118.

BLENDER, R., FRAEDRICH, K., LUNKEIT, F. (1997): Identification of cyclone-track regimes in the North Atlantic. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 123, 539, 727–741.

BOWER, D., MCGREGOR, G. R., HANNAH, D. M, SHERIDAN, S. C. (2007): Development of a spatial synoptic classification scheme for western Europe. International Journal of Climatology, 27, 15, 2017–2040.

BRÁDKA, J. (1968): Typisace v meteorologii. Meteorologické zprávy, 21, 4, 122–125.

BRÁDKA, J., DŘEVIKOVSKÝ, A., GREGOR, Z., KOLESÁR, J. (1961): Počasí na území Čech a Moravy v typických povětrnostních situacích. Hydrometeorologický ústav, Praha.

BRÁZDIL, R., BUDÍKOVÁ, M., FAŠKO, P., LAPIN, M. (1995): Fluctuations of maximum and minimum air temperatures in the Czech and the Slovak Republics. Atmospheric Research, 37, 1–3, 53–65.

BRÁZDIL, R., CHROMÁ, K., DOBROVOLNÝ, P., TOLASZ, R. (2009a): Climate fluctuations in the Czech Republic during the period 1961–2005. International Journal of Climatology, 29, 2, 223–242.

BRÁZDIL, R., ŠTEKL, J. (1986): Cirkulační procesy a atmosférické srážky v ČSSR. Univerzita J. E. Purkyně, Brno.

BRÁZDIL, R., TRNKA, M., DOBROVOLNÝ, P., CHROMÁ, K., HLAVINKA, P., ŽALUD, Z. (2009b): Variability of droughts in the Czech Republic, 1881–2006. Theoretical and Applied Climatology, 97, 3–4, 297–315.

BRŮŽEK, V. (1982): Dlouhodobé kolísání teploty, srážek a cirkulace ve střední Evropě. Meteorologické zprávy, 35, 5, 136–140.

BRŮŽEK, V. (1986): Kolísání cirkulace ve vztahu ke slunečnímu svitu a možnosti jejich dlouhodobé předpovědi. Meteorologické zprávy, 39, 3, 76–80.

BRŮŽEK, V. (1987): Průběh srážek ve vztahu k cirkulaci. Meteorologické zprávy, 40, 1, 20–25.

CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2007a): Short note on inhomogeneities in the Hess-Brezowsky catalogue of circulation types. Meteorologický časopis, 10, 3, 171–174.

CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2007b): Trendy v kalendáři povětrnostních situací HMÚ/ČHMÚ v období 1946–2002. Meteorologické zprávy, 60, 6, 175–182.

CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2009a): Changes of atmospheric circulation in central Europe and their influence on climatic trends in the Czech Republic. Theoretical and Applied Climatology, 96, 1–2, 57–68.

CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2009b): Enhanced lifetime of atmospheric circulation types over Europe: fact or fiction? Tellus, 61A, 407–416.

CAHYNOVÁ, M., HUTH, R. (2010): Circulation vs. climatic changes over the Czech Republic: A comprehensive study based on the COST733 database of atmospheric circulation classifications. Physics and Chemistry of the Earth, 35, 9–12, 422–428.

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.

COHEN, S. J. (1983): Classification of 500 mb height anomalies using obliquely rotated principal components. Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 12, 1975–1988.

COMPAGNUCCI, R. H., RICHMAN, M. B. (2008): Can principal component analysis provide atmospheric circulation or teleconnection patterns? International Journal of Climatology, 28, 6, 703–726.

COMPO, G. P. a kol. (2011): The Twentieth century reanalysis project. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 137, 654, 1–28.

CRANE, R. G., BARRY, R. G. (1988): Comparison of the MSL synoptic pressure patterns of the Arctic as observed and simulated by the GISS general circulation model. Meteorology and Atmospheric Physics, 39, 3–4, 169–183.

ČEKAL, R. (2007): Analýza atmosférických příčin povodní na příkladu povodí horní Ohře. In: Langhammer, J. (ed.): Povodně a změny v krajině. Přírodovědecká fakulta Univerzity Karlovy v Praze, Ministerstvo životního prostředí ČR, Praha, 111–122.

DAVIS, R. E., ROSSIER, C. E., ENFIELD, K. B. (2012): The impact of weather on influenza and pneumonia mortality in New York City, 1975–2002: a retrospective study. PLOS ONE, 7, doi:10.1371/journal.pone.0034091.

DEJMAL, K., ŘEZÁČOVÁ, D. (1997): Regresní model pro předpověď bouřek. Vliv rozdělení podle synoptické situace na přesnost kategorické předpovědi. Meteorologické zprávy, 50, 4, 120–126.

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, 12, 1796–1810.

DROBEK, P., ŠOPKO, F. (2013): Aplikace hodnocení úspěšnosti meteorologických předpovědí v současném provozu předpovědní služby ČHMÚ. Meteorologické zprávy, 66, 2, 56–60.

FIŠÁK, J. (1999): Období s krátkým a dlouhým slunečním svitem na Milešovce (1946–1995). Meteorologické zprávy, 52, 1, 17–25.

EL-KADI, A. K. A., SMITHSON, P. A. (1992): Atmospheric classifications and synoptic climatology. Progress in Physical Geography, 16, 4, 432–455.

FRAKES, B., YARNAL, B. (1997): A procedure for blending manual and correlation-based synoptic classification. International Journal of Climatology, 17, 13, 1381–1396.

HANSLIAN, D., BRÁZDIL, R., ŠTEKL, J., KAKOS, V. (2000): Vliv cyklon středomořského původu na vysoké denní úhrny srážek na Milešovce a Lysé hoře v období 1961–1995. Meteorologické zprávy, 53, 2, 33–41.

HESS, P., BREZOWSKY, H. (1952): Katalog der Grosswetterlagen Europas. Berichte des Deutschen Wetterdienstes in der US-Zone, č. 33. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

HEWITSON, B. C., CRANE, R. G. (2002): Self-organizing maps: applications to synoptic climatology. Climate Research, 22, 1, 13–26.

HMÚ (1972): Katalog povětrnostních situací pro území ČSSR. Hydrometeorologický ústav, Praha.

HUTH, R. (1996a): An intercomparison of computer-assisted circulation classification methods. International Journal of Climatology, 16, 8, 893–922.

HUTH, R. (1996b): Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component analysis. Meteorology and Atmospheric Physics, 59, 3–4, 217–233.

HUTH, R. (2000): A circulation classification scheme applicable in GCM studies. Theoretical and Applied Climatology, 67, 1–2, 1–18.

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, 1, 105–152.

HUTH, R., POKORNÁ, L. (2004): Trendy jedenácti klimatických prvků v období 1961–1998 v České republice. Meteorologické zprávy, 57, 6, 168–178.

HUTH, R., POKORNÁ, L. (2005): Simultaneous analysis of climatic trends in multiple variables: an example of application of multivariate statistical methods. International Journal of Climatology, 25, 4, 469–484.

CHEN, D. (2000): A monthly circulation climatology for Sweden and its application to a winter temperature case study. International Journal of Climatology, 20, 10, 1067–1076.

CHLÁDOVÁ, Z., KALVOVÁ, J. (2005): Změny vybraných klimatických charakteristik v České republice v období 1961–2000. Meteorologické zprávy, 58, 5, 146–153.

IĽKO, J. (1982): Zmeny extrémnych denných teplot v Bratislave v priebehu rôznych synoptickych procesov. Meteorologické zprávy, 35, 2, 42–45.

JACOBEIT, J., WANNER, H., LUTERBACHER, J., BECK, C., PHILIPP, A., STURM, K. (2003): Atmospheric circulation variability in the North-Atlantic-European area since the mid-seventeenth century. Climate Dynamics, 20, 4, 341–352.

JAMES, P. M. (2006): An assessment of European synoptic variability in Hadley Centre Global Environmental models based on an objective classification of weather regimes. Climate Dynamics, 27, 2–3, 215–231.

JAMES, P. M. (2007): An objective classification method for Hess and Brezowsky Grosswetterlagen over Europe. Theoretical and Applied Climatology, 88, 1–2, 17–42.

JONES, G. V., DAVIS, R. E. (2000): Using a synoptic climatological approach to understand climate-viticulture relationship. International Journal of Climatology, 20, 8, 813–837.
JONES, P. D., HARPHAM, C., BRIFFA, K. R. (2013): Lamb weather types derived from reanalysis products. International Journal of Climatology, 33, 5, 1129–1139.
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, 6, 655–663.
KAUFMANN, P., WEBER, R. O. (1996): Classification of mesoscale wind fields in the MISTRAL field experiment. Journal of Applied Meteorology, 35, 11, 1963–1979.
KIRCHHOFER, W. (1974): Classification of European 500 mb patterns. Arbeitsbericht der Schweizerischen Meteorologischen Zentralanstalt, 43, Zürich.
KNOZOVÁ, G., HORA, P. (2010): Vyhodnocení meteorologických podmínek doprovázejících smogové epizody v České republice. Meteorologické zprávy, 63, 1, 21–28.
KOHONEN, T. (1989): Self-organization and associative memory. Springer-Verlag, Berlin.
KRŠKA, K. (1969): Ještě několik poznámek k československým typizacím povětrnostních situací. Meteorologické zprávy, 22, 2, 35–38.
KŘIVANCOVÁ, S., VAVRUŠKA, F. (1997): Základní meteorologické prvky v jednotlivých povětrnostních situacích na území České republiky v období 1961–1990. Český hydrometeorologický ústav, Praha.
KVĚTOŇ, V., ŽÁK, M. (2011): Vliv středomořských tlakových níží na kalamitní sněžení v České republice. Meteorologické zprávy, 64, 5, 129–136.
KYSELÝ, J. (2002): Temporal fluctuations in heat waves at Prague-Klementinum, the Czech Republic, from 1901–97, and their relationships to atmospheric circulation. International Journal of Climatology, 22, 1, 33–50.
KYSELÝ, J., HUTH, R. (2004): Heat-related mortality in the Czech Republic examined through synoptic and 'traditional' approaches. Climate Research, 25, 3, 265–274.
KYSELÝ, J., HUTH, R. (2006): Changes in atmospheric circulation over Europe detected by objective and subjective methods. Theoretical and Applied Climatology, 85, 1–2, 19–36.
KYSELÝ, J., KAKOS, V., HOLÁSKOVÁ, O. (2008): Dlouhodobé změny četnosti povodní na Vltavě v Praze a na Labi v Děčíně ve vztahu k atmosférické cirkulaci a významným srážkám. Meteorologické zprávy, 61, 1, 5–13.
KYSELÝ, J., KALVOVÁ, J. (1998): Horké vlny na Jižní Moravě v letech 1961–1990. Meteorologické zprávy, 51, 3, 65–72.
LAMB, H. H. (1972): British Isles weather types and register of daily sequence of circulation patterns, 1861–1971. Geophysical Memoir, č. 116. Her Majesty's Stationery Office, London.
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, 1, 56–65.
MAKRA, L., MIKA, J., BARTZOKAS, A., BÉCZI, R., SÜMEGHY, Z. (2009): Comparison of objective air-mass types and the Péczely weather types and their ability to classify levels of air pollutants in Szeged, Hungary. International Journal of Environment and Pollution, 36, 1–3, 81–98.
MAKRA, L., MIKA, J., BARTZOKAS, A., BÉCZI, R., BORSOS, E. SŰMEGHY, Z. (2006): An objective classification system of air mass types for Szeged, Hungary with special interest to the levels of the main air pollutants. Meteorology and Atmospheric Physics, 92, 1–2, 115–137.

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, 4, 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, 12, 1727–1736.

MINĎÁŠ, J., ŠKVARENINA, J. (1995): Výskyt a charakteristika hmiel na Slovensku v období 1971–1989. Meteorologické zprávy, 48, 5, 133–139.

OBREGÓN, M. A., SERRANO, A., CANCILLO, M. L., GARCÍA, J. A. (2011): Classification of air masses arriving at Cáceres (Spain) and its relationship with their aerosol load. Proceedings of the Global Conference on Global Warming 2011. Lisbon, Portugal, 1–8.

PAEGLE, J. N. (1974): Prediction of precipitation probability based on 500-mb flow types. Journal of Applied Meteorology, 13, 2, 213–220.

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, 7–8, 2059–2077.

PHILIPP, A., BARTHOLY, J., BECK, C., ERPICUM, M., ESTEBAN, P., FETTWEIS, X., HUTH, R., JAMES, P., JOURDAIN, S., KREIENKAMP, F., KRENNERT, T., LYKOUDIS, S., MICHALIDES, S., PIANKO, K., POST, P., RASILLA ÁLVAREZ, D., SCHIEMANN, R., SPEKAT, A., TYMVIOS, F. S. (2010): COST733cat – A database of weather and circulation type classifications. Physics and Chemistry of the Earth, 35, 9–12, 360–373.

PHILIPP, A., BECK, C., HUTH, R., JACOBEIT, 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., JACOBEIT, 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, 16, 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, 4, 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, 7–8, 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, 3–4, 625–634.

REIN, F. (1959): Typizace počasí podle zásad dynamické klimatologie. Hydrometeorologický ústav, Brno.

RICHMAN, M. B. (1986): Rotation of principal components. Journal of Climatology, 6, 3, 293–335.

SANDEV, M., ŠEDIVKA, J. (2002): Porovnání zim 1989–2001 s normálem 1961–1990 v České republice. Meteorologické zprávy, 55, 5, 129–135.

SCHWARTZ, M. D. (1996): An air mass-based approach to regional GCM validation. Climate Research, 6, 3, 227–235.

SHERIDAN, S. C., LEE, C. C. (2010): Synoptic climatology and the general circulation model. Progress in Physical Geography, 34, 1, 101–109.

SHERIDAN, S. C., LEE, C. C. (2011): The self-organizing map in synoptic climatological research. Progress in Physical Geography, 35, 1, 109–119.

SLABÝ, S. (1989): Četnosti povětrnostních situací na území ČSSR. Meteorologické zprávy, 42, 3, 69–72.
STARÝ, J. (1989): Rozbor výskytu povětrnostních situací a počasí s nimi spojeného. Sborník prací ČHMÚ, Sv. 35. Hydrometeorologický ústav, Praha.
STEHLÍK, J. (2002): Objektivní klasifikace cirkulačních typů pro území České republiky. Meteorologické zprávy, 55, 2, 40–49.
ŠÁLEK, M., RADA, J., KRÁL, D. (2006): Vliv automatizace a informačních technologií na meteorologickou předpovědní praxi. Meteorologické zprávy, 59, 6, 172–182.
ŠIMEK, M. (2000): Větrné poměry letiště Brno-Tuřany a jejich vliv na letový provoz. Meteorologické zprávy, 53, 1, 16–22.
TOLASZ, R. a kol. (2007): Atlas podnebí Česka 1961–2000. Český hydrometeorologický ústav, Univerzita Palackého v Olomouci, Praha, Olomouc.
VRAC, M., HAYHOE, K., STEIN, M. (2007): Identification and intermodel comparison of seasonal circulation patterns over North America. International Journal of Climatology, 27, 5, 603–620.
WEUSTHOFF, T. (2011): Weather type classification at MeteoSwiss – Introduction of new automatic classifications schemes. Arbeitsberichte der MeteoSchweiz, č. 235. MeteoSchweiz, Zürich.
YARNAL, B. (1974): Relationships between synoptic-scale atmospheric circulation and glacier mass balance in South-Western Canada during the International Hydrological Decade, 1965–74. Journal of Glaciology, 30, 105, 188–198.
YARNAL, B., WHITE, D. A. (1987): Subjectivity in a computer-assisted synoptic climatology I: Classification results. Journal of Climatology, 7, 2, 119–128.
ŻMUDZKA, E. (2013): The influence of circulation patterns on extreme thermal resources in the growing season and the period of active plant growth in Poland (1951–2006). Meteorologische Zeitschrift, 22, 5, 541–549.

**Zdroje dat a SW**

COST 733 WIKI (2014): Harmonisation and applications of weather type classifications for European regions, http://cost733.geo.uni-augsburg.de (1. 12. 2014).
ČHMÚ (2014): Typizace povětrnostních situací pro území České republiky, http://www.chmi.cz/portal/dt?menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_12_Typizace_situaciP4_1_12_Typizace_situaci (2. 6. 2014).
ČHMÚ (2015): Územní teploty, http://portal.chmi.cz/portal/dt?menu=JSPTabContainer/P4_Historicka_data/P4_1_Pocasi/P4_1_4_Uzemni_teploty (12 .2. 2015).
ESRL (2015): 20th Century Reanalysis (v2), http://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.20thC_ReanV2.html (10. 2. 2015).
HELSINKI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (2015): NNRC Programs, SOM_PAK software package, http://www.cis.hut.fi/research/som-research/nnrc-programs.shtml (1. 2. 2015).

## SUMMARY

### Classifications of atmospheric circulation

General circulation is one of the main climatic factors. There is a relatively close relationship between large-scale atmospheric motions and local weather and climate. Weather forecasts

used to be based on this relationship prior to the progress of computers and the development of numerical prediction methods. Over the last several decades, however, research into the ways the local/regional climate is driven by the large-scale atmospheric circulation has expanded.

Atmospheric circulation varies considerably both in time and space. Consequently, a relatively small number of distinct states (patterns) are usually applied to simplify it. The most common tool for acquiring this kind of simplification consists in classifying atmospheric circulation patterns, resulting in a small number of circulation types.

The field of circulation classifications is quite wide. In this paper, we present an overview of synoptic climatological studies related to Czechia, and within it, a discussion of the most often used methods. To our knowledge, despite the popularity of circulation classifications in Czechia, such an overview has not been published yet.

Two groups of classification methods are usually distinguished in literature: manual (subjective) and automated (objective). In Czechia, two manual catalogues have been widely used – Brádka's and Hess-Brezowsky's – to study the synoptic forcing of various climatic and environmental elements and phenomena. However, some intrinsic drawbacks prevent manual methods from being used in some cases. Subjectivity of the classification process may also lead to inhomogeneities. One way to avoid the deficiencies of manual methods is classification automation.

Since the 1960s, many automated methods have been used, among the most prominent being algorithms of cluster and principal component analyses and neural networks. The main drawback of automated methods is related to the fact that atmospheric circulation lacks clear inner structures. As a result, every method tends to produce the results bearing little resemblance to those obtained by most other methods, and finding the optimum one for a certain purpose requires a broad comparison of methods. To assist the method of selection, a tool for creating and comparing circulation classifications was created (COST 733 Wiki 2014).

Since automated classifications are much less laborious than manual methods, many studies have been published covering a wide range of research topics and geographical regions; one of the fastest growing fields has been the application of circulation types in analyses of climate model outputs.

Fig. 1 The most frequent types in the Brádka's catalogue (1961–2000, DJF) and their relative frequency. Grey fields denote areas of low air pressure. For type description see Figure 4.

Fig. 2 Classification of daily mean sea level pressure fields (1961–2000, DJF) using a k-means algorithm (KMN27). The most frequent of the total 27 types and their relative frequency are shown.

Fig. 3 Classification of daily mean sea level pressure fields (1961–2000, DJF) using the t-mode principal component analysis with the oblique rotation of principal components (PCT27). The most frequent of the total 27 types are shown. The method tends to create similarly large clusters. The individual classes concur with Brádka's types only partially (see Fig. 4), however the result is better compared with KMN27. The number of the types was chosen in accordance with Brádka's classification (one Brádka's type does not occur in winter).

Fig. 4 Mutual correspondence of the seven most frequent Brádka's types (BRA; 1961–2000, DJF) and the types defined by KMN27 and PCT27. For KMN27 and PCT27, only types containing at least 15% of the days classified within any of the shown BRA are shown.

The arrows show the rate of the correspondence: dashed (15–20%), solid (20–30%), and solid bold (over 30%). Under the type indexes, the relative frequencies of the respective type and catalogue are shown. BRA indexes stand for the following situations: northwest cyclonic (NWc), west cyclonic (Wc), stationary trough/anticyclone over central Europe (B/A), east anticyclonic (Ea), southwest cyclonic with fronts moving northeast to eastwards ($SWc_2$), and north cyclonic (Nc).

Fig. 5 SOM of circulation types over Europe (1961–2000, DJF).

Fig. 6 Sammon map for the SOM in Figure 5. The relative frequency of daily sea level pressure patterns classified to each node is shown for: left – all winter months 1961–2000, middle – months with the mean temperature in Czechia under –5 °C, right – months with the mean temperature over +2 °C.

## PODĚKOVÁNÍ

Článek byl podpořen GA UK, projekt č. 188214 „Využití synoptických klasifikací v interpretaci výstupů z klimatických modelů“.
Autoři děkují anonymním recenzentům za připomínky k předchozí verzi tohoto článku.