

Univerzita Karlova v Praze
Přírodovědecká fakulta

Geografie
Fyzická geografie a geoeekologie



Bc. Lea Paličková

Časová stabilita vlivů 11-letého slunečního cyklu na cirkulační poměry
ve střední Evropě

Temporal stability of effects of the 11-year solar cycle on circulation conditions
in central Europe

Diplomová práce

Vedoucí diplomové práce: RNDr. Radan Huth, DrSc.

Praha, 2015

Zadání diplomové práce

Název práce

Časová stabilita vlivů 11-letého slunečního cyklu na cirkulační poměry ve střední Evropě

Cíle práce

Cílem rešeršní části práce je shrnout poznatky o vlivech proměnlivosti sluneční aktivity spojené s 11-letým slunečním cyklem na atmosférickou cirkulaci ve střední Evropě, s důrazem na četnosti synoptických typů. Vlastní analýza se bude věnovat vztahům mezi sluneční aktivitou a rekonstruovanými četnostmi měsíčních cirkulačních typů ve střední Evropě podle Becka od r. 1780, případně i jinými rekonstrukcemi cirkulačních charakteristik, jako je např. Severoatlantická oscilace, zonální indexy a jiné klasifikace. Součástí práce bude i zjištění, nakolik jsou vztahy mezi sluneční aktivitou a atmosférickou cirkulací stabilní v čase. Práce je příspěvkem k mezinárodnímu projektu COST ES1005 (Towards a more complete assessment of the impact of solar variability on the Earth's climate).

Použité pracovní metody, zájmové území, datové zdroje

Data o sluneční aktivitě budou kvantifikována Wolfovými čísly, která jsou v měsíčním rozlišení k dispozici na veřejně přístupných webových stránkách, např. Královské observatoře v Bruselu nebo NOAA (<http://www.ngdc.noaa.gov/stp/solar/ssndata.html>) od r. 1749. Atmosférická cirkulace bude popsána průměrnými měsíčními cirkulačními typy, charakterizujícími cirkulační poměry nad střední Evropou od r. 1780 do r. 1995. Jádrem práce bude analýza rozdílů četností jednotlivých cirkulačních typů a jejich skupin mezi obdobími s nízkou, střední a vysokou sluneční aktivitou, přičemž budou navzájem porovnány různé definice nízké a vysoké sluneční aktivity.

Datum zadání: 28. 2. 2014

Jméno studenta: Bc. Lea Paličková

Podpis studenta:

Jméno vedoucího práce: RNDr. Radan Huth, DrSc.

Podpis vedoucího práce:

Prohlašuji, že jsem závěrečnou práci zpracovala samostatně a že jsem uvedla všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

V Jičíně dne 10. srpna 2015

.....

Bc. Lea Paličková

Na tomto místě bych chtěla poděkovat RNDr. Radanu Huthovi, DrSc. za odborné vedení při psaní této práce a cenné připomínky.

Časová stabilita vlivů 11-letého slunečního cyklu na cirkulační poměry ve střední Evropě

Abstrakt

Práce si dává za cíl zjistit, zda jsou cirkulační poměry ve střední Evropě ovlivněny proměnlivou úrovní sluneční atmosféry. Pro účely této diplomové práce je použita klasifikace atmosférické cirkulace dle Becka (2000), jež díky rekonstruovaným hodnotám podává přehled o cirkulačních podmínkách zpětně do roku 1780.

Tato diplomová práce prokázala, že vliv sluneční proměnlivosti na cirkulační poměry nad střední Evropou není v čase stálý. Bylo zjištěno, že četnosti jednotlivých cirkulačních typů se výrazně liší v závislosti na délce zkoumaného období. Vliv proměnlivosti sluneční aktivity na cirkulační poměry střední Evropy je více patrný při zpracování kratšího časového období.

Rovněž bylo zjištěno, že odezva cirkulačních charakteristik na změny v úrovni sluneční aktivity není okamžitá. Při zkoumání toho, zda s prodlužující se odezvou atmosféry na úroveň sluneční aktivity existuje lineární trend, nebylo dosaženo jednoznačného výsledku. Lineární trend je patrný pouze pro zpracování dat za celý rok při zpoždění atmosféry do jednoho roku. Práce dokazuje, že ovlivnění troposféry proměnlivostí sluneční aktivity je komplexní proces a je velmi obtížné jej jednoznačně definovat.

Klíčová slova: atmosférická cirkulace, cirkulační typy, troposféra, sluneční aktivita, 11-letý sluneční cyklus

Temporal stability of effects of the 11-year solar cycle on circulation conditions in central Europe

Abstract

The aim of this master thesis is to determine whether circulation conditions in central Europe are affected by variable solar activity. Circulation type classification by Beck (2000) is used here to evaluate the solar effects. Circulation characteristics of circulation are available back to 1780.

This master thesis proves that the solar cycle effects on circulation conditions in central Europe are not stationary in time. It was demonstrated that the frequency of individual circulation types varies significantly, depending on the length of studied period. The impact of solar variability on circulation conditions in central Europe is more significant when a shorter time period is being considered.

It was also found that the response of circulation characteristics on solar variability is not immediate. There have not been clear results if there exists a linear trend on lagged response of solar variability on circulation characteristics. Linear trend has been found only for a whole year dataset with a lagged response within a year. This thesis proves that the solar cycle effects on troposphere are highly variable, so it is very difficult to define them straightforward.

Keywords: atmospheric circulation, circulation types, troposphere, solar activity, 11-year solar cycle

Obsah

1 Úvod.....	2
2 Sluneční aktivita	3
2.1 Mechanismy přenášející sluneční signál do troposféry	7
3 Synoptická klasifikace	12
4 Projevy proměnlivé sluneční aktivity v zemské troposféře	14
4.1 Módy proměnlivosti	16
4.1.1 NAO - Severoatlantická oscilace	17
4.1.2 AO - Arktická oscilace	22
4.2 Blokující anticyklony.....	24
4.3 Cirkulační podmínky	26
4.4 Teplotní podmínky	27
5 Hypotéza.....	32
6 Data a metodika	34
6.1 Zdroje dat	34
6.2 Datové soubory.....	36
6.3 Statistické testy.....	40
6.4 Statistické zpracování	41
7 Výsledky.....	43
7.1 Porovnání s prací Huth et al. (2008)	43
7.2 Cirkulační charakteristiky v období 1780 až 1995	47
7.3 Vliv členění úrovně sluneční aktivity na výsledky	51
7.4 Změna četnosti cirkulačních typů s rostoucím zpožděním atmosféry	53
8 Diskuse	58
9 Závěr.....	61
10 Seznam obrázků a tabulek	62
10.1 Seznam příloh.....	64
11 Použitá literatura a zdroje dat	65
11.1 Použitá literatura.....	65
11.2 Zdroje dat	72
12 Přílohy.....	73

1 Úvod

Proměnlivá sluneční aktivita je jedním z přirozených faktorů ovlivňujících zemské klima, obdobně jako například vulkanické erupce. Příspěvek proměnlivé sluneční aktivity k současné změně klimatu je řádově menší než v případě nárůstu koncentrací skleníkových plynů, změn využívání krajiny nebo již zmíněných sopečných erupcí (Lockwood, 2012). I přesto je nezbytné proměnlivou sluneční aktivitu sledovat apochopit mechanismy, jimiž i malé změny v sluneční iradianci mohou výrazně pozměnit parametry v troposféře (např. Gray et al., 2010; Haigh, 2003; Woollings et al., 2010 aj.).

Ovlivnění sluneční aktivitou je řádově výraznější na regionální úrovni. Protože je Evropa jedním z regionů světa, kde je vliv sluneční proměnlivosti na klima nejvýraznější (např. Lockwood, 2012), je pro nás nezbytné jej studovat. V teoretické rovině je pak možné takto získané poznatky aplikovat a využít je mimo jiné pro dlouhodobou předpověď na základě změn ve sluneční aktivitě.

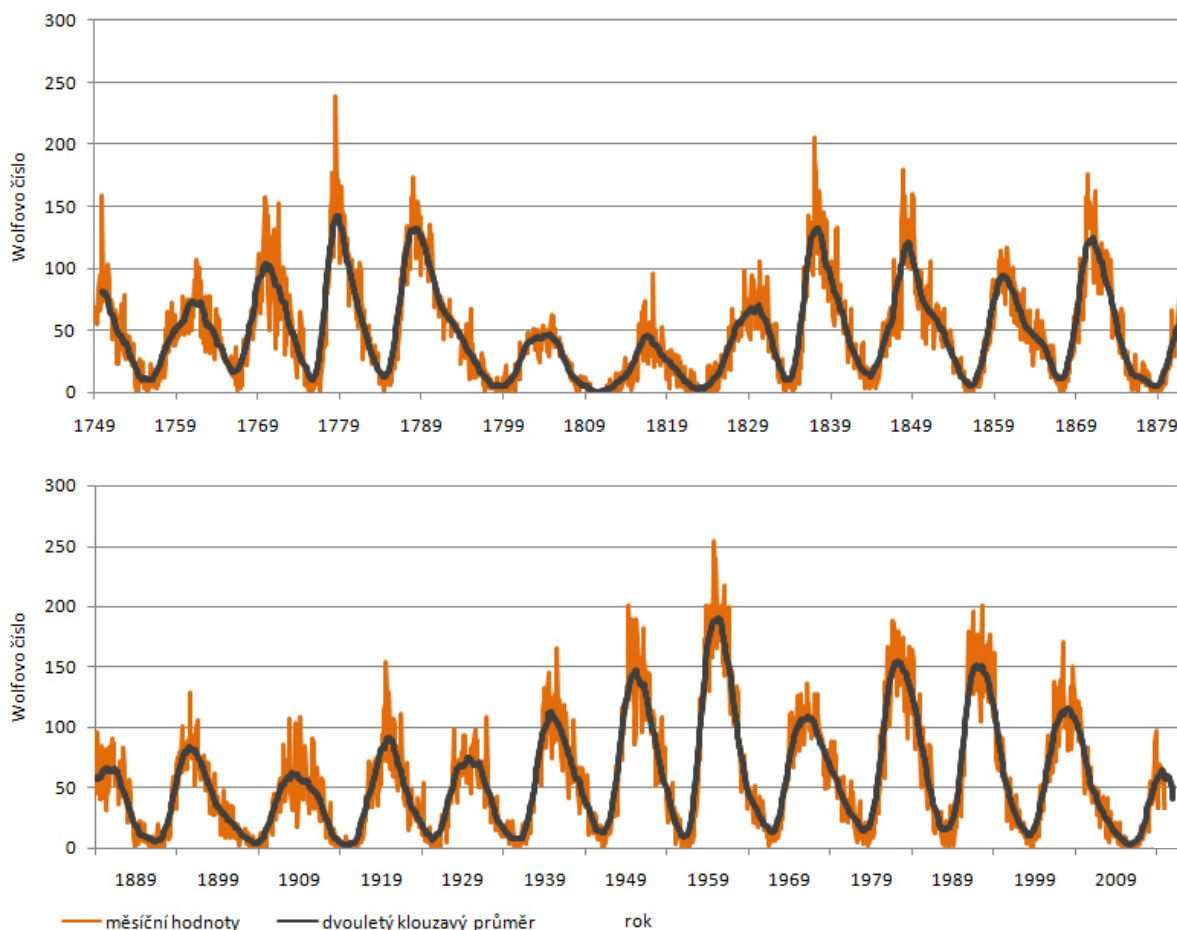
Cílem této diplomové práce je zjistit, zda sluneční aktivita ovlivňuje cirkulační poměry ve střední Evropě. K tomuto účelu je použita synoptická klasifikace dle Becka (2000), jež definuje jednotlivé cirkulační typy pouze na základě charakteristik míry zonality, meridionality a cyklonality. Jedním z bodů praktické části této práce je rovněž porovnat dosažené výsledky s prací Huth et al. (2008). Zmínění autoři tuto problematiku zkoumali s použitím odlišné synoptické klasifikace.

2 Sluneční aktivita

První domněnka o tom, že změny sluneční aktivity mohou mít vliv na podmínky v troposféře, a tím nepřímo zasáhnout i do života společnosti, pochází z přelomu 18. a 19. století. Roku 1801 ji vyslovil anglický vědec Herschel, který vypožoroval, že cena obilí se odvíjí od počtu viditelných slunečních skvrn. Ze svých pozorování vyvodil, že v období s nižším počtem skvrn vypadává méně srážek (Svensmark, 2000).

První vědecké doklady o proměnlivosti sluneční aktivity pak můžeme nalézt v roce 1843, kdy německý astronom Schwabe objevil a poprvé popsal, jak počet slunečních skvrn osciluje mezi minimy a maximy sluneční aktivity s periodicitou přibližně 10 let (Benestad, 2002). O několik let později jeho výzkumy popravil Wolf, jenž délku slunečního cyklu určil přibližně na 11 let. V obrázku 1 je znázorněn průběh sluneční aktivity mezi lety 1749 až 2014, jež je vyjádřena měsíčními hodnotami Wolfova čísla. Na grafu je zřetelně vidět, že na přelomu 18. a 19. století došlo k výraznému útlumu aktivity. Toto období se nazývá Daltonovo minimum (Lockwood, 2010).

Od těch dob došlo v oblasti věd o Slunci a porozumění jeho ovlivnění života na Zemi k velkému pokroku. K měření úrovně sluneční aktivity se už nepoužívají pouze pozorování počtu slunečních skvrn. S technickým pokrokem se rozšířilo spektrum možností, jak přístrojově kvantifikovat veličiny spojené s měnící se úrovní sluneční aktivity, a v současné době jsme schopni měřit energetické toky vysílané Sluncem, které přímo zasahují naši planetu. K měření úrovně sluneční aktivity se dá použít několik ukazatelů s rozdílnou přesností výstupních hodnot (Benestad, 2002) - viz obrázek 2.

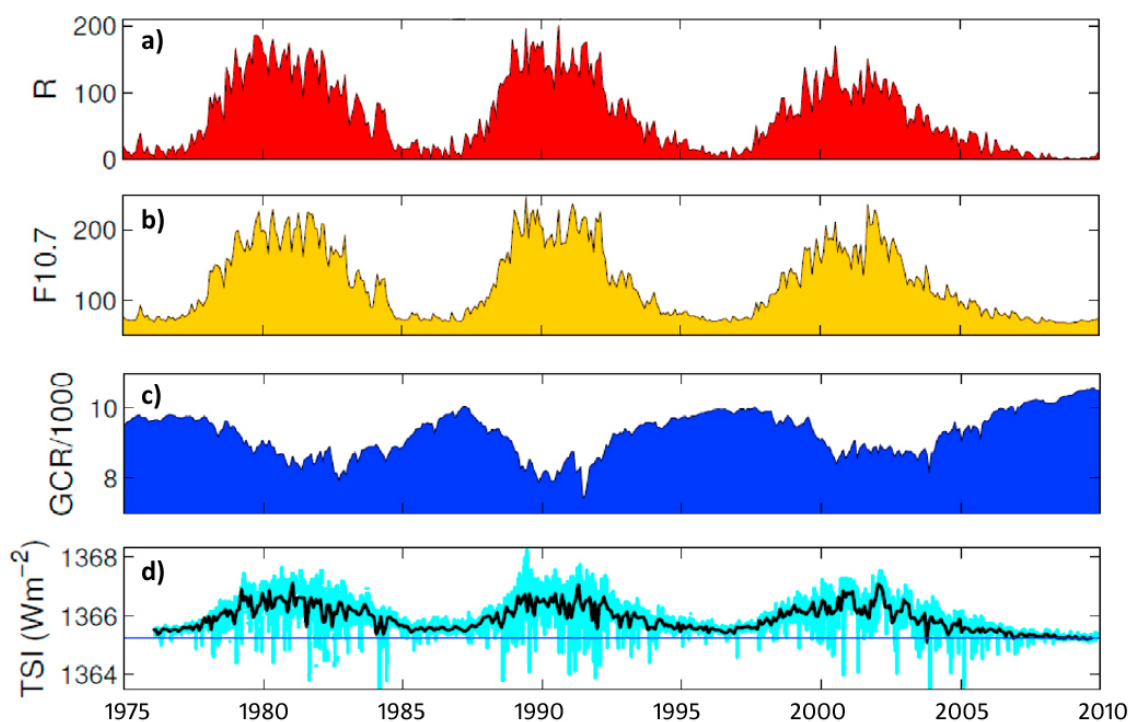


Obrázek 1: Průběh sluneční aktivity v letech 1749 až 2014

Dvouletý klouzavý průměr, jenž je v grafu znázorněn černou barvou, dobře znázorňuje to, co popisuje např. Benestad (2002), a sice že vzestupná větev slunečního cyklu je strmější než sestupná větev.

Nejdostupnějšími daty pro studie zahrnující delší časové období jsou hodnoty Wolfova čísla, jež vyjadřují okamžité počty slunečních skvrn či jejich skupin (Benestad, 2002). O tom, že Slunce není stále stejné a na jeho povrchu se objevují tmavé oblasti, lidé věděli už ve starověkém Řecku. Díky vynálezu dalekohledu Galileem na počátku 17. století můžeme s přesnými počty slunečních skvrn pracovat zpětně až do roku 1611 (Benestad, 2002). To nám tak v současné chvíli dává informace o chování Slunce pro více než 400 let.

Dalším velmi často používaným indikátorem je sluneční rádiový tok na vlnové délce 10,7 cm. Ten je vysoce korelován se slunečním cyklem (viz obrázek 2) a v porovnání s Wolfovým číslem se jedná o objektivnější sumarizaci sluneční aktivity (např. Van Loon a Shea, 1999), která zároveň dle Benestada (2002) podává i přesnější informace o proměnlivém Slunci než kvantifikace počtu slunečních skvrn.



Obrázek 2: Vzájemný vztah proměnných charakterizujících úroveň sluneční aktivity
 Graf a) zobrazuje počty slunečních skvrn, graf b) sluneční rádiový tok na vlnové délce 10,7 cm, graf c) globální kosmické záření měřené v minutových intervalech a graf d) celkovou sluneční iradianci.

zdroj: Gray et al., 2010

Celková sluneční iradiance, jež je dalším možným indikátorem sluneční aktivity, je měřena od roku 1978, kdy byly na oběžnou dráhu Země vypuštěny první družice s měřicími přístroji. Použití celkové sluneční iradiance je nicméně poněkud problematické, protože rozdílné družice nám ve stejném okamžiku udávají různé její hodnoty. Dlouhou dobu se pro celkovou sluneční iradianci jako určující uváděla hodnota $1365,4 \pm 1,3 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (viz obrázek 2). Díky nejnovějším studiím (Kopp a Lean, 2011) pak byla tato hodnota poopravena a v současné době je uvažována hodnota celkové sluneční iradiance $1361 \pm 0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Změna celkové sluneční iradiance v rámci jednoho jedenáctiletého slunečního cyklu na horní hranici atmosféry činí přibližně $1 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (např. Douglass a Clader, 2002), což v procentuálním vyjádření v rámci jednoho slunečního cyklu představuje změnu o cca 0,073 %. Velmi zajímavé je, jak ve své práci uvádí Ermolli et al. (2013), že změny celkové sluneční iradiance jsou podstatně větší v rozmezí několika málo dní. Dle autorů dosahují tyto krátkodobé výkyvy celkové sluneční iradiance řádově dvakrát až třikrát větší amplitudy než změny během jedenáctiletého slunečního cyklu.

Pokud se zaměříme na jednotlivé části spektra slunečního záření, nejsou ve všech z nich změny takto nepatrné. V ultrafialové části spektra dochází během slunečního cyklu k nepoměrně výraznějším výkyvům. Amplituda úhrnu UV záření v závislosti na úrovni sluneční aktivity kolísá v rozmezí cca 6 až 8 %, kdy období s vyšším příkonem UV záření odpovídají obdobím vysoké sluneční aktivity (Coughlin a Tung, 2004).

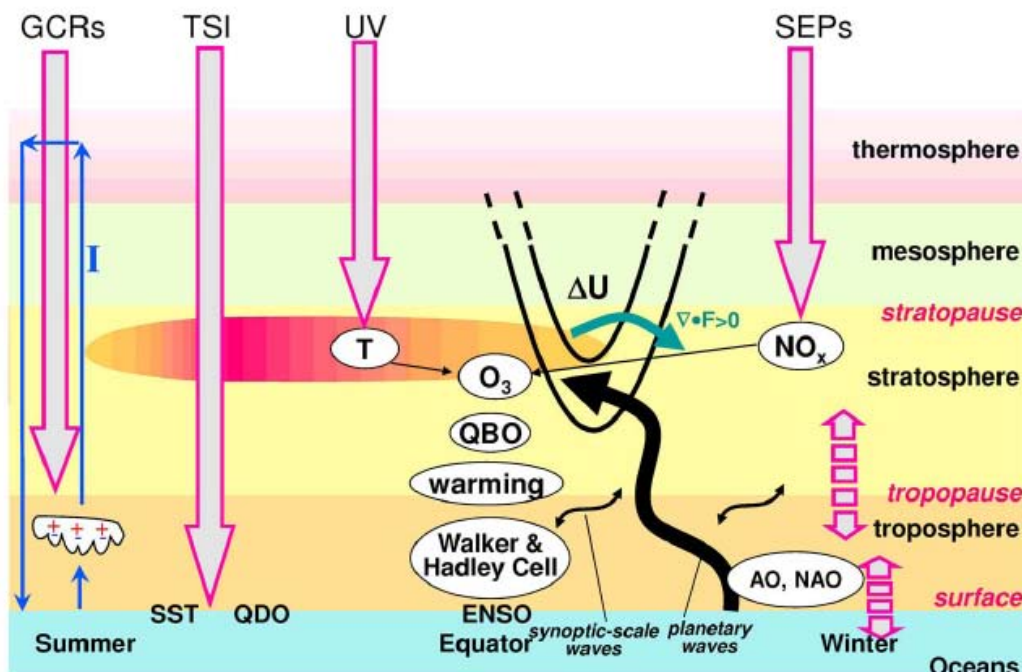
Někteří autoři (např. Bochníček a Hejda, 2005) raději kvantifikují sluneční aktivitu pomocí informací o geomagnetické aktivitě Země. Dle zjištění těchto autorů jsou hodnoty geomagnetické aktivity lepším ukazatelem úrovně sluneční aktivity než hodnoty Wolfova čísla a ostatních výše zmíněných indikátorů, což ve své práci uvádí i Woollings et al. (2010).

I přes všechny zmíněné možnosti kvantifikace sluneční aktivity a množství prací napsaných na toto téma, není podíl proměnlivosti sluneční aktivity na proměnlivost klimatu Země dost dobře znám. Hlavní otázkou je zřejmě to, jak může nepatrná změna v sluneční iradianci, jež nepřesahuje v rámci slunečního cyklu odchylku 0,1 % od normálu, způsobit nepoměrně větší změny klimatických parametrů, jež jsou na Zemi detekovány (Gray et al., 2010). To vede k myšlence, že musí existovat poměrně komplikovaný mechanismus přenášející tyto slabé disturbance ze stratosféry do troposféry, kde dochází k jejich zesílení (Benestad, 2002).

2.1 Mechanismy přenášející sluneční signál do troposféry

Bylo navrženo několik mechanismů popisujících, jak může zvýšená sluneční aktivita ovlivňovat podmínky v zemské troposféře (obrázek 3). Každý z těchto mechanismů nabízí jiné fyzikální vysvětlení problematiky. Obecně můžeme mechanismy přenosu slunečního signálu rozdělit na dvě skupiny: na mechanismy přímo a nepřímo ovlivňující parametry v troposféře (Gray et al., 2010).

Mezi přímé mechanismy patří dle studie Gray et al. (2010) změna sluneční irradiance během jedenáctiletého slunečního cyklu. To zahrnuje tzv. „Bottom-Up“ (v překladu „zdola nahoru“) mechanismus, kde je hlavním hybatelem změn přímé zahřátí povrchu Země. Druhým, částečně přímým mechanismem, je princip „Top-Down“ (v překladu „shora dolů“). Ten je řízen změnou příjmu energie v ultrafialové části spektra slunečního záření, které přímo ovlivňuje stratosféru. Aby tento mechanismus ovlivnil podmínky v troposféře, je nutné, aby došlo k přenosu signálu ze stratosféry. V souvislosti s ovlivněním parametrů v troposféře pak tedy o „top-down“ mechanismu mluvíme jako o nepřímém (Gray et al., 2010). Mechanismy nepřímo ovlivňujícími podmínky v troposféře jsou pak ještě ty navržené Tinsleyem (1996) a Svensmarkem a Friis-Christensenem (1997). Všechny čtyři zmíněné mechanismy budou podrobněji diskutovány níže.



Obrázek 3: Schématické znázornění mechanismů přenášejících sluneční signál do troposféry

zdroj: Gray et al. (2010)

BOTTOM-UP MECHANISMUS

Prvním mechanismem je „Bottom-Up“. Jedná se o princip mocnější tropické konvekce, který předložili Van Loon a Shea (1999). Hybatelem změn v troposféře je v tomto případě zvýšení příkonu sluneční energie v bezoblačných oblastech vnějších tropů během období zvýšené sluneční aktivity (Gray et al., 2010).

Autoři ve svých četných pracích (např. Van Loon et al., 2004 aj.) zjistili, že během období slunečních maxim v porovnání s minimy dochází k zesílení konvekce v intertropické zóně konvergence. Větší zahřátí pevnin a oceánů v oblastech vnějších tropů vede k zvýšenému výparu, a tím i k většímu obsahu vodních par. V oblastech intertropické zóny konvergence jsou pak zaznamenány rychlejší výstupné pohyby vzduchu, které jsou poháněny právě vyššími teplotami vzduchu a jeho vlhkostí. Tyto procesy vedou k mohutnění Hadleyovy cirkulační buňky (např. Gleisner a Thejll, 2003; Labitzke a Van Loon, 1995) a bylo rovněž zaznamenáno i zvýraznění Walkerovy cirkulace nad Pacifikem (např. Gleisner a Thejll, 2003; Gray et al., 2010). Hadleyova buňka se během slunečních maxim stává prostorově rozsáhlejší a dochází k posunu subsidenčních oblastí do vyšších zeměpisných šířek. Větší prostorový rozsah je na druhou stranu kompenzován jejím mírným oslabením (Haigh, 1996).

Princip „Bottom-Up“ vysvětluje ovlivnění sluneční aktivitou na regionální úrovni. Vysvětlení, jak může sluneční signál tímto principem ovlivnit klima Země na globální úrovni, je poměrně jednoduché. Posun Hadleyovy buňky ovlivňuje geografický rozsah cirkulačních prvků ve vyšších zeměpisných šířkách. V přímé souvislosti s tímto posunem dochází ke změně prostorového rozsahu sousední Ferrelvy buňky (Haigh, 1996). S tím nadále souvisí například posun frontálních systémů mírných šířek (např. Haigh 1996; Gleisner a Thejl, 2003), svou polohu mění i tryskové proudění. Samotné pojmenování mechanismu „Bottom-Up“ pak napovídá, že dochází k ovlivnění nejen vyšších zeměpisných šířek, ale i vyšších hladin troposféry, kde může docházet až k ovlivnění podmínek v tropické stratosféře (Gray et al., 2010).

TOP-DOWN MECHANISMUS

Druhým z navržených mechanismů je princip „Top-Down“. Ten nepřímo vysvětluje ovlivnění parametrů v troposféře pomocí zvýšeného příkonu záření v ultrafialové části spektra, které odpovídá obdobím s vyšší sluneční aktivitou.

Jak již bylo naznačeno v úvodní kapitole, během jedenáctiletého slunečního cyklu se příkon UV části spektra slunečního záření mění v rozmezí cca 6 až 8 % (Coughlin a Tung, 2004), což přímo ovlivňuje zemskou atmosféru cca 10 až 50 km nad zemským povrchem (Lockwood, 2012). Toto zesílení záření zároveň způsobuje, že dochází ke zvýšení produkce ozonu (Benestad, 2002). Konkrétně je v rámci slunečního cyklu změna koncentrace ozonu kvantifikována přibližně 1,4 až 2 % (Haigh, 1996).

Za slunečních maxim tak dochází ke zvýšené fotochemické disociaci ozonu. Při této reakci je krátkovlnné záření procházející zemskou atmosférou pohlcováno ozonem, přičemž vzniká tepelná energie (Benestad, 2002). Během slunečních maxim dochází k nejvýraznějšímu zahřátí stratopauzy v oblasti rovníku, kde je UV záření nejefektivněji absorbováno ozonem (Haigh, 1994). Podružné teplotní maximum je pak pozorováno v oblasti ozonové vrstvy ve výšce cca 20 až 30 km nad rovníkem (Gray et al., 2010).

Díky zahřátí stratosféry v rovníkových oblastech dochází k zesílení meridionálního teplotního gradientu, který vede k prohloubení cirkumpolárního víru ve stratosféře. To se následně šíří do troposféry. Za spojnice mezi stratosférou a troposférou jsou považovány právě cirkumpolární víry v polárních oblastech (Baldwin a Dunkerton, 1999). V případě severní polokoule se jedná o Severní prstencový mód - NAM, na jižní polokouli je pak spojnici Jižní prstencový mód - SAM (např. Ruzmaikin et al., 2004). Takto dochází k možnému nepřímému ovlivnění troposférických parametrů pomocí mechanismu „Top-Down“.

Tento princip má i své odpůrce. Proti hypotéze hovoří fakt, že k rozkladu ozonu ultrafialovým zářením dochází pouze na straně zeměkoule přivrácené ke Slunci, a tak nemůže k zahřívání planety docházet rovnoměrně. Zřejmě ale díky ovlivnění dynamiky planetárních vln se změny indukované absorbcí UV záření mohou šířit i na odvrácenou stranu Země (Benestad, 2002).

Poslední dvě hypotézy vysvětlují ovlivnění Země sluneční aktivitou jako interakci slunečního větru a kosmického záření se zemskou atmosférou. Hodnoty kosmického záření naměřené u zemského povrchu velmi silně negativně korelují s úrovní sluneční aktivity (viz obrázek 2). Kosmické záření se totiž snáze dostává k zemskému povrchu v období slunečních minim, kdy je oslaben sluneční vítr (např. Benestad, 2002), a kosmické záření tak může snáze proniknout do zemské atmosféry. Obě teorie se zabývají tím, jak může sluneční vítr (respektive kosmické záření) ovlivnit tvorbu kondenzačních jader a tím i oblačnost. Ta může mít oteplovací i ochlazující efekt v závislosti na tom, zda je tvořena vysokými či nízkými oblaky (Benestad, 2002).

TINSLEY (1996)

První z teorií se zaměřuje na elektrický obvod Země (Tinsley, 1996). Princip navržený autorem spočívá v tom, že solární vítr, jenž je výraznější v obdobích vyšší sluneční aktivity, při průchodu zemskou atmosférou ionizuje vzduch v troposféře a mění hustotu elektrického proudu v ionosféře (Tinsley, 1996). Dochází ke vzniku nabitých částic, které mají větší tendenci vytvářet ledové částičky na povrchu kondenzačních jader (Gray et al., 2010). Vznikají tak vysoké oblaky s ledovými částičkami, které způsobují zvyšování teplot v troposféře. K oteplování dochází z toho důvodu, že oblaka mají sníženou propustnost zabraňující zpětně vyzářenému dlouhovlnnému záření unikat zpět do vesmíru (Benestad, 2002). Takto je autorem vysvětlen nárůst teplot v období vyšší sluneční aktivity.

SVENSMARK A FRIIS-CHRISTENSEN (1997)

Teorie podle Svensmarka a Friis-Christensena (1997) vychází z mechanismu, který prvně navrhl Dickinson (1975). Autoři, obdobně jako u předchozí hypotézy, předpokládají, že kosmické záření ovlivňuje klima Země pomocí zvýšené tvorby oblaků. Pokrytí oblohy nízkými oblaky koreluje s množstvím přijatého kosmického záření. Pak tedy během období s větším výskytem kosmického záření v atmosféře dochází k většímu výskytu nízkých oblaků. Ty způsobují, že je více krátkovlnného záření odraženo zpět do vesmíru, což vede k poklesu teplot v troposféře (Svensmark

a Friis-Christensen, 1997). Analogicky pak dochází k opačnému trendu v obdobích s menším pokrytím oblaky. Během jedenáctiletého slunečního cyklu se množství oblaků v troposféře mění o cca 3 % (Svensmark, 2000). Svensmark a Friis-Christensen (1997) tento ochlazující efekt nízké oblačnosti kvantifikovali v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu na hodnotu $0,5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$. Pro porovnání, celkový podíl oblačnosti na radiační bilanci Země se pohybuje v řádu $17 \text{ až } 35 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ (Svensmark, 2000).

Svensmarkova hypotéza je pravděpodobně nejvíce zpochybňovanou teorií přenosu slunečního signálu do troposféry. Důvodů je k tomu hned několik. Původní studie (Svensmark a Friis-Christensen, 1997) byla vypracována pro období let 1980 až 1995 a zahrnuje tak pouze jeden sluneční cyklus. Pro toto období autorům vyšly velmi silné korelace mezi kosmickým zářením a pokrytím nízkými oblaky. Tato data byla dále jinými autory (např. Laut, 2003; Kristjánsson et al., 2002) analyzována i v delších časových obdobích, ale všechny ostatní provedené analýzy vykazovaly nižší hodnoty korelace. Bylo rovněž zjištěno, že po roce 1993 data rychle pozbyla na vzájemné korelaci (Kristjánsson et al., 2002), což bylo zároveň zjištěno i pro období předcházející Svensmarkově studii (Wagner et al., 2001).

Dalším důvodem pro zpochybnění je například fakt, že během pozorovaného období došlo k velmi výrazné epizodě El Niña, která ovlivnila výsledky analýzy, jež jsou dle Farrara (2000) spíše dílem náhody než odrazem fyzikálních vztahů probíhajících v troposféře. Kristjánsson et al. (2002) upozornili na to, že pokrytí nízkou oblačností mnohem více koreluje se sluneční iradiací než s kosmickým zářením, s nimiž Svensmark a Friis-Christensen (1997) pracovali. Dále například by dle navrženého mechanismu měla být odezva atmosféry na kosmické záření prakticky okamžitá. Kristjánsson et al. (2002) ale zjistili, že denní chod nízké oblačnosti nejlépe koreluje s kosmickým zářením při šestiměsíčním zpoždění. Konečně pak Laut (2003) zpochybnil i grafickou interpretaci výsledků předložených např. v práci Svensmark (1998). Pro dosažení statisticky významnějších výsledků zde bylo uměle manipulováno s daty a byly kombinovány dvě vzájemně nekonzistentní měření oblačnosti.

Přes veškerou snahu dosud nebyl jasně určen ani kvantifikován fyzikální mechanismus přeposílající energeticky slabý signál slunečního cyklu do troposféry. Hlavním důvodem je to, že přesná data naměřená na oběžné dráze Země jsou zatím k dispozici pro krátké časové období, což nedovoluje jednoznačně určit mechanismus nejvíce vysvětlující přenos slunečního signálu do troposféry.

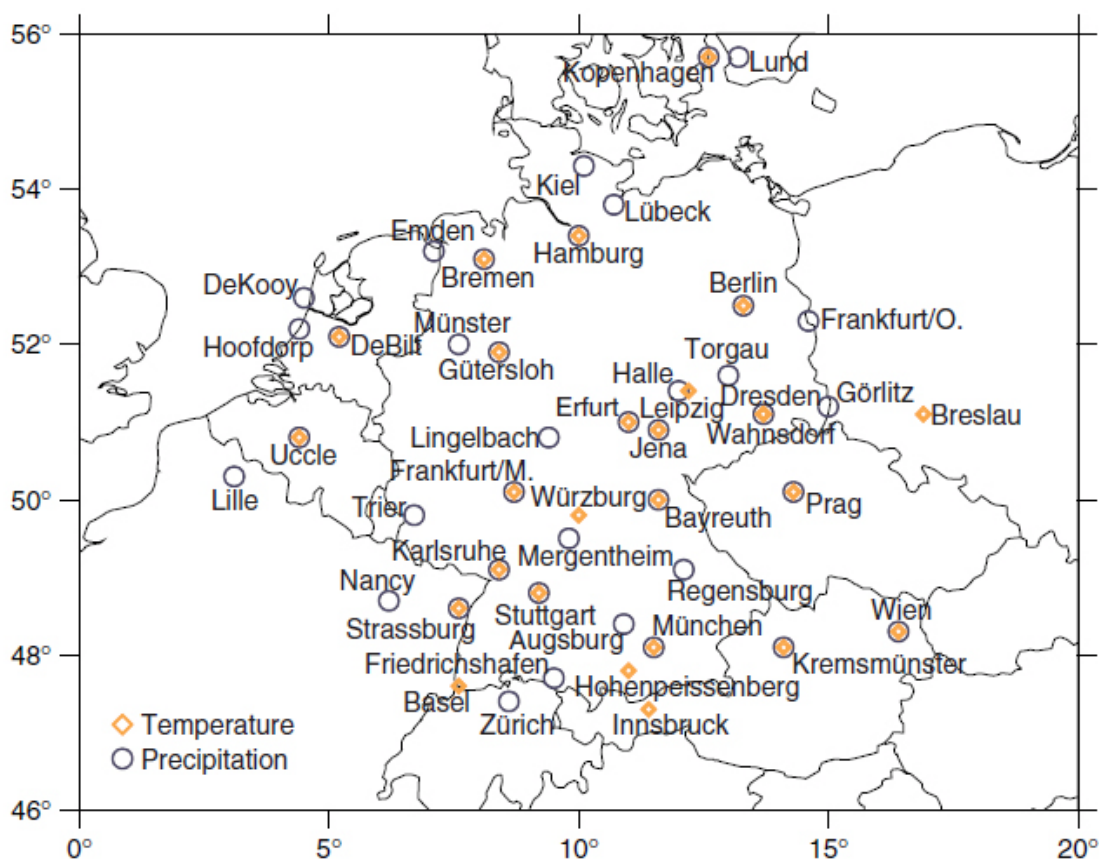
3 Synoptická klasifikace

Praktická část této práce si dává za cíl zjistit, zda úroveň sluneční aktivity ovlivňuje cirkulační podmínky ve střední Evropě. Proto zde bude krátce představena i použitá synoptická klasifikace.

Klasifikace atmosférické cirkulace se již dlouhou dobu používají jako užitečný nástroj pro popis a zkoumání počasí a klimatických podmínek. Hlavní myšlenkou jejich vzniku bylo vytvořit konečný počet tříd cirkulačních podmínek, pod které by bylo možné jednoznačně zařadit informace o denním stavu počasí - nejčastěji pak dle pole tlaku vzduchu (Phillip et al., 2010). Díky tomu je možno každému dni přiřadit právě jeden synoptický typ, který jej charakterizuje. Toho bylo dříve využíváno například k předpovědi počasí.

Existuje velká škála různých synoptických klasifikací. V zásadě je můžeme rozdělit na tři skupiny: na klasifikace subjektivní, objektivní a smíšené. V této práci byla použita klasifikace Becka (2000), jež spadá do skupiny klasifikací smíšených.

Beck (2000) vytvořil klasifikaci pro období let 1780 až 1995. Začátek typizace tak okrajově zahrnuje i pozdní období a doznívání tzv. malé doby ledové. Jako vstupní data pro vytvoření samotné klasifikace posloužily měsíční hodnoty teplot a srážek pro oblast střední Evropy a rekonstruované měsíční hodnoty přízemního tlaku vzduchu z oblasti severního Atlantiku (Jones et al., 1999). V případě měsíčních hodnot teploty vzduchu a srážek bylo použito 26 (respektive 39) časových řad z různých stanic střední Evropy (obrázek 2). Ne všechny časové řady byly kompletní, měření na většině zahrnutých stanic započalo až po roce 1780. Pro rok 1780 byla k dispozici teplotní měření na 65 % stanic, v případě měření úhrnu srážek byla k dispozici data z 16 % stanic. Od roku 1830 (resp. 1850 v případě srážek) byla k dispozici data na všech stanicích (Beck et al., 2007).



Obrázek 4: Plošné rozmístění meteorologických stanic vstupujících do klasifikace Beck (2000)

zdroj: Beck et al. (2007)

Druhým datovým zdrojem byla časová řada rekonstruovaných měsíčních hodnot tlaku vzduchu (Jones et al., 1999). Rekonstrukce dat je založena na postupu regrese hlavních komponent, kdy do zpracování vstupují hodnoty tlaku vzduchu naměřené na 51 stanicích a hodnoty z 60 uzlových bodů rovnoměrně rozprostřených na geografické síti. Ani zde nebyla pro začátek zkoumaného období (od roku 1780) k dispozici měření pro všechny stanice, a tak vypočtené hodnoty pro období cca prvních dvaceti let nemusí být tak přesné (Jones et al., 1999).

Samotná klasifikace je založena na zobecnění starší synoptické typizace pro střední Evropu dle Hesse-Brezowského, čítající 29 cirkulačních typů definovaných polohou akčních center a rozsahem frontálních zón. Tyto parametry byly autorem nahrazeny charakteristikami míry zonality, meridionality a cyklonality (Beck et al., 2007). Jednotlivé typy jsou pak dle zadaných parametrů určeny jako kombinace tří zmíněných charakteristik. Takto bylo autorem definováno 18 cirkulačních subtypů nad střední Evropou (viz příloha 1a-1c).

4 Projevy proměnlivé sluneční aktivity v zemské troposféře

Jak již bylo naznačeno v úvodní kapitole, signál jedenáctiletého cyklu je sice poměrně výrazný, ale má velmi malou amplitudu. Je tak velmi obtížné prokázat jeho vliv na zemskou atmosféru jako statisticky významný (Coughlin and Thung, 2004). Proto je nesmírně důležité správně zpracovat naměřená data, jež jsou v současné době k dispozici.

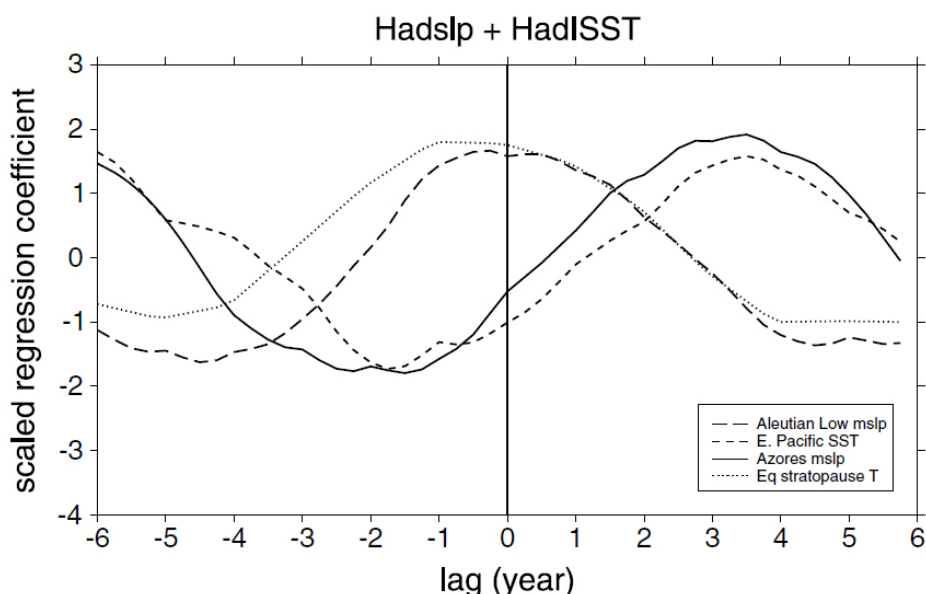
Pro výzkum vlivu sluneční aktivity na zemskou atmosféru můžeme v zásadě použít dva typy dat, a to data staniční a reanalýzy. Staniční data mají tu výhodu, že díky nim dostaneme informace o stavu přízemních proměnných v atmosféře pro několik staletí zpět (Brugnara et al., 2013). Nevýhodou staničních měření je jejich nerovnoměrné prostorové rozmístění a to, že nepodávají informace o vertikálním stavu atmosféry v planetárním měřítku. Oproti tomu data získaná z reanalýz pokrývají atmosféru v desítkách vertikálních rovin a poskytují relativně dostatečné prostorové rozlišení i pro regionálněji zaměřené studie (Benestad, 2002). V současné době se nejčastěji používají reanalýzy ERA-40 a NCEP/NCAR. Reanalýzy neposkytují zdaleka tak dlouhou časovou řadu jako staniční data, informace o stavu atmosféry podávají pro posledních pět slunečních cyklů (Brugnara et al., 2013). Gleisner et al. (2005) porovnávali data z reanalýz pro období let 1958-2001. Autoři došli k závěru, že díky značným nepoměřům mezi těmito soubory dat v části měřeného období, podávají rozdílný obraz vlivu sluneční proměnlivosti na atmosférické proměnné. Vyšších hodnot korelace je pak dosahováno při využití reanalýzy NCEP/NCAR.

Přístupů k provádění statistických výzkumů dopadu proměnlivosti sluneční aktivity na zemskou atmosféru je několik. Existuje zde velká různorodost co do použitých metod i filtrování vstupních datových souborů. Ve většině studií zabývajících se tímto tématem, byly ze zpracovávaného datového souboru nejprve odstraněny vlivy sopečných erupcí a El Niña (např. Douglass a Clader, 2002; Gleisner a Thejll, 2003; Van Loon et al., 2004 aj.), které mají na troposféru v krátkodobém měřítku větší vliv než sluneční signál (Douglass a Clader, 2002). Někteří autoři rovněž data stratifikují dle probíhající fáze kvazidvouleté oscilace rovníkových stratosférických větrů QBO (např. Barriopedro et al., 2008; Ruzmaikin a Feynman, 2002), jež ovlivňuje šíření solárního signálu skrz stratosféru do troposféry (např. Labitzke, 2005). Nicméně odstranění vlivu ostatních klimatologických faktorů v datech není prováděno všemi autory, někteří ponechávají data neupravená (např. Coughlin a Tung, 2004; Haigh, 1996 aj.).

Odpověď atmosféry na změny příkonu slunečního záření není okamžitá a nabírá větší či menší časovou prodlevu v závislosti na tom, o jakou atmosférickou

proměnnou se jedná. To je důležité mít na paměti a je zajímavé, že ve většině prací zabývajících se problematikou proměnlivosti sluneční aktivity toto nebylo bráno v potaz. Scaife et al. (2013) rovněž upozorňují na to, že vypočtená doba odezvy atmosféry je závislá na vstupních datech kvantifikujících sluneční aktivitu (viz kapitola 2).

Jak již bylo naznačeno výše, změny v úrovni sluneční aktivity mají pro různé prvky klimatického systému rozdílně dlouhou dobu odezvy (např. obrázek 5). Důležitou roli zde dle všeho hrají i oceány, jež mají oproti atmosféře rozdílnou tepelnou kapacitu a na změny v sluneční aktivitě reagují pomaleji. Ty pak mohou zároveň zpětně ovlivňovat atmosféru, což potvrzují studie vycházející z reanalýz (Ogi et al., 2003) i klimatické modely (Scaife et al., 2013). Např. Gray et al. (2013) pro povrchovou teplotu oceánu spočítali nejsilnější kladné korelace přibližně 3 až 4 roky po slunečním maximu.



Obrázek 5: Odezva různých komponent troposférické cirkulace na změny v úrovni sluneční aktivity

zdroj: Gray et al. (2013)

Jak je připomínáno v práci Brugnara et al. (2013), je důležité si uvědomit, že jednotlivé studie jsou silně ovlivněny výběrem dat, statistických metod a obdobím, pro které je studie zpracována. Výsledky podávané různými pracemi se pak mohou velmi výrazně lišit, což bude diskutováno v následujících kapitolách.

4.1 Módy proměnlivosti

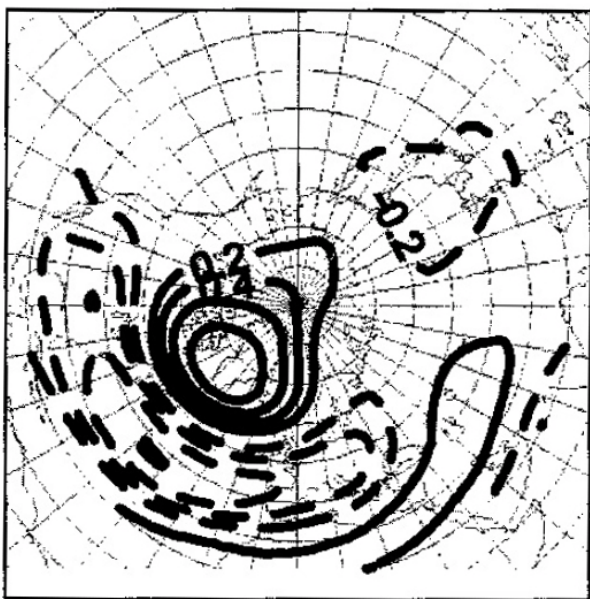
Pokud se soustředíme na dopady proměnlivosti sluneční aktivity na troposféru, je vhodné začít u módů proměnlivosti. Ty se v zásadě dají považovat za „základní stavební prvky“ troposférické cirkulace a svým projevem výrazně ovlivňují klima přilehlých i odlehlejších pevnin a oceánů.

Dle některých studií (např. Huth et al., 2006) se v chování módů proměnlivosti během rozdílné úrovně sluneční aktivity dají najít určité společné rysy. Dle autorů dochází v období vysoké sluneční aktivity u zonálně orientovaných módů k jejich mohutnění. Módy jsou více protáhlé a jejich akční centra se rozkládají nad větším územím. Naproti tomu módy, které jsou orientované spíše v meridionálním směru, jsou během vysoké sluneční aktivity méně výrazné.

Níže budou podrobněji diskutovány dva módy proměnlivosti, které nejvíce ovlivňují klima evropského kontinentu, a vztahují se tak k zájmové oblasti této práce. Jsou to Severoatlantická a Arktická oscilace. Tyto dvě oscilace se dle práce Gray et al. (2010) někdy souhrně označují jako Severní prstencový mód - NAM, jenž šířeji charakterizuje cirkulační podmínky severní polokoule v rámci celé mocnosti troposféry. Jednotlivá pojmenování Severoatlantická oscilace (respektive Arktická oscilace) namísto toho charakterizují proměnlivé chování atmosféry při zemském povrchu v oblastech severního Atlantiku.

4.1.1 NAO - Severoatlantická oscilace

Severoatlantická oscilace - NAO (obrázek 6) přímo ovlivňuje klima nad evropským kontinentem. Jedná se o mód proměnlivosti, který je kvantifikován rozdíly tlaku mezi dvěma akčními centry - islandskou tlakovou níží a azorskou tlakovou výší. Index této oscilace je počítán několika způsoby, mezi které se řadí například klasické hodnocení rozdílu přízemního tlaku vzduchu mezi stanicemi Reykjavík (Island) a Ponta Delgada (Azorské ostrovy). Někdy je azorská tlaková výše rovněž kvantifikována hodnotou tlaku vzduchu ze stanice Gibraltar. Tento způsob určení hodnoty indexu Severoatlantické oscilace je nicméně poněkud zavádějící, protože NAO má stejně jako ostatní módy proměnlivosti tendenci měnit polohu svých akčních center a to nejen na základě úrovně sluneční aktivity (např. Deser, 2000; Huth et al., 2006). Mnohem přesnější je proto určovat index Severoatlantické oscilace pomocí pokročilých postupů zahrnujících například analýzu hlavních komponent.



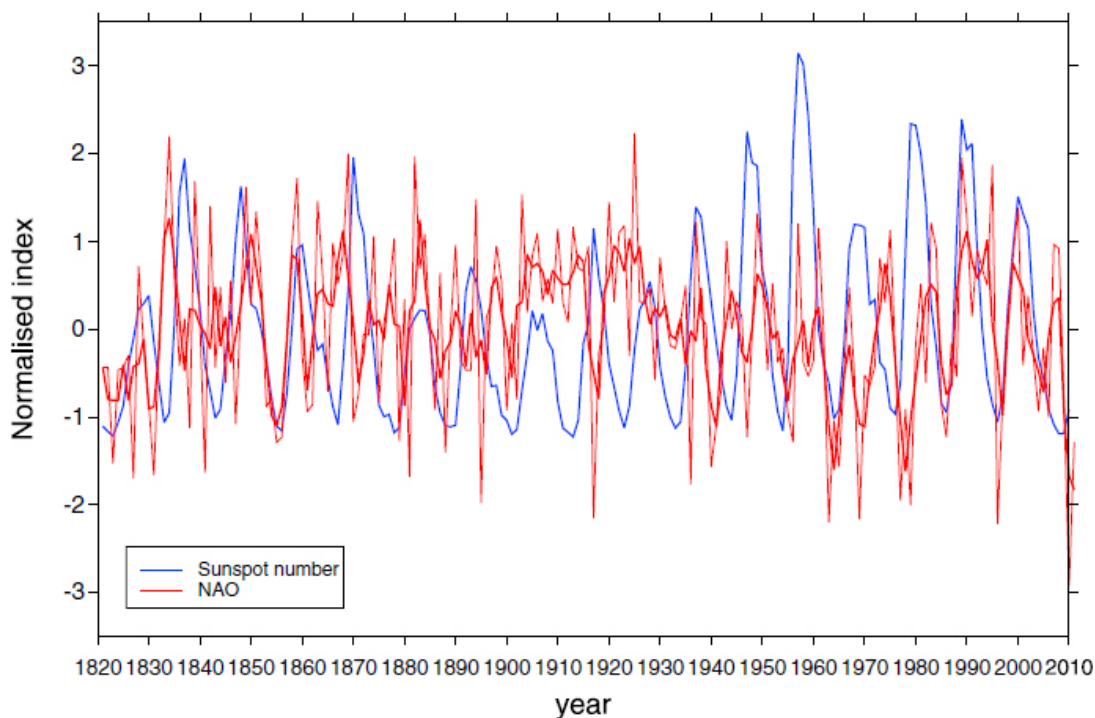
Obrázek 6: Korelační mapa znázorňující Severoatlantickou oscilaci

zdroj: Huth et al. (2006)

Severoatlantická oscilace střídavě nabývá kladné a záporné fáze. Kladná fáze nastává, když jsou zesílena obě akční centra. Tedy v situacích, kdy se prohlubuje islandská tlaková níže a v oblasti azorské tlakové výše jsou naopak naměřeny nadprůměrné hodnoty tlaku vzduchu. To vede k zesílení tlakového gradientu a západního proudění v oblasti nad severním Atlantikem a Evropou. Analogicky je definovaná záporná fáze NAO (<http://www.nc-climate.ncsu.edu>).

Je otázkou, zda je Severoatlantická oscilace přímo ovlivňována změnami v úrovni sluneční aktivity. Na toto téma neexistuje jednotný názor a bylo zpracováno mnoho prací dokazujících jejich vzájemný vztah i opak. Např. práce Bochníček a Hejda (2005); Gimeno et al. (2003); Kodera (2002); Ogi et al., (2003); Sfica et al., (2015) a další uvádějí, že Severoatlantická oscilace je pozitivně ovlivněna během vysoké sluneční aktivity a období slunečních maxim jsou četnější při kladné fázi NAO. Pro období s nízkou aktivitou jsou u většiny výše zmíněných studií výsledky statisticky nevýznamné.

Existuje i velké množství prací popírajících vzájemný vztah mezi fází NAO a sluneční aktivitou. Huth et al. (2006) zjistili, že NAO, obdobně jako ostatní módy proměnlivosti na severní polokouli, vykazuje určitou korelaci se sluneční aktivitou. Nejedná se ale o výsledky statisticky významné. Rovněž Brugnara et al. (2013), jež problematiku zkoumali v delším časovém měřítku, došli k obdobnému závěru, což je ve shodě s výsledky i dalších prací (např. Barnston a Livezey, 1989; Gray et al., 2013). Na obrázku 7 je znázorněn časový průběh indexu NAO a sluneční aktivity.



Obrázek 7: Porovnání průběhu slunečního cyklu a indexu NAO v období let 1821 až 2011

V grafu jsou zobrazeny roční průměry počtu slunečních skvrn (modrá barva) a průměrná hodnota indexu NAO v zimních měsících. Index je zde definován jako rozdíl přízemního tlaku vzduchu mezi Gibraltarem a Islandem.

zdroj: Gray et al. (2013)

V případě zkoumání vztahu NAO a sluneční aktivity zřejmě více než u jiných atmosférických proměnných záleží na volbě zkoumaného období. Thejll et al. (2003) poukázali na to, že hodnota korelace mezi NAO a sluneční aktivitou byla v posledních 130 letech velmi proměnlivá. Z toho vyplývá, že při zkoumání kratšího časového období mohou autoři dojít k velmi odlišným výsledkům, což potvrdili i Brugnara et al. (2013).

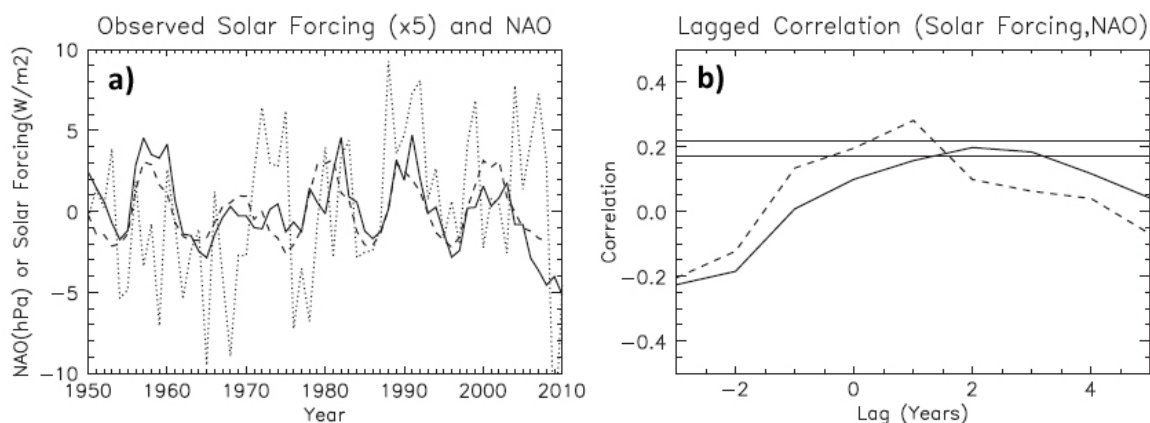
V práci Georgieva et al. (2007) autoři prezentovali výsledky, dle kterých se vliv sluneční aktivity na index NAO mění v čase. V 17. a 19. století byla korelace mezi počtem slunečních skvrn a NAO indexem záporná, kdežto ve stoletích 18. a 20. byla jejich vzájemná korelace kladná. Tyto dlouhodobé změny jsou dle autorů následkem měnící se solární asymetrie, kdy vyšší počty slunečních skvrn můžeme s dlouhou periodou nalézt střídavě na severní a jižní sluneční polokouli (Benestad, 2002).

Co se týká časové prodlevy detekce proměnlivosti sluneční aktivity na parametrech Severoatlantické oscilace, bylo toto téma diskutováno např. v práci

Boberg a Lundstedt (2002). Předmětem práce, která se soustředila pouze na zimní období, bylo určit, zda existuje vzájemná korelace mezi intenzitou slunečního větru a indexem NAO. Nejvyšších hodnot korelace bylo dosaženo s prodlevou troposférické cirkulace v řádu jednoho až tří měsíců. Většina ostatních prací zabývajících se tématem odezvy klimatického systému na sluneční aktivitu našla v případě Severoatlantické oscilace signál v delších časových horizontech. Qun a Qiuming (1993) našli prodlevu NAO na změny v sluneční aktivitě, a to v řádu 2 až 4 let, což je v dobré shodě s výsledky práce Scaife et al. (2013) – obrázek 8, a Gray et al. (2013), jež tvrdí, že signál NAO je nejsilnější přibližně 3 až 4 roky po slunečním maximu (příloha 2).

Je zajímavé, že i v případě prodlevy odezvy klimatického systému na změny ve sluneční aktivitě, existují určité trendy, které se s časem mění. Na to poukázali Gray et al. (2013), jež v časovém horizontu let 1955 až 2010 spočítali prodlevu odezvy klimatického systému na 2 až 3 roky. V případě delšího časového období (1870 až 2010) nabývá odezva 3 až 4 roky. Tyto výsledky mohou do určité míry souviset s výsledky studie Thejll et al. (2003)

Souhrnně se dá vliv sluneční aktivity na Severoatlantickou oscilaci charakterizovat takto: převládá názor, že během slunečních maxim má index Severoatlantické oscilace tendenci nabývat spíše kladných hodnot. Problematické na tomto je, že ne všechny studie vypracované na toto téma došli k závěru, že se jedná o změny statisticky významné.



Obrázek 8: Závislost indexu NAO na prodlužující se odezvě proměnlivosti sluneční aktivity

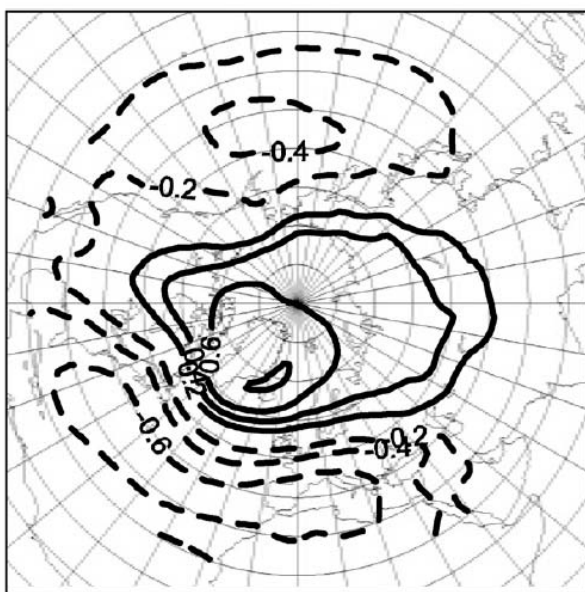
Graf a) znázorňuje hodnoty indexu NAO (tečkovaná čára), celkové sluneční iradiance (přerušovaná čára) a slunečního toku na vlnové délce 10,7 cm (nepřerušovaná čára).

Graf b) znázorňuje závislost korelace indexu NAO s parametry sluneční aktivity na zpoždění odezvy atmosféry na změny sluneční aktivity. Přerušovaná čára znázorňuje celkovou sluneční iradianci, nepřerušovaná čára sluneční tok na vlnové délce 10,7 cm. Vodorovné linie znázorňují 5% a 10% hladinu statistické významnosti.

zdroj: Scaife et al., 2013

4.1.2 AO - Arktická oscilace

Arktická oscilace - AO (obrázek 9) je charakterizována rozdílem přízemního tlaku vzduchu mezi třemi akčními centry. První, záporné centrum, se nachází v polární oblasti, zbývající dvě akční centra se nacházejí v nižších zeměpisných šířkách. V oblasti Atlantického oceánu se jedná o kladné centrum korespondující s azorskou tlakovou výší, v oblasti Tichého oceánu pak akční centrum odpovídá aleutské tlakové níži (Huth et al., 2007; Thompson a Wallace, 1998). Arktická oscilace je sama o sobě definována při zemském povrchu. Ve vyšších hladinách je rozpoznávána jako cirkumpolární vortex (<http://www.nc-climate.ncsu.edu>).



Obrázek 9: Korelační mapa znázorňující Arktickou oscilaci
zdroj: Huth et al. (2007)

Stejně jako u Severoatlantické oscilace můžeme rovněž i u Arktické oscilace definovat dvě fáze. Kladná a záporná fáze Arktické oscilace se definují pomocí změn přízemního tlaku akčních center (Gray et al., 2010). Kladná fáze, stejně jako v případě NAO, vede k zesílení zonálního proudění, což má za následek uzavření pole studeného vzduchu nad pólem (např. Huth et al., 2007; Lu et al., 2008; Ogi et al., 2003). Naopak v obdobích, kdy se Arktická oscilace nachází v záporné fázi a dochází k zeslabení zonálního proudění, se studený polární vzduch dostává do nižších zeměpisných šířek a může tak přinést ochlazení nad severní oblastí Evropy (Gray et al., 2010), a tím i pozměnit cirkulaci nad střední Evropou. Zároveň je zde možná cesta pro průnik teplejšího vzduchu do polární oblasti (Ruzmaikin et al., 2004)

Dle některých autorů (např. Ruzmaikin a Feynman, 2002; Ruzmaikin et al., 2004; Thompson a Wallace, 1998) je právě AO spojnici mezi stratosférou a troposférou, jež přenáší do nižších vrstev atmosféry disturbance spojené s měnící se úrovní sluneční aktivity. Baldwin a Dunkerton (1999) princip propojení vysvětlují jako interakci mezi planetárními vlnami postupujícími ze spodních vrstev troposféry vzhůru a zonálním prouděním ve stratosféře.

Zvláštností je, že se v případě Arktické oscilace vedou spory o tom, zda se jedná o reálný cirkulační prvek nebo zda je AO pouze jakýsi relikv statistických testů (např. Ambaum et al., 2001; Deser, 2000; Huth et al., 2007). Podkladem pro odmítání reálné existence AO je například to, že existuje silná vzájemná korelace pouze mezi arktickým a atlantickým akčním centrem. Arktické vs. pacifické a atlantické vs. pacifické akční centrum nevykazují statisticky významné korelace (Deser, 2000; Huth et al., 2007). Arktická oscilace je pak tvarem a charakteristikou velmi podobná Severoatlantické oscilaci. Jejich vzájemná korelace při použití dat za jednotlivé měsíce chladného půlroku dosahuje hodnot 0,95 (Deser, 2000). Dále pak jsou pochybnosti, zda je kruhový tvar AO důsledkem vzájemného vztahu atlantického a pacifického centra. Ambaum et al. (2001) a Deser (2000) tento tvar připisují spíše dominanci arktického akčního centra.

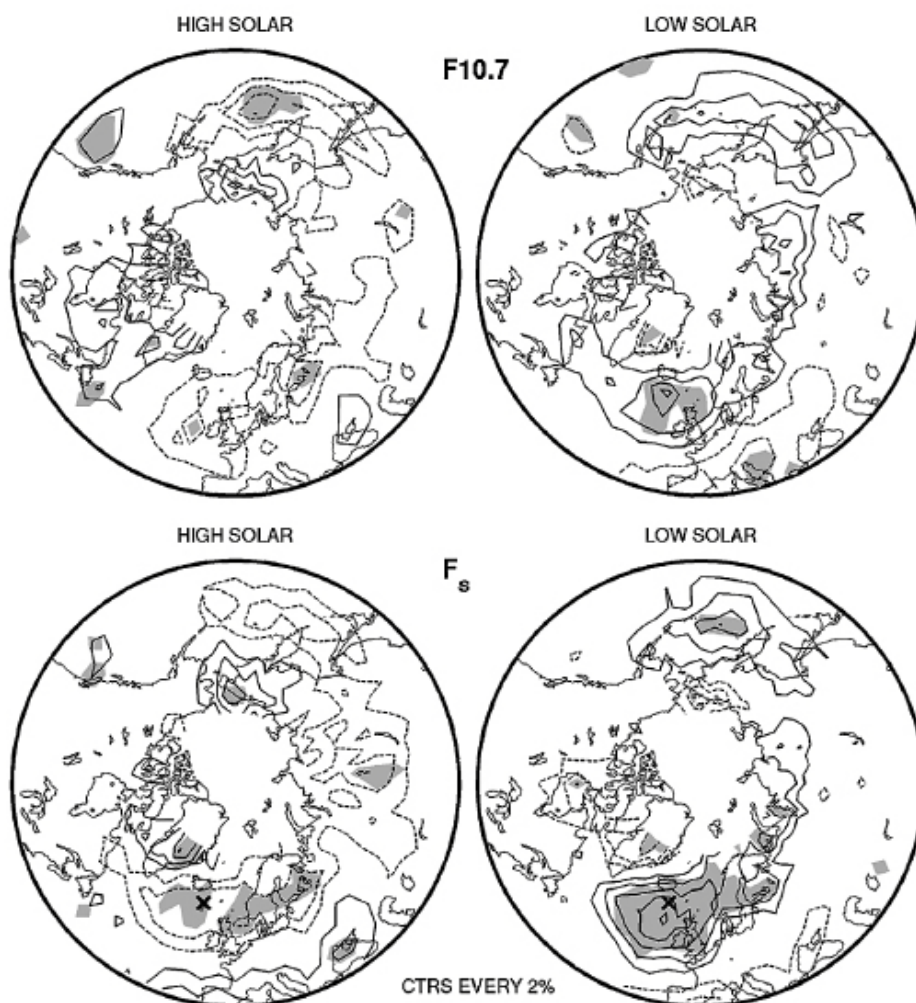
Názory na ovlivnění Arktické oscilace úrovní sluneční aktivity nejsou tak různorodé jako v případě Severoatlantické oscilace. Huth et al. (2007) došli k zjištění, že období slunečních maxim je ve velmi dobré shodě s kladnou fází AO. Tedy že AO nabývá více zonální charakter a je zároveň i více aktivní. Během slunečních minim je pak situace opačná a AO nabývá spíše své záporné fáze (Huth et al., 2007). K opačným výsledkům pak došla studie Tourpali et al. (2005) využívající model.

4.2 Blokující anticyklony

Jevem úzce spjatým s proměnlivou úrovní sluneční aktivity jsou blokující anticyklony. Jedná se o stacionární synoptické útvary, které mohou přetrvávat až po několik týdnů. Jejich přítomnost je spojena s výraznými odchylkami teplot vzduchu a srážek zasahujícími rozlehlá území (Barriopedro et al., 2006). V mírných zeměpisných šířkách anticyklony zabraňují pronikání západního proudění, jež je nahrazeno prouděním meridionálního charakteru. To s sebou přináší oteplení nebo ochlazení v závislosti na směru proudění (Barriopedro et al., 2006). Blokující anticyklony usazené nad severním Atlantikem přinášejí ochlazení do západní a střední Evropy, a to především během zimních měsíců (Lockwood, 2012).

Vztah četnosti blokujících anticyklon k úrovni sluneční aktivity byl diskutován v několika vědeckých studiích. Barriopedro et al. (2008) prokázali, že během období slunečních minim mají blokující anticyklony delší trvání, jsou intenzivnější a vyskytují se východněji. Tyto výsledky potvrdili rovněž Woollings et al. (2010) - viz obrázek 10, již ve své práci dodávají, že téměř všechny zimy s vysokou četností blokujících anticyklon odpovídají období s nízkou sluneční aktivitou. Což odpovídá zjištění Barriopedra et al. (2008) o čtenějším výskytu chladných zim během nízké sluneční aktivity.

V obdobích vysoké sluneční aktivity je pak situace opačná. Barriopedro et al. (2008) a Lockwood (2012) shledávají, že při vyšší sluneční aktivitě jsou blokující anticyklony méně výrazné a zimní období je v západní části Evropy mírnější. Za vyšších teplot, což v případě Evropy odpovídá slunečním maximům, mají blokující anticyklony tendenci být méně intenzivní a nepřetrvávat po tak dlouhou dobu, což s použitím klimatického modelu potvrdili i Lupu et al. (1997).



Obrázek 10: Výskyt blokujících anticyklon v závislosti na úrovni sluneční aktivity
Data jsou zpracována pro různé ukazatele úrovně sluneční aktivity (na horních mapách data pro sluneční rádiový tok na vlnové délce 10,7 cm, spodní mapy pro sluneční tok odvozený z hodnot geomagnetické aktivity). Šedě vybarvené oblasti znázorňují statisticky významné výsledky na 5% hladině statistické významnosti. Interval izochar je 2 % (negativní hodnoty přerušovanou čarou, kladné hodnoty plnou čarou.

zdroj: Woollings et al., 2010

Výskyt blokujících anticyklon je velmi úzce spjat se Severoatlantickou oscilací, a to hlavně s její zápornou fází (Barriopedro et al., 2008). Během záporné fáze NAO jsou blokující anticyklon nad severním Atlantikem téměř třikrát tak četné než za kladné fáze NAO (Barriopedro et al., 2006). Což je logické vzhledem k tomu, že během záporné fáze NAO dochází k zeslabení západního proudění a blokující anticyklony tak mají možnost lépe se formovat. Barriopedro et al. (2008) uvádějí, že blokující anticyklony rovněž souvisí i s Arktickou oscilací.

4. 3 Cirkulační podmínky

Jak již bylo naznačeno v části věnované atmosférickým módům proměnlivosti, i v případě převládajícího směru proudění vzduchu a rychlosti proudění byly nalezeny spojitosti s proměnlivostí sluneční aktivity.

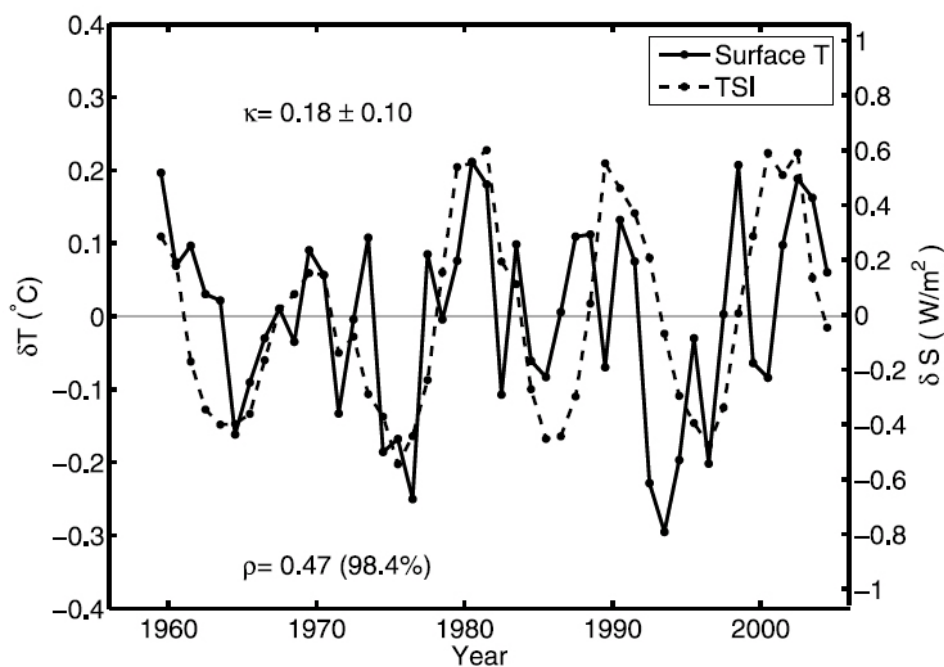
Během období slunečních maxim má proudění díky zesílené Severoatlantické a Arktické oscilace tendenci být více zonální (viz předchozí kapitoly). To ve své práci dokládají například Bochníček a Hejda (2005) a Huth et al. (2006), již data zpracovali pro zimní období. Crooks a Gray (2005) pak rovněž dokládají zesílení proudění v oblasti mezi 40° a 70° severní šířky, což vysvětlují zeslabením subtropického tryskového proudění. V tlakové hladině 300 hPa toto potvrzuje i práce Brugnara et al. (2013). Zajímavostí pak je, že za nízké aktivity je západní proudění pouze dvakrát četnější než východní proudění a že za střední sluneční aktivity se západní proudění v porovnání s východním vyskytuje téměř čtyřikrát častěji (Huth et al., 2008). V období s nižší sluneční aktivitou má pak proudění analogicky sklon být spíše meridionálního charakteru (např. Huth et al., 2006).

Georgieva et al. (2007) na zkoumání této problematiky zvolili jiný přístup. Dle nich je převládající směr proudění vzduchu ovlivněn primárně tím, na jaké sluneční polokouli je v daném okamžiku více slunečních skvrn, tedy která sluneční hemisféra je aktivnější. Proudění má pak dle autorů tendenci být více zonální v případech, kdy je během slunečních maxim aktivnější jižní sluneční polokoule. Meridionální proudění nastává spíše při těch slunečních maximech, kdy je aktivnější severní sluneční polokoule.

Všechny výše shrnuté poznatky dobře poslouží jako výchozí bod pro sestavení hypotézy pro praktickou část této diplomové práce. Bude pak zajímavé sledovat, zda budou výsledky této práce ve shodě s ostatními pracemi na téma ovlivnění cirkulačních charakteristik proměnlivostí sluneční aktivity. Jako výchozí zdroj dat poslouží odlišná typizace cirkulačních podmínek (viz kapitola 3) a data budou zpracována pro jiné časové období.

4.4 Teplotní podmínky

Teplotní podmínky se rovněž mění v závislosti na úrovni sluneční aktivity, období slunečních maxim odpovídají vyšším teplotám. Na globální úrovni je změna přízemní teploty vzduchu v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu vypočtena na hodnotu $0,18 \pm 0,08 \text{ } ^\circ\text{C/W}^*\text{m}^{-2}$ (Camp a Tung, 2007; Coughlin a Tung, 2004; Haigh, 2003; Shindell et al. 2001) - viz obrázek 11. Tuto hodnotu shodně potvrdily studie vycházející z naměřených dat i klimatických modelů. Nicméně je třeba podotknout, že mnohem větší změny teplot jsou detekovány na regionální úrovni (např. Ermolli et al., 2013; Shindell et al., 2001).



Obrázek 11: Časový průběh anomálií globální průměrné teploty a odchylky sluneční iradiance v období let 1959 až 2004

zdroj: Camp a Tung (2007)

Při uvážení šířkového členění planety je největší změna teplot za jedenáctiletého slunečního cyklu zaznamenána ve středních šířkách a polárních oblastech. V oblastech středních šířek může za oteplení větší plošný rozsah Hadleyho buňky, jenž vynucuje posun i sousedních cirkulačních buněk. Oteplení je pak nejvíce detekováno v pásích okolo 40° zeměpisné šířky (Gleisner a Thell, 2003; Haigh, 2003), kde jej Crooks a Gray (2005) určili na cca 0,3 až 0,4°C, což se shoduje s dalšími studii (např. Haigh, 2003). V polárních oblastech je největší oteplení detekováno v Arktidě, s menší amplitudou je pak naměřeno na Antarktidě. V případě obou polárních regionů se oteplení během slunečního cyklu pohybuje v řádu cca 0,5 až 0,7°C (Cai, 2005; Camp a Tung, 2007). Výraznější oteplení v těchto oblastech může být dle některých studií způsobeno propojením se stratosférou pomocí polárních vortexů (např. Lean a Rind, 2001), případně pak díky pozitivní zpětné vazbě albeda (Camp a Tung, 2007).

Pokud budeme porovnávat severní a jižní polokouli jako celek, větší rozdíl teplot je detekován na severní polokouli (např. Lockwood, 2012): cca 0,15 až 0,2° C (Van Loon a Shea, 1999). Výsledek může být ovlivněn i tím, že z polárních oblastí jižní polokoule není k dispozici dostatek dat (např. Coughlin a Tung, 2004), což snižuje hodnotu oteplení pro jižní polokouli. Zároveň díky tomu, že má voda větší tepelnou kapacitu, je větší oteplení detekováno nad pevninami (Camp a Tung, 2007), což díky většímu pokrytí kontinenty mluví ve prospěch většího oteplení severní polokoule. Jak uvádí Lockwood (2012), na severní polokouli jsou největší rozdíly teplot mezi fázemi sluneční aktivity měřeny v Evropě a západní Asii. Řádově se jedná o změny až několika stupňů Celsia (Woollings et al., 2010).

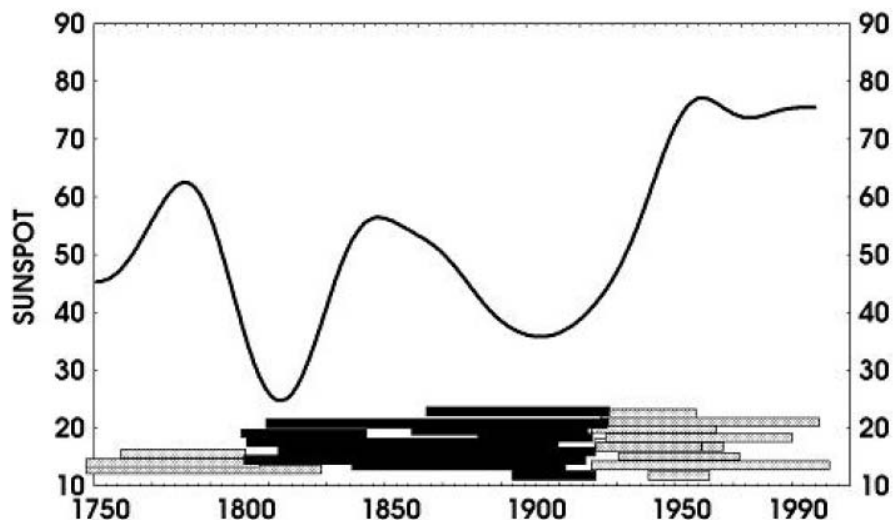
Evropský kontinent je jedním z regionů, kde změny teplot v závislosti na probíhajícím slunečním cyklu dosahují největších amplitud. Existuje zde velmi úzký vztah teplotních podmínek a Severoatlantické oscilace. V období slunečních maxim pak byly zjištěny vyšší přízemní teploty nad evropským kontinentem. Gimeno et al. (2003) uvádějí, že toto oteplení je více zřetelné a zasahuje větší území než ochlazení během slunečních minim.

Během let s nízkou sluneční aktivitou jsou pak dle některých studií prokazatelně ovlivněny přízemní teploty, jež jsou nižší než je klimatologický průměr (např. Gimeno et al., 2003; Lockwood et al., 2010). Dle článku Ogi et al. (2013) se tak děje spíše v případě teplot během jarních a letních měsíců, během zimy je pak dle autorů korelace sluneční aktivity a teploty velmi slabá. To se ne zcela shoduje s výsledky práce Ruzmaikin et al. (2004), dle nichž je ochlazení za nízké sluneční aktivity v zimních měsících silně detekováno a chladnější vzduch dle nich proniká přes Evropu a Sibiř i dále na východ. Ochlazení v zimním období názorně ukazuje Lockwood (2012)

na příkladu zimy přelomu let 2009/2010, kdy velkou část Evropy sužovala nezvykle chladná zima. Toto období se shoduje s končícím minimem 23. slunečního cyklu, jež bylo neobvykle dlouhé a s minimem detekovaných slunečních skvrn (Brugnara et al., 2013).

V obdobích nízké aktivity jsou dle některých klimatických modelů přízemní teploty vzduchu v Evropě nižší o 1 až 2°C v porovnání s vysokou sluneční aktivitou (Shindell et al., 2001), což je dle autorů ve shodě i s historicky měřenými daty (např. Brugnara et al., 2013) a paleoklimatickými záznamy. Důvodem, proč jsou během nižší sluneční aktivity četnější chladné zimy, spatřují Brugnara et al. (2013) v tom, že díky meridionálnímu směru proudění dochází k advekci studeného vzduchu z vysokých zeměpisných šířek.

Jiný pohled na problematiku nabízí studie Georgieva et al. (2007) zabývající se rovněž evropským regionem. Autoři tvrdí, že během 18. a 20. století teplota a sluneční cyklus vykazovaly kladné korelace a 19. století je význačné tím, že korelace teplot vzduchu a slunečního cyklu nabývají záporných hodnot (obrázek 12). Autoři toto připisují měnící se sluneční asymetrii, kdy vyšší počty slunečních skvrn můžeme s dlouhou periodou nalézt střídavě na severní a jižní sluneční polokouli (Benestad, 2002).

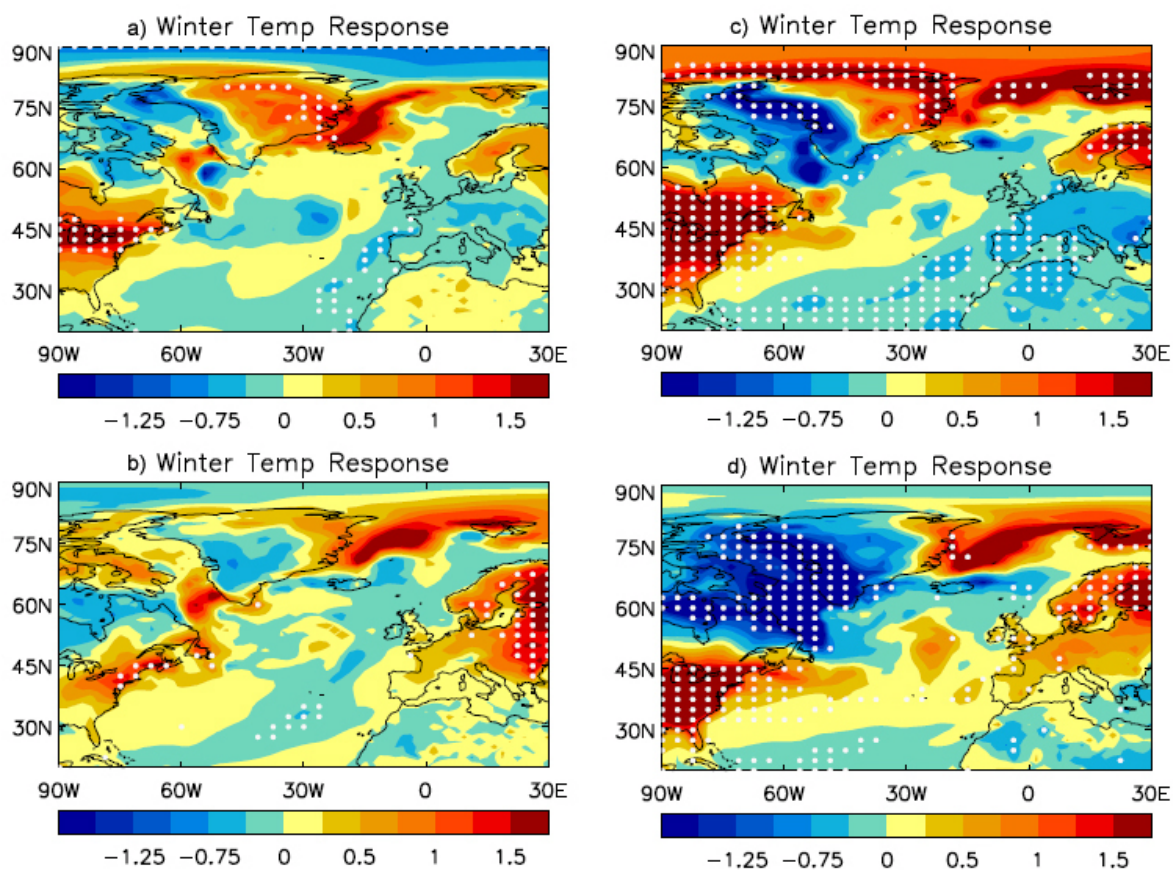


Obrázek 12: Vztah mezi úrovní sluneční aktivity a přízemní teplotou vzduchu severní polokoule dle práce Georgieva et al. (2007)

Černá čára znázorňuje 11-letý klouzavý průměr počtu slunečních skvrn. Obdelníky ve spodní části grafu reprezentují měření na jednotlivých stanicích. Šedé obdelníky znázorňují kladnou korelaci teploty vzduchu a sluneční aktivity, černé obdelníky pro zápornou korelaci.

zdroj: Georgieva et al.(2007)

Teplota na změny v úrovni sluneční aktivity nereaguje okamžitě, i zde atmosféra vykazuje určitou odezvu. V případě globální přízemní teploty se odezva atmosféry pohybuje v řádu jednoho roku (Lockwood, 2012). Obrázek 6 pro představu zobrazuje stav v oblasti severního Atlantiku.



Obrázek 13: Odezva zimních teplot vzduchu v oblasti severního Atlantiku na změny v úrovni sluneční aktivity

Změny teplot jsou vypočítány pro zvýšení sluneční iradiance o $1,2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$. Mapy a) až d) znázorňují odezvu klimatického systému jeden až čtyři roky po slunečním maximu. Bílé tečky znázorňují výsledky významné na 5% hladině statistické významnosti.

zdroj: Scaife et al. (2013)

5 Hypotéza

Dle poznatků shrnutých v rešeršní části diplomové práce byla formulována hypotéza a několik výzkumných otázek, s nimiž bylo pracováno v navazující praktické části. Jak bylo popsáno v kapitole 4.3, je zde silná tendence proudění vzduchu nabývat během slunečních maxim spíše zonální směr a během slunečních minim pak naopak spíše směr meridionální, což ve svých pracech potvrdili např. Bochníček a Hejda (2005), Brugnara et al. (2013), Crooks a Gray (2005), Huth et al. (2006) aj.

Dle výše uvedeného by rovněž i cirkulační poměry nad střední Evropou měly být ovlivněny úrovní sluneční aktivity. Při vyšší sluneční aktivitě by se měly častěji vyskytovat typy se zonálním prouděním, za nižší aktivity by tomu mělo být naopak a více četné by měly být typy meridionální.

Nulová hypotéza tedy zní: proměnlivost sluneční aktivity neovlivňuje cirkulační poměry ve střední Evropě, charakteristiky proudění jsou shodné během období slunečních minim a maxim.

První výzkumnou otázkou je, zda extremita definice nízké a vysoké sluneční aktivity (extremita definice = kratší intervaly pro sluneční maxima a minima) ovlivňuje výsledky. Huth et al. (2008) ve své práci popsali, že význam projevu sluneční aktivity roste s extremitou definice slunečních maxim a minim.

Druhou výzkumnou otázkou je, zda se rozdíl četnosti cirkulačních typů za různé fáze sluneční aktivity výrazně mění se zvětšující se prodlevou odezvy atmosféry na změny sluneční aktivity. Dle získaných poznatků by měly být cirkulační poměry nad střední Evropou nejvíce korelované se sluneční aktivitou se zpožděním v řádu několik měsíců až let (např. Boberg a Lundstedt, 2002; Gray et al., 2013; Scaife et al., 2013). V této diplomové práci bylo počítáno s odezvou atmosféry na změny v úrovni sluneční aktivity v rozmezí 2 let.

Nulová hypotéza: proměnlivost sluneční aktivity neovlivňuje cirkulační poměry ve střední Evropě, charakteristiky proudění jsou shodné během období slunečních minim a maxim.

Výzkumná otázka č. 1: zda extremita definice nízké a vysoké sluneční aktivity ovlivňuje výsledky.

Výzkumná otázka č. 2: zda se rozdíl četnosti cirkulačních typů za různé fáze sluneční aktivity výrazně mění se zvětšující se prodlevou odezvy atmosféry na změny sluneční aktivity.

6 Data a metodika

6.1 Zdroje dat

V této práci byly zpracovány dva základní soubory dat. Prvním souborem jsou údaje o sluneční aktivitě kvantifikované Wolfovým číslem. Pro potřeby této práce byly využity průměrné měsíční hodnoty. Data o úrovni sluneční aktivity jsou online přístupná na stránkách Belgické královské observatoře (<http://www.sidc.be/silso/datafiles>).

Druhým souborem dat použitým a zpracovaným v rámci této práce je klasifikace atmosférické cirkulace dle Becka (2000) popisující průměrné měsíční cirkulační typy nad střední Evropou. V práci bylo pracováno s následujícími variantami (tabulka 1):

- a) cirkulační typy - 10 možných variant
- b) cirkulační subtypy - 18 možných variant
- c) rozdělení podle převládajícího směru proudění na zonální, meridionální a smíšené - 3 možné varianty

Použitá data o cirkulačních podmínkách pro střední Evropu jsou výsledkem rekonstrukce tlakového pole a teploty vzduchu z více než 30 střeoevropských meteorologických stanic s dlouhou časovou řadou měření (více v kapitole 3).

V obou případech jsou dostupné měsíční hodnoty dat v období let 1780 až 1995. Z datového souboru byl vyřazen srpen roku 1793, pro který chyběla hodnota o úrovni sluneční aktivity. I s tímto omezením se základní soubor sestává z celkem 2591 měsíců, které jsou charakterizovány hodnotami Wolfova čísla a kvalitativním vyjádřením charakteristik převládajících cirkulačních podmínek nad střední Evropou.

cirkulační typy		
W	west	západní
SW	south/west	jihozápadní
NW	north/west	severozápadní
LM	low over central Europe	cyklonální
HM	high over central Europe	anticyklonální
NW	north/west	severozápadní
NE	north/east	severovýchodní
E	east	východní
SE	south/east	jihovýchodní
S	south	jižní
cirkulační subtypy		
Wc	west cyclonic	západní cyklonální
Wa	west anticyclonic	západní anticyklonální
SWc	south/west cyclonic	jihozápadní cyklonální
SWa	south/west anticyclonic	jihozápadní anticyklonální
NWc	north/west cyclonic	severozápadní cyklonální
NWa	north/west anticyclonic	severozápadní anticyklonální
LM	low over central Europe	cyklonální
HM	high over central Europe	anticyklonální
Nc	north cyclonic	severní cyklonální
Na	north anticyclonic	severní anticyklonální
NEc	north/east cyclonic	severovýchodní cyklonální
NEa	north/east anticyclonic	severovýchodní anticyklonální
Ec	east cyclonic	východní cyklonální
Ea	east anticyclonic	východní anticyklonální
SEc	south/east cyclonic	jihovýchodní cyklonální
SEa	south/east anticyclonic	jihovýchodní anticyklonální
Sc	south cyclonic	jižní cyklonální
Sa	south anticyclonic	jižní anticyklonální
převládající směr proudění		
zon	zonal	zonální
mer	meridional	meridionální
mix	mixed	smíšený

Tabulka 1: Seznam cirkulačních charakteristik definovaných klasifikací dle Becka (2000)

6.2 Datové soubory

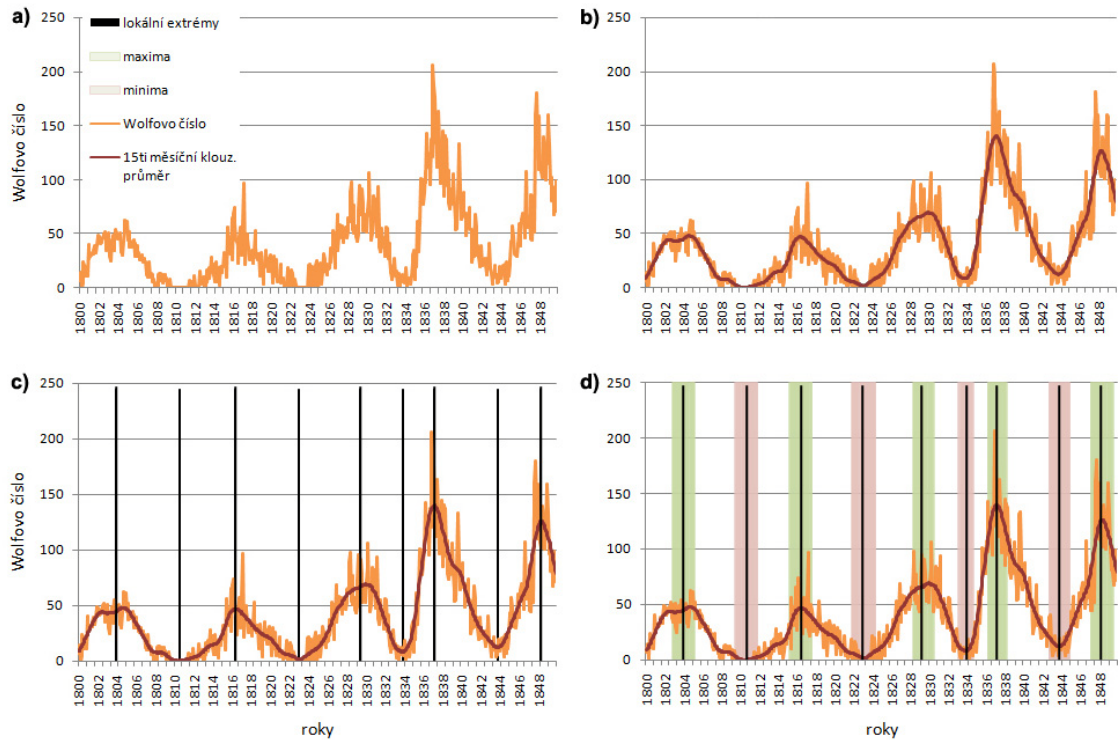
Jak je popsáno v úvodu metodické části, základní soubor sestává z 2591 měsíců, k nimž jsou přiřazeny hodnoty výše popsaných charakteristik. Aby mohly být provedeny statistické analýzy, bylo nutné data rozdělit dle hodnot Wolfova čísla na období s vysokou a nízkou fází sluneční aktivity. Datový soubor byl rozdělen třemi různými způsoby, kdy pro každé rozdělení byly počítány statistické testy, následovně:

- a) Data byla rozdělena na stejně velké části oddělené pomocí tercilů: horní třetina reprezentující období vysoké sluneční aktivity, prostřední část reprezentující období střední sluneční aktivity a spodní třetina reprezentující období nízké sluneční aktivity. Toto členění je nadále označeno jako tercily.
- b) Data byla rozdělena pomocí spodního a horního kvartilu na tři části: horní čtvrtina dat reprezentující období vysoké sluneční aktivity, hodnoty mezi spodním a horním kvantilem reprezentující období střední sluneční aktivity (50 % hodnot) a spodní čtvrtina hodnot reprezentující období nízké sluneční aktivity. Toto členění je nadále označeno jako kvartily.
- c) Data byla rozdělena na období maxim a minim sluneční aktivity v rámci jedenáctiletého slunečního cyklu. Postup určení byl následovný: hodnoty Wolfova čísla pro jednotlivé měsíce byly proloženy patnáctiměsíčním klouzavým průměrem a na takto zhlazená data byla následně použita numerická derivace (Hahm et al., 2005) s předpisem funkce:

$$f'(x) = \frac{-f(x-3m) + 9f(x-2m) - 45f(x-1m) + 45f(x+1m) - 9f(x+2m) + f(x+3m)}{60 * 5}$$

- d) Aplikací této funkce na křivce znázorňující úroveň sluneční aktivity byly nalezeny lokální extrémy (maxima a minima), které bylo následně ještě třeba jasně definovat neboť v některých případech patnáctiměsíční klouzavý průměr zcela nezhladil všechny oscilace v datech. Do intervalů reprezentujících jednotlivá období slunečních maxim a minim je pak vždy zahrnuto 20 % hodnot nejbližších lokálnímu extrému, které se vyskytují mezi dvěma po sobě následujícími extrémy (maximem a minimem). Tímto postupem bylo ve zkoumaném období let 1780 až 1995 definováno 20 intervalů (resp. 21 intervalů) charakterizujících maxima (resp. minima)

jedenáctiletého slunečního cyklu. Grafy v obrázku 14 schématicky znázorňují celý proces určení slunečních maxim a minim. Toto členění je nadále označeno jako maxima/minima.



Obrázek 14: Schématické znázornění klasifikace slunečních maxim a minim pomocí numerické derivace

V grafu a) je znázorněn průběh sluneční aktivity vyjádřen hodnotami Wolfova čísla. V grafu b) je hodnotami Wolfova čísla proložen patnáctiměsíční klouzavý průměr (černá čára). Na grafu c) jsou znázorněny lokální extrémy (černé kolmé přímky) nalezené pomocí numerické derivace. K výpočtu byl použit patnáctiměsíční klouzavý průměr. Na posledním grafu d) jsou vyznačeny intervaly definující sluneční maxima (zelené sloupce) a minima (růžové sloupce). Do intervalu je vždy zahrnuto 20 % z hodnot mezi dvěma po sobě následujícími extrémy (maximem a minimem), která jsou nejbližší danému extrému.

Jakou úroveň sluneční aktivity jednotlivá členění zahrnují je názorně zobrazeno v příloze 3, tabulka 2 pak udává počty zahrnutých měsíců v jednotlivých členěních. Jak je z tabulky patrné, rozdělení sluneční úrovně na maxima/minima je nejužším rozčleněním fáze sluneční aktivity.

členění	fáze sluneční aktivity		
	vysoká	střední	nízká
maxima/minima	519	1556	516
kvartily	647	1297	647
tercily	863	865	863

Tabulka 2: Extremita definice úrovně sluneční aktivity a počty měsíců zpracované pro jednotlivá členění

To, zda má sluneční aktivita vliv na charakter synoptické situace nad střední Evropou, bylo zároveň testováno i pro dvě období: data byla zpracována pro celý rok a pro prodlouženou zimu (prosinec, leden, únor a březen). Tento krok byl učiněn kvůli tomu, že právě během zimního období jsou vhodné podmínky pro šíření signálu proměnlivé sluneční aktivity ze stratosféry dolů do troposféry (např. Gray et al., 2010).

Poslední modifikací souborů pak bylo vzájemné posunutí měsíčních hodnot charakterizujících sluneční aktivitu a troposférickou cirkulaci, obdobně jako v práci Gray et al. (2013). Cílem tohoto posunu je zjistit, zda se cirkulační podmínky ve střední Evropě výrazně mění s narůstající prodlevou odezvy atmosféry na úroveň sluneční aktivity. Data jsou tak zpracována i pro různě dlouhou dobu odezvy, kdy byly vždy o určitý časový krok posunuty charakteristiky cirkulace. Data byla zpracována bez časové prodlevy a pro zpoždění 1, 3, 6, 9, 12, 18 a 24 měsíců. To dohromady činí 8 časových prodlev odezvy cirkulačních podmínek na fázi sluneční aktivity, se kterými bylo pracováno.

Výsledné soubory dat tedy nabývaly těchto kombinací (číslo značí počet variant v rámci jednotlivých rozlišení) :

- a) závislost zkoumána pro cirkulační typy / cirkulační subtypy / směr převládajícího proudění - **3**
- b) dle úrovně sluneční aktivity testovací soubory rozděleny na tercily / kvartily / maxima a minima - **3**
- c) data brána pro celý rok/zimní období - **2**
- d) rozdělení souborů dle časového posunu bez zpoždění a se zpožděním (1 měsíc / 3 měsíce / 6 měsíců / 9 měsíců / 12 měsíců / 18 měsíců / 24 měsíců) - **8**

To v součtu představuje 144 kombinací různých charakteristik datových souborů, kde s každým jednotlivým souborem byly počítány statistické testy uvedené níže.

6.3 Statistické testy

Ve většině studií zabývajících se zkoumáním sluneční aktivity, které byly diskutovány v rešeršní části práce, bylo pracováno buď s vícenásobnou lineární regresí (např. Crooks and Gray, 2005) nebo s analýzou hlavních komponent (např. Huth et al., 2006). Vzhledem k povaze dat, které máme k dispozici (diskrétní data definující cirkulační charakteristiky), bylo v této diplomové práci využito jednodušších statistických postupů.

Data byla testována několika různými postupy, kdy byl na data aplikován test dobré shody chí-kvadrát - χ^2 . Pomocí tohoto testu lze prokázat, zda a do jaké míry se liší rozložení očekávané a skutečné (reálné) rozložení pozorovaných dat (Brázdil, 1981). V případě této diplomové práce to znamená, zda se liší četnosti cirkulačních typů v obdobích s vysokou (resp nízkou) sluneční aktivitou v porovnání s klimatologickým průměrem. Během výpočtu se vycházelo z předpokladu multinomického rozdělení, kde četnost každého cirkulačního typu x_j reprezentující cirkulační charakteristiku má binomické rozdělení - $x_j \sim bi(n, \pi)$.

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^k \frac{(x_j - n\pi_j)^2}{n\pi_j} \sim \chi_{k-1}^2$$

k ... počet skupin, do nichž sledovaný výběr třídíme

$n\pi_j$... teoretické (očekávané) hodnoty

x_j ... pozorované četnosti

Všechny zpracovávané soubory dat byly testovány na 5% a 10% hladině statistické významnosti. V tabulce 3 jsou znázorněny kritické hodnoty testu, s nimiž bylo pracováno.

kritická hodnota testu			
cirkulační charakteristika	počet složek	5% hladina statistické významnosti	10% hladina statistické významnosti
směr proudění	3	5,99	4,61
cirkulační typ	10	16,92	14,68
cirkulační subtyp	18	27,59	24,77

Tabulka 3: Kritické hodnoty testů

6.4 Statistické zpracování

Komplexní soubory četností cirkulačních charakteristik byly zpracovány na 3 úrovních:

- porovnávání souborů charakteristik mezi slunečním maximem a klimatologickým (dlouhodobým) průměrem
- porovnávání souborů charakteristik mezi slunečním minimem a klimatologickým (dlouhodobým) průměrem
- porovnávání souborů charakteristik mezi slunečním maximem a minimem

V druhém případě bylo testováno, zda se četnost každé jednotlivé cirkulační charakteristiky významně liší během různé fáze sluneční aktivity. Příklad: pro každý z 18 cirkulačních subtypů byla zvlášť vypočtena hodnota testu. Vstupními hodnotami byly četnosti za různé fáze sluneční aktivity (vysoká, střední a nízká) a klimatologická (průměrná) četnost daného subtypu. Oproti tomu v prvním případě bylo všech 18 cirkulačních subtypů porovnáváno dohromady pouze jedním testem.

Ve třetím případě pak bylo provedeno porovnání s prací Huth et al. (2008). Autoři vypracovali studii na téma ovlivnění četnosti výskytu synoptických typů nad Evropou proměnlivou úrovní sluneční aktivity. V této práci, jež byla vypracována pro prodloužené zimní období (prosinec až březen) v letech 1949 až 2003, je zpracována klasifikace atmosférické cirkulace dle Hesse a Brezowského. Protože synoptická klasifikace dle Becka (2000) nezahrnuje celé zkoumané období práce Huth et al. (2008) a je vytvořena pouze do roku 1995, porovnání bohužel nebude úplně přesné a plně vypovídající. Nicméně i tak bude zajímavé srovnat, zda použití dvou odlišných synoptických klasifikací povede ke shodnému závěru či nikoliv.

Zpracované prodloužené zimní období let 1949 až 1995 zahrnuje 185 měsíců - v práci Huth et al. (2008) byly zpracovány charakteristiky pro 216 měsíců, porovnávány byly cirkulační typy a supertypy. Cirkulačních supertypů je celkem 6 (východní, západní, severní, jižní, cyklonální a anticyklonální) - tabulka 4. U cirkulačních typů nebylo třeba provádět zásahy do rozčlenění dat, neboť se jejich vektory směru proudění a cyklonalita shodují s cirkulačními typy dle Becka (2000). Klasifikace dle Hesse a Brezowského obsahuje více typů než Beckova (2000), ale vycházíme zde z toho, co použili autoři Huth et al. (2008). Rovněž se liší i časový krok obou klasifikací: den u Hess-Brezowského a měsíc u Becka (2000).

V případě supertypů bylo třeba data přeskupit do skupin dle cyklonality/anticyklonality a převládajícího směru proudění, aby bylo možno výsledky

vzájemně porovnat. Pro účely přeskupení byly použity cirkulační subtypy dle Becka (2000) - viz tabulka 4.

	cirkulační supertyp	zahrnuté cirkulační subtypy
A	anticyklonální	Wa, SWa, Nwa, HM, Na, NEa, Ea, SEa, Sa
C	cyklonální	Wc, SWc, NWc, LM, Nc, NEc, Ec, SEc, Sc
S	jižní	SWc, SWa, SEc, SEa, Sc, Sa
N	severní	NWc, Nwa, Nc, Na, NEc, NEa
W	západní	Wc, Wa, SWc, SWa, NWc, Nwa
E	východní	NEc, NEa, Ec, Ea, SEc, SEa

Tabulka 4: Seznam cirkulačních supertypů definovaných pomocí cirkulačních subtypů

7 Výsledky

Protože bylo v rámci této diplomové práce zpracováno velké množství dat, budou v jednotlivých podkapitolách prezentovány ty nejnámější a nejzajímavější dosažené výsledky a poznatky.

7.1 Porovnání s prací Huth et al. (2008)

Nejprve se zaměříme na porovnání s prací Huth et al. (2008). Autoři obdobně zkoumali, zda sluneční aktivita ovlivňuje četnost synoptických typů nad Evropou v zimním období. Výsledky autorů jsou zobrazeny v obrázku 15, grafy v obrázku 16 pak znázorňují porovnání výsledků, jichž bylo dosaženo při zpracování klasifikace dle Becka (2000). Jak je při porovnání obou skupin grafů patrné, výsledky si z větší části odpovídají.

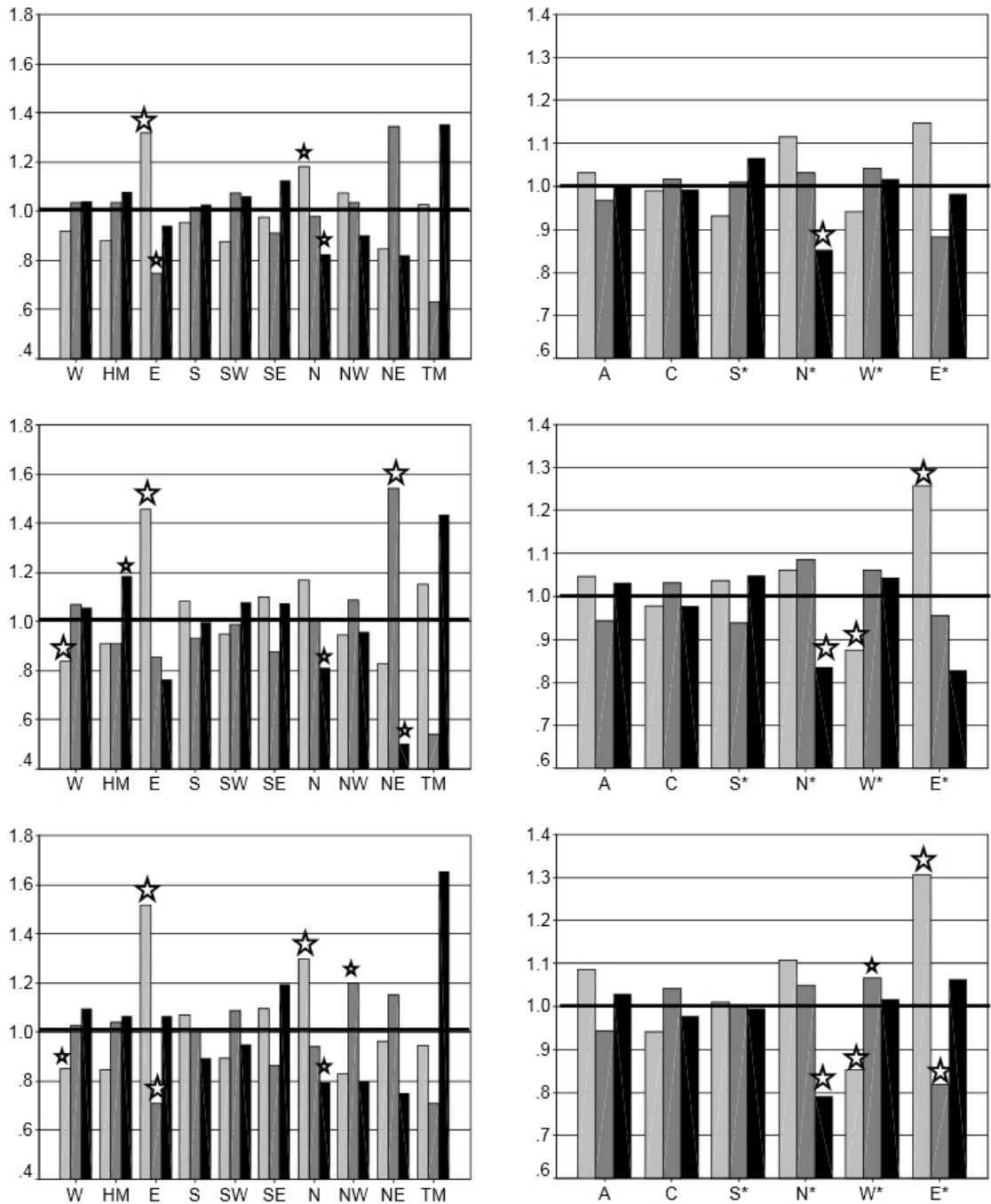
V případě cirkulačních supertypů (pravá část obrázku 16) lze pozorovat dobrou shodu výsledků, i přestože žádný z výsledků dosažený při použití klasifikace dle Becka (2000) nenabývá statistické významnosti. Grafy na obrázcích 15 a 16 si ve většině hlavních rysů vzájemně odpovídají a v datech zpracovaných v rámci této práce lze rovněž jako v případě práce Huth et al. (2008) pozorovat tendenci vyšší četnosti východních typů proudění během nízké sluneční aktivity. Při zpracování pomocí klasifikace dle Becka (2000) je jejich převaha ještě výraznější. Rovněž lze pozorovat menší četnost západních typů za nízké aktivity, která ale není tak výrazná jako v případě práce Huth et al. (2008). Obě práce se pak velmi dobře shodují při porovnání severního typu a supertypu, které v obou případech nabývají vyšší četnosti během nízké sluneční aktivity a v porovnání supertypů anticyklonálních a cyklonálních (Huth et al., 2008).

V čem se tyto dvě práce ne zcela shodují, je četnost východních typů během střední sluneční aktivity. Dle práce Huth et al. (2008) nabývá východní typ a supertyp nejmenší četnosti během střední sluneční aktivity (s výjimkou členění na maxima/minima - prostřední řádek grafu v obrázku 15). Dle zjištění dat zpracovaných v rámci této práce, mají východní typ a supertyp tendenci nabývat nejmenší četnosti za vysoké sluneční aktivity. Jak je zřejmé z obrázku 16, východní typ proudění (levý sloupec grafu) není u rozdělení na maxima/minima a kvartily během vysoké sluneční aktivity vůbec zaznamenán.

V případě cirkulačních typů (levé sloupce grafů) je situace složitější a výsledky si ne zcela odpovídají. Hlavní rozdíly lze vidět v případě typů charakterizovaných tlakovým polem (HM a TM, resp. HM a LM) a dále pak v případě typů s převládajícím prouděním severovýchodním a již zmíněným východním typem. Důvodů, proč si výsledky zcela neodpovídají, může být několik:

- a) jak již bylo uvedeno v kapitole o statistickém zpracování, data v obou studiích nepocházejí ze stejně dlouhých období. V této diplomové práci bylo zpracováno kratší časové období.
- b) použití odlišných klasifikací atmosférické cirkulace, se může projevit u většího nesouladu výsledků pro cirkulační typy (levé sloupce). Huth et al. (2008) pracovali s cirkulačními charakteristikami dle Hesse a Brezowského, kde je jednotlivý typ charakterizován stavem počasí trvajícím minimálně tři po sobě následující dny, zatímco klasifikace dle Becka (2000) reprezentuje průměrné měsíční charakteristiky cirkulace. To se v případě zpracovaných hodnot v rámci této práce může negativně projevat na malém počtu četností u některých tříd cirkulačních typů a tím i na odlišných výsledcích.
- c) použití odlišných statistických metod. Huth et al. (2008) zpracovali data pomocí blokového převzorkování. V této práci pak byl použit méně náročný chí-kvadrát test. V obou případech pak byla data testována na shodných hladinách statistické významnosti.

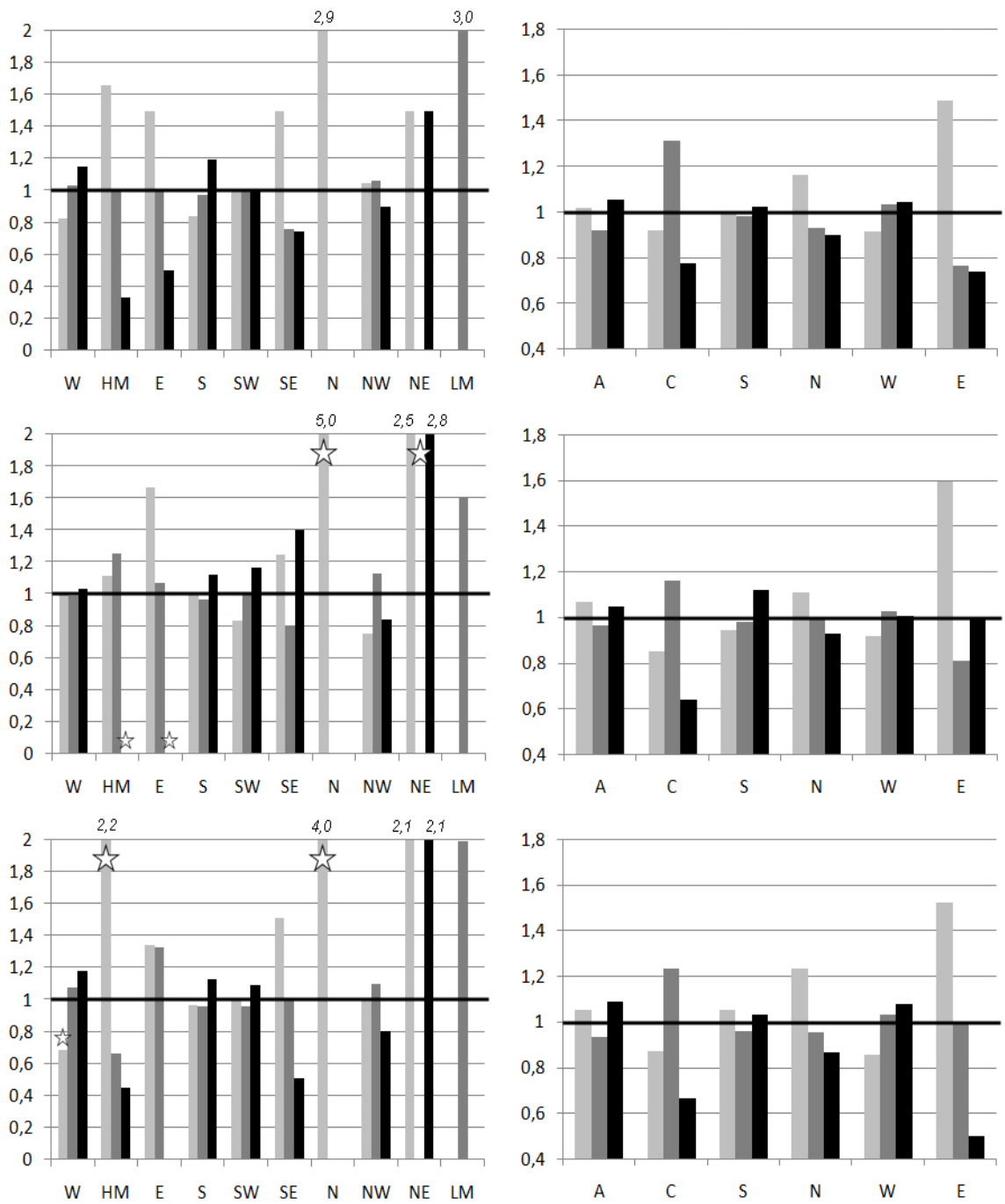
Výsledky dosažené použitím klasifikace atmosférické cirkulace dle Becka (2000) se nicméně v hlavních rysech shodují s výsledky autorů Huth et al. (2008). Největší rozdíl lze pravděpodobně spatřovat v odlišném statistickém zpracování, které v rámci této práce předkládá nižší počet statisticky významných výsledků, a na odlišné definici trvání jednotlivých cirkulačních charakteristik.



Obrázek 15: Výsledky práce Huth et al. (2008)

Grafy vyjadřují poměr výskytu četností jednotlivých cirkulačních typů (resp. subtypů) a jejich dlouhodobé průměrné četnosti. Pod sebou jsou zobrazeny grafy reprezentující rozdělení na tercily (horní řádek), sluneční maxima/minima (prostřední řádek) a kvartily (spodní řádek). V levém sloupci jsou grafy pro cirkulační typy, v pravém sloupci jsou pak znázorněny cirkulační supertypy. Jednotlivé sloupce u cirkulačních typů (resp. subtypů) znázorňují různou úroveň sluneční aktivity - nízkou (levý sloupec), střední (prostřední sloupec) a vysokou (pravý sloupec). Velká (malá) hvězdička znázorňuje statisticky významný výsledek na 5% (10%) hladině statistické významnosti. Data jsou zpracovaná pro prodloužené zimní období.

zdroj: Huth et al. (2008)



Obrázek 16: Výsledky porovnávací práci Huth et al. (2008) pro období let 1949 až 1995

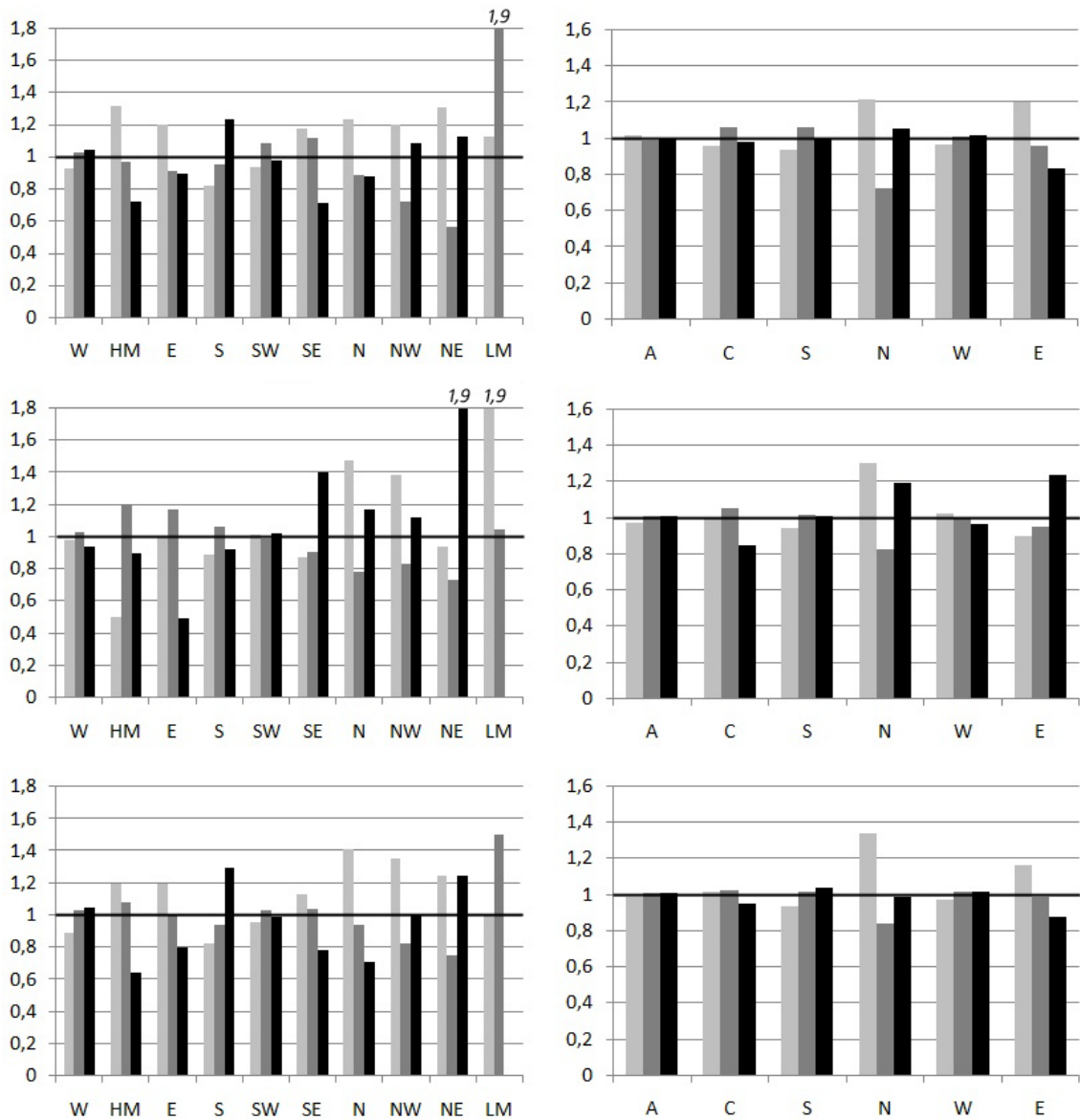
Interpretace grafů stejná jako u obrázku 15. Čísla nad sloupci vyjadřují poměr četností jednotlivých cirkulačních typů a jejich dlouhodobé průměrné četnosti. Data jsou zpracovaná pro prodloužené zimní období.

7.2 Cirkulační charakteristiky v období 1780 až 1995

Další zde prezentované výsledky se budou vztahovat již pouze k období let 1780 až 1995. Obrázek 17 nabízí zajímavé porovnání s výsledky autorů Huth et al. (2008) pro delší časové období. Tento graf, obdobně jako dva předchozí, reprezentuje četnosti jednotlivých cirkulačních typů a supertypů pro různé členění úrovně sluneční aktivity během zimního období.

Jak je z obrázku 17 patrné, jsou četnosti některých cirkulačních charakteristik ovlivěny definicí úrovně sluneční aktivity. To je velmi výrazné hlavně v pravé části grafu znázorňujícím cirkulační supertypy. V případě východního supertypu, je zde vidět velký rozdíl v četnosti pro jednotlivé rozčlenění sluneční úrovně. Výsledky pro členění maxima/minima se liší od výsledků pro tercily a kvartily, které jsou si velmi podobné, a relativní četnost východního supertypu tak roste s extremitou definice sluneční aktivity (prostřední řádek grafu v obrázku 17). Dle znázorněných cirkulačních typů se na tomto výrazném nárůstu četnosti podílí všechny tři směry proudění obsahující východní složku směru - typ severovýchodní, východní i jihovýchodní.

Při porovnání s kratším časovým obdobím (obrázek 16) lze najít několik významných rozdílů. Zajímavé výsledky lze pozorovat v případě četností východního supertypu. Ten je pro kratší zpracované období (obrázek 16) nejvíce četný za nízké sluneční aktivity, za vysoké aktivity je pak četnost toho supertypu výrazně nižší než je klimatologický průměr (rovněž s výjimkou členění na maxima/minima). U západního supertypu pak pro delší sledované období (obrázek 17) vymizel trend nižší četnosti za nízké sluneční aktivity.

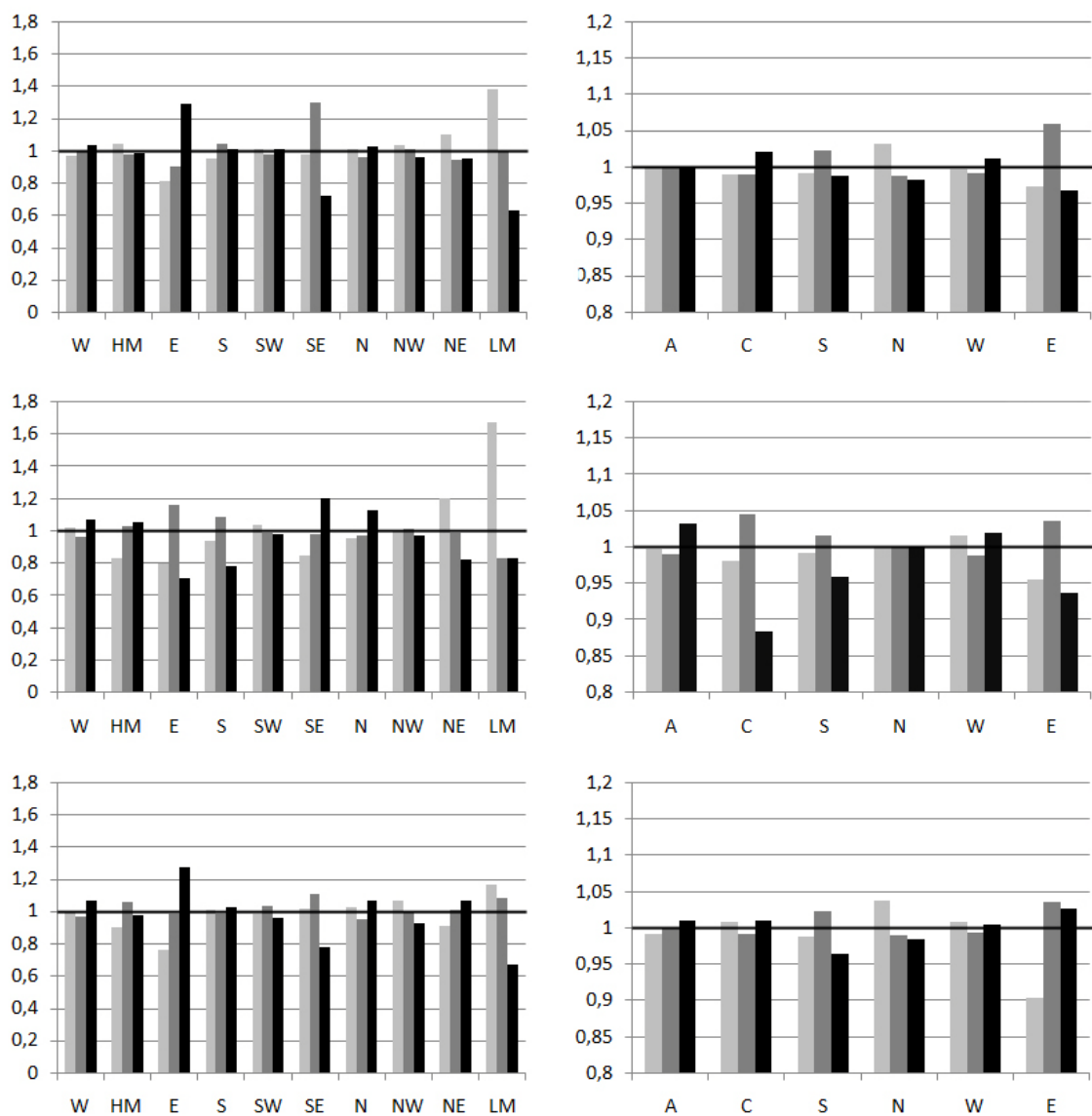


Obrázek 17: Porovnání četností cirkulačních typů za různé sluneční aktivity pro zimu za období let 1780 až 1995

Grafy vyjadřují poměr výskytu četností jednotlivých cirkulačních typů (resp. subtypů) a jejich dlouhodobé průměrné četnosti. Pod sebou jsou zobrazeny grafy reprezentující rozdělení na tercily (horní řádek), sluneční maxima/minima (prostřední řádek) a kvartily (spodní řádek). V levém sloupci jsou grafy pro cirkulační typy, v pravém sloupci jsou pak znázorněny cirkulační supertypy. Jednotlivé sloupce u cirkulačních typů (resp. subtypů) znázorňují různou úroveň sluneční aktivity - nízkou (levý sloupec), střední (prostřední sloupec) a vysokou (pravý sloupec). Čísla nad sloupci vyjadřují poměr výskytu cirkulačních charakteristik vzhledem k jejich dlouhodobé průměrné četnosti.

Pokud budou porovnány grafy v obrázcích 17 a 18 (četnosti cirkulačních typů za různé sluneční aktivity pro zimu a celý rok) je patrné, že vliv proměnlivosti sluneční aktivity na cirkulační charakteristiky ve střední Evropě je odlišný při působení během zimního období a celého roku. Během zimního období, jsou četnosti u některých cirkulačních typů více rozkolísané, což naznačuje větší ovlivnění úrovní sluneční aktivity. To platí jak v případě cirkulačních typů, tak i supertypů (zde je třeba brát v potaz jiné měřítko v grafu v obrázku 18 a správně interpretovat zobrazené hodnoty). Rozdílnost ovlivnění během zimy a celého roku je nejvíce patrná v případě severozápadního a severovýchodního cirkulačního typu, jejichž četnosti za různé fáze sluneční aktivity jsou při zpracování pro celý rok více vyrovnané.

Největší rozdíly v četnostech jsou patrné u severního supertypu. Při zpracování delšího období let 1780 až 1995 (obrázek 17) je četnost toho subtypu rovnoměrně rozložena do různých fází sluneční aktivity. V případě zimního období je tento cirkulační supertyp četnější během nízké i vysoké sluneční aktivity, výrazně méně četný je pak při střední sluneční aktivitě.



Obrázek 18: Porovnání četností cirkulačních typů za různé sluneční aktivity pro celý rok za období let 1780 až 1995

Grafy vyjadřují poměr výskytu četností jednotlivých cirkulačních typů (resp. subtypů) a jejich dlouhodobé průměrné četnosti. Pod sebou jsou zobrazeny grafy reprezentující rozdělení na tercily (horní řádek), sluneční maxima/minima (prostřední řádek) a kvartily (spodní řádek). V levém sloupci jsou grafy pro cirkulační typy, v pravém sloupci jsou pak znázorněny cirkulační supertypy. Jednotlivé sloupce u cirkulačních typů (resp. subtypů) znázorňují různou úroveň sluneční aktivity - nízkou (levý sloupec), střední (prostřední sloupec) a vysokou (pravý sloupec).

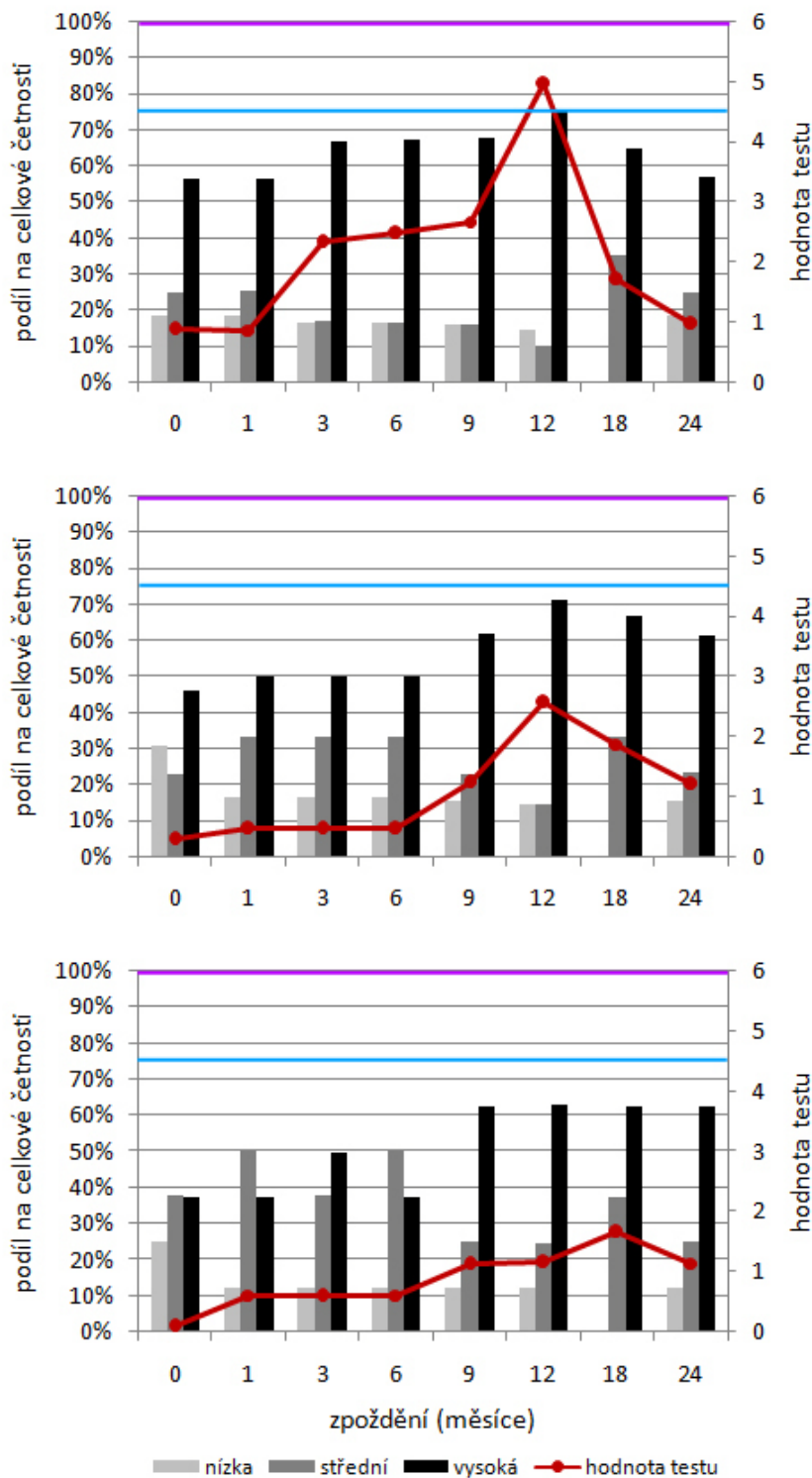
7.3 Vliv členění úrovně sluneční aktivity na výsledky

První z výzkumných otázek bylo to, zde extremita definice nízké a vysoké sluneční aktivity ovlivňuje výsledky. Při zpracování toho, zda se celé soubory cirkulačních charakteristik výrazně liší mezi nízkou a vysokou sluneční aktivitou, bylo dosahováno nejvýraznějších rozdílů při rozdělení sluneční úrovně na maxima/minima, (nejužší členění). Nejméně výrazných výsledků pak bylo dosahováno při členění na tercily, které naopak nabízí nejširší intervaly pro extrémy sluneční aktivity. To, jaká konkrétní úroveň sluneční aktivity spadá do různých členění, je znázorněno v příloze 3.

Obrázek 19 (Rozložení četnosti severozápadního cyklonálního subtypu NWc pro zpoždění do 24 měsíců) nabízí velmi názornou ilustraci toho, jak rozdílných výsledků bylo dosahováno pro zpracování různých definic úrovně sluneční aktivity. Červenou linkou je v tomto grafu znázorněna hodnota testu, jež vyjadřuje míru rozdílu četností subtypu za různé úrovně sluneční aktivity. Čím vyšší hodnota, tím větší rozdíl v četnosti za různé fáze sluneční aktivity. Četnosti při různé úrovni aktivity byly vztaheny ke klimatologické (průměrné) četnosti subtypu. Z obrázku 19 je velmi dobře patrné, že s klesající extremitou definice úrovně sluneční aktivity klesá i hodnota testu. To nám říká, že se zvyšující se extremitou definice úrovně sluneční aktivity roste rozdíl v četnosti daného cirkulačního subtypu mezi různými fázemi sluneční aktivity. Tedy, že extremita definice úrovně sluneční aktivity pozitivně ovlivňuje výsledky.

Tento fakt byl patrný již v obrázcích 16 a 18. Zde nejextrémnější definici úrovně sluneční aktivity (dělení na maxima/minima) reprezentuje prostřední řádek grafů. Při porovnání s ostatními členěními sluneční aktivity je v těchto grafech jasně zřetelné, jak je chování jednotlivých cirkulačních typů (resp. subtypů) ovlivněno extremitou definice sluneční aktivity.

Pro doplnění je třeba podotknout, že u členění na sluneční maxima/minima v grafu v obrázku 19, se jedná o jediný statisticky významný výsledek (s výjimkou porovnávání s prací Huth et al. (2008) - viz obrázek 16), kterého bylo v rámci této diplomové práce dosaženo. Nulovou hypotézu v případě cirkulačního subtypu NWc zamítáme na 10% hladině statistické významnosti, z čehož vyplývá, že četnost severozápadního cyklonálního proudění je ovlivněna proměnlivostí sluneční aktivity. Statisticky významného výsledku bylo dosaženo pro zpoždění 12 měsíců (obrázek 19).



Obrázek 19: Rozložení četnosti severozápadního cyklonálního subtypu (NWc) mezi různou úrovní sluneční aktivity pro zpoždění do 24 měsíců v zimním období let 1780 až 1995

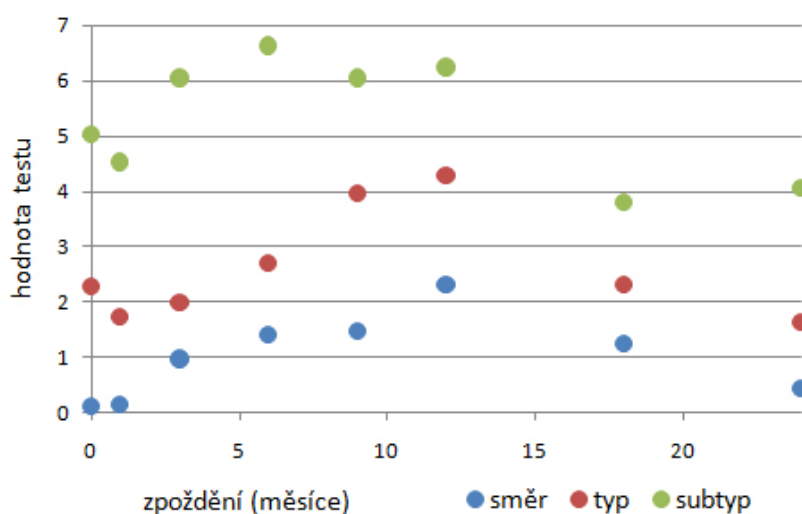
Pod sebou jsou grafy seřazeny sestupně dle extremity rozčlenění úrovně sluneční aktivity: maxima/minima (horní řádek), kvartily (prostřední řádek) a tercily (spodní řádek). Modrá čára znázorňuje 10% hladinu statistické významnosti, fialová čára znázorňuje 5% hladinu statistické významnosti.

7.4 Změna četnosti cirkulačních typů s rostoucím zpožděním atmosféry

Druhou výzkumnou otázkou bylo to, zda se četnosti cirkulačních typů výrazně mění s prodloužující se odezvou atmosféry na změny ve sluneční aktivitě. Dosažené výsledky nejsou jednotné a mění se v závislosti na tom, zda se jedná o data pro zimní období nebo celý rok.

Obrázky 20 a 21 znázorňují, jak se s prodloužující odezvou atmosféry na změny ve sluneční aktivitě mění rozdíl mezi soubory četností cirkulačních charakteristik. Hodnoty testu charakterizují, jak se četnosti celých souborů cirkulačních typů (a ostatních charakteristik) mění mezi různou fází sluneční aktivity. Čím vyšší hodnota testu, tím větší rozdíl v četnostech za různé fáze sluneční aktivity.

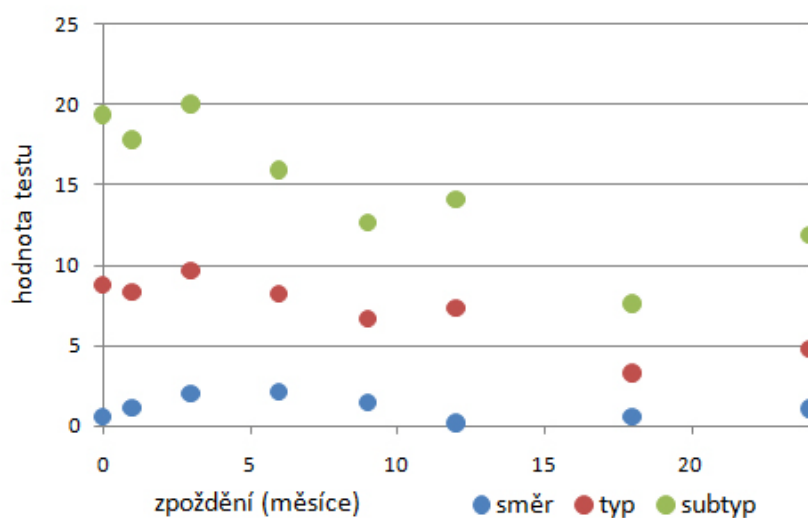
Pro data za celý rok (obrázek 20) je patrné, že vliv sluneční aktivity na četnosti cirkulačních charakteristik sílí se zpožděním do jednoho roku a pak slábne. Zejména u cirkulačních typů (červené body) a převládajícího směru proudění (modré body) je při zpoždění do jednoho roku pro prodlevu odezvy atmosféry a hodnotu testu zřetelný téměř lineární vztah.



Obrázek 20: Závislost rozdílu četnosti cirkulačních charakteristik při různé úrovni sluneční aktivity na prodloužující se odezvě atmosféry na změny ve sluneční aktivitě pro celý rok v období let 1780 až 1995

V grafech jsou vyobrazena data pro celý rok (členění na sluneční maxima/minima). Na ose x je znázorněna prodloužující se odezva atmosféry na změny ve sluneční aktivitě. Osa y reprezentuje hodnotu testové statistiky, která udává, jak moc se liší četnosti souborů cirkulačních typů (resp. subtypů a převládajícího směru proudění) za různé fáze sluneční aktivity.

Rovněž i u dat pro zimní období (obrázek 21) je patrné, že vliv sluneční aktivity na četnosti cirkulačních charakteristik slábne s rostoucím zpožděním odezvy atmosféry na změny v úrovni sluneční aktivity. Nicméně pro data za zimní období není průběh stejný jako pro celý rok, kde bylo nejvyšších hodnot testu dosahováno při zpoždění jeden rok. V grafu na obrázku 21 je patrné, že vliv sluneční aktivity na četnosti cirkulačních typů (resp. subtypů a směru proudění) nabývá nepatrně vyšších hodnot pro zpoždění 3 měsíce. Pokud ale uvažíme graf jako celek, lze zjednodušeně říci, že s rostoucím zpožděním vliv sluneční aktivity na cirkulační podmínky v zimním období klesá.



Obrázek 21: Závislost rozdílu četnosti cirkulačních charakteristik při různé úrovni sluneční aktivity na prodlužující se odezvě atmosféry na změny ve sluneční aktivitě pro zimu v období let 1780 až 1995

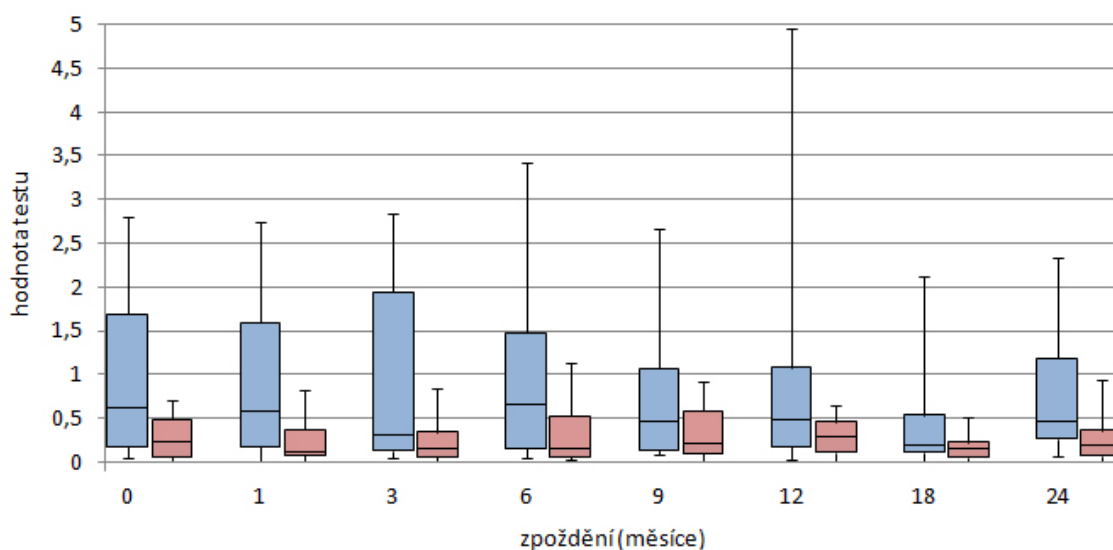
V grafech jsou vyobrazena data pro zimu (členění na sluneční maxima/minima). Na ose x je znázorněna prodlužující se odezva atmosféry na změny ve sluneční aktivitě. Osa y reprezentuje hodnotu testové statistiky, která udává, jak moc se liší četnosti souborů cirkulačních typů (resp. subtypů a převládajícího směru proudění) za různé fáze sluneční aktivity

K obrázkům 20 a 21 je ještě nutno dodat, že rozdílné rozmístění datových řad vůči ose y neznamena, že by např. výsledky dosažené u převládajícího směru proudění byly méně významné než u cirkulačních subtypů. Hodnota testu je ovlivněna počtem jednotlivých složek vstupujících do procesu testování. To v případě převládajícího směru proudění činí 3, u typů 10 a u subtypů pak 18 složek. S tím je

spojena i vyšší kritická hodnota pro přijetí (resp. odmítnutí) nulové hypotézy (viz tabulka 3). U dat zobrazených v obrázku 20 a 21 nebylo v žádném z případů dosaženo statisticky významného výsledku.

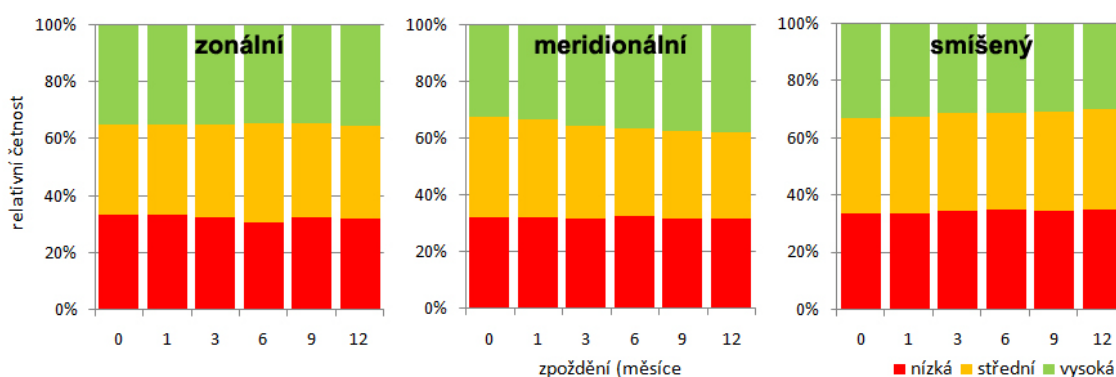
Jinak je závislost cirkulačních charakteristik na prodlužující se odezvě atmosféry zobrazena v grafu na obrázku 22. Data zobrazená v tomto grafu reprezentují testové hodnoty (způsob jejich dosažení je obdobný jako v předchozím případě) pouze pro cirkulační subtypy. Data jsou zpracována pro rozdělení sluneční aktivity na maxima/minima. Modré krabicové diagramy reprezentují hodnoty pro zimní období, růžové krabicové diagramy znázorňují testové hodnoty pro celý rok.

Jak je z obrázku 22 patrné, četnosti jednotlivých subtypů mezi různou úrovní sluneční aktivity, vykazují větší variabilitu v zimním období (modré grafy). Hodnoty testu pro zimní období dosahují vyšších hodnot. Kritická hodnota testu je pro oba soubory cirkulačních subtypů stejná (viz tabulka 3). Můžeme tedy tvrdit, že cirkulační poměry jsou sluneční aktivitou více ovlivněny během zimního období než v případě celého roku.



Obrázek 22: Variabilita rozdílů četností cirkulačních subtypů mezi různou fází sluneční aktivity a jejich trendy s prodlužující se odezvou atmosféry v období let 1780 až 1995. Modré krabicové grafy reprezentují hodnoty pouze pro zimní období, růžové krabicové grafy pak hodnoty za celý rok. Hodnoty testu vyjadřují rozdíl četností jednotlivých cirkulačních subtypů mezi jednotlivými fázemi sluneční aktivity (nízka, střední, vysoká) vztažené ke klimatologické četnosti jednotlivých subtypů. Použítá jsou data rozčleněná dle úrovně sluneční aktivity na maxima/minima.

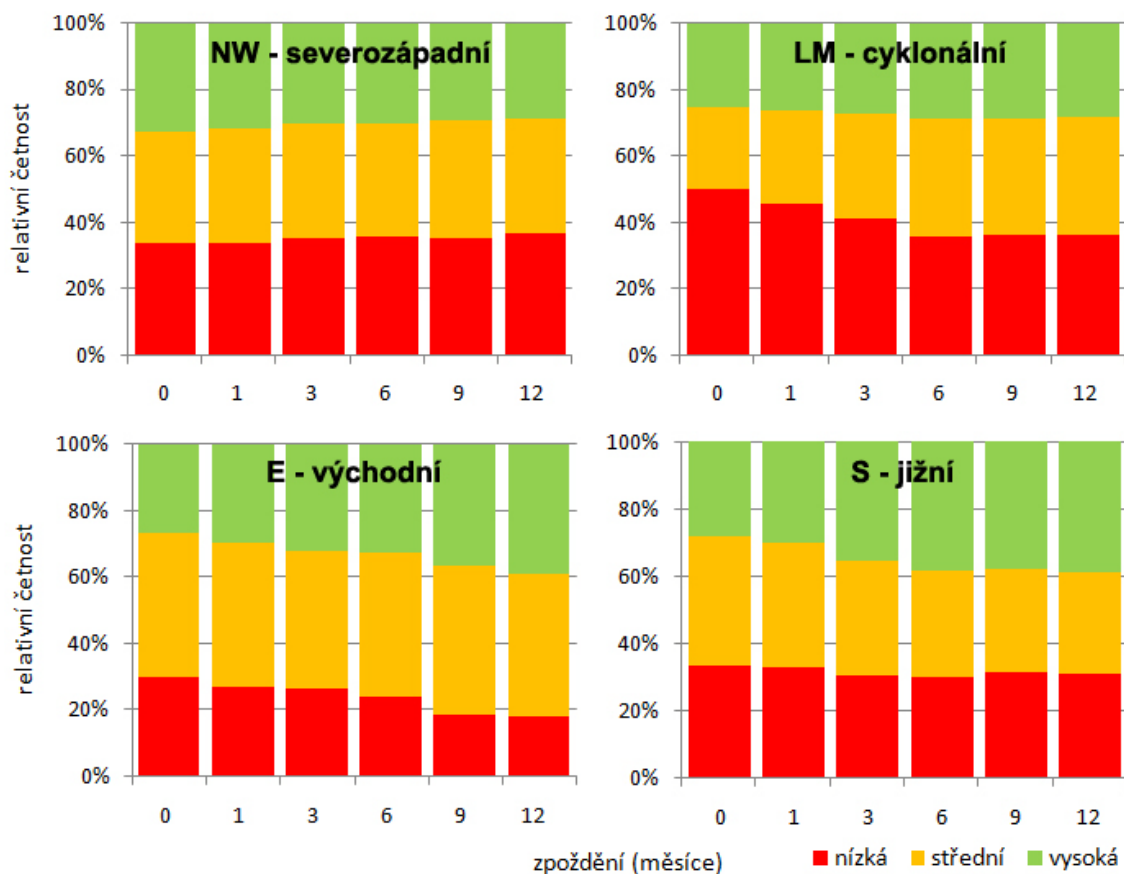
Pro představu, které konkrétní cirkulační charakteristiky se s postupující dobou odezvy mění nejvýrazněji, je níže k dispozici obrázek 23 (resp. obrázek 24) znázorňující relativní četnosti u převládajícího směru proudění (resp. vybraných cirkulačních subtypů) pro zpoždění do jednoho roku. Z obrázku 23 je vidět, že během slunečních maxim s postupující dobou lehce nabývá na četnosti zonální a meridionální proudění. Četnost výskytu smíšeného proudění pak pro období maxim s rostoucím zpožděním klesá.



Obrázek 23: Změny relativní četnosti převládajících směrů proudění za různé fáze sluneční aktivity pro zpoždění do 12 měsíců v období let 1780 až 1995

V každé ze tří sekcí grafu je znázorněna změna relativní četnosti převládajícího směru proudění mezi nízkou (červený sloupec), střední (žlutý sloupec) a vysokou (zelený sloupec) sluneční aktivitou. Zobrazená data jsou pro celý rok a členění na maxima/minima.

V obrázku 24 jsou pak znázorněny čtyři cirkulační typy, u nichž jsou nejvíce patrné změny v četnosti s rostoucím zpožděním odezvy atmosféry na změny v úrovni sluneční aktivity. Během maxim je nejvíce výrazný trend nabývání na četnosti s rostoucím zpožděním u jižního a východního typu. V případě východního typu je pak patrné, že nabývání na četnosti při maximech je na úkor četnosti typu za slunečních minim, což u jižního typu není přítomné. Naopak během slunečních minim s rostoucím zpožděním klesá četnost severozápadního typu, což je v dobré shodě s poklesem četnosti smíšených typů (obrázek 23). Cyklonální typ je s rostoucím zpožděním odezvy atmosféry na změny ve sluneční aktivitě méně četný za nízké aktivity.



Obrázek 24: Změny relativní četnosti vybraných cirkulačních typů za různé fáze sluneční aktivity pro zpoždění do 12 měsíců v období let 1780 až 1995

V každé ze čtyř sekcí grafu je znázorněna změna relativní četnosti daného cirkulačního typu mezi nízkou (červený sloupec), střední (žlutý sloupec) a vysokou (zelený sloupec) sluneční aktivitou. Zobrazená data jsou pro celý rok a členění na maxima/minima.

8 Diskuse

Diskuze byla již částečně provedena při prezentaci výsledků, nejvýznamnější poznatky z praktické části zde budou ještě jednou zopakovány a diskutovány s literaturou.

Výsledky dosažené v této práci nejsou (až na jednu výjimku) statisticky významné. Jedním z důvodů, proč tomu tak je, může být malá síla zvoleného testu. Pro zpracování této diplomové práce bylo obtížné zvolit vhodný statistický test, neboť vstupní data (synoptická klasifikace) udávají kvalitativní hodnocení a většina statistických testů se používá pro zpracování kvantitativních dat.

V praktické části práce bylo nejprve provedeno porovnání s prací Huth et al. (2008). Ač zpracovaná data nebyla k dispozici za stejně dlouhé období jako v případě autorů Huth et al. (2008), bylo v hlavních bodech dosaženo srovnatelných výsledků. Východní typy nabývají v zimním období vyšší četnosti během nízké sluneční aktivity, což je částečně kompenzováno nižším výskytem západních typů.

Při zpracování dat pro období let 1780 až 1995 a porovnáním s výše zmíněným kratším obdobím bylo nalezeno několik významných rozdílů. Změny v četnosti lze pozorovat v případě východního supertypu. Ten je pro delší zpracované období výrazně četnější za vyšší sluneční aktivity než pro kratší období a převaha jeho četnosti za nízké fáze sluneční aktivity již není tak výrazná.

Dle poznatků shrnutých v rešeršní části práce (např. Bochníček a Hejda, 2005; Brugnara et al., 2013; Crooks a Gray, 2005; Huth et al., 2006 aj.) by v obdobích vyšší sluneční aktivity měl být četnější západní typ proudění a celkově by mělo být intenzivnější zonální proudění. To se v rámci této práce ne zcela potvrdilo. Dle dosažených výsledků při členění na maxima/minima pro delší období zde existuje tendence východního proudění pro delší sledované období nabývat vyšší četnosti při obdobích vyšší sluneční aktivity. V případě západního proudění není trend nižší četnosti během slunečních minim patrný a ani výskyt zonálního proudění jako celku nevykazuje výraznější rozdíl mezi různými úrovněmi sluneční aktivity. Naopak trochu paradoxně má meridionální proudění větší tendenci být četnější během období s vyšší sluneční aktivitou, což je způsobeno vyšším výskytem severního proudění v tomto období.

Nabízí se otázka, zda může být tento rozpor ve výsledcích způsoben pouze délkou zkoumaného období. Pokud byla data v rámci této práce zpracována pouze pro kratší období dle práce Huth et al. (2008), byly výsledky obou prací porovnatelné. Pokud ale byla data zpracována pro delší období, již nebylo dosaženo tak velké shody.

Možným vysvětlením menšího vzájemného vztahu mezi úrovní sluneční aktivity a cirkulačními charakteristikami se zvětšující se délkou zkoumaného období může být původ dat. Údaje o stavu atmosféry z dřívější doby dostáváme pomocí rekonstrukce. Ta je s postupem do minulosti stále méně přesná a data jsou zatížena větší a větší chybou.

Zároveň to může do jisté míry souviset s tvrzením Thejlla et al. (2003). Autoři tvrdí, že korelace indexu Severoatlantické oscilace s úrovní sluneční aktivity je pro období posledních přibližně 130 let nevyrovnaná a při zkoumání kratšího období může být dosaženo výrazně odlišných výsledků. Index Severoatlantické oscilace samozřejmě není totožný s cirkulačními poměry nad střední Evropou, ale spojitost mezi nimi existuje a četnosti cirkulačních typů jsou Severoatlantickou oscilací do značné míry ovlivněny.

Proto si dovoluji vyslovit domněnku, že pokud vztah vyslovený Thejlllem et al. (2003) skutečně platí a korelace indexu NAO a sluneční aktivity je ovlivněna délkou zkoumaného období, může vztah zmenšující se vzájemné korelace pro delší období platit i pro cirkulační poměry ve střední Evropě. Díky této teorii by pak bylo možné vysvětlit, proč je vliv sluneční aktivity na cirkulační charakteristiky více patrný při zpracování kratšího období.

Při zkoumání zda extremita definice úrovně sluneční aktivity ovlivňuje výsledky, byla nalezena jasná odpověď. Obdobně jako v práci Huth et al. (2008) bylo zjištěno, že extremita definice sluneční aktivity prokazatelně ovlivňuje výsledné hodnoty. Vzhledem k tomu, že práce autorů se rovněž vztahovala k tématice ovlivnění cirkulačních poměrů, lze usoudit, že právě tyto jsou extremitou definice velmi silně ovlivněny.

V rámci této práce bylo zjištěno, že extremita definice úrovně sluneční aktivity nejvíce pozměňuje četnosti u východního supertypu. Ten má při nejextrémnějším rozdělení sluneční aktivity (členění na maxima/minima) tendenci nabývat vyšších četností při vysoké aktivitě a nejmenších četností při nízké aktivitě. Rovněž toto členění sluneční aktivity přineslo jediný statisticky významný výsledek, kterého bylo v této práci dosaženo. Bylo zjištěno, že četnost cirkulačního subtypu NWc (severozápadní cyklonální) je prokazatelně ovlivněna úrovní sluneční aktivity na 10% hladině statistické významnosti. Tohoto výsledku bylo dosaženo pro 12-měsíční zpoždění odezvy atmosféry na sluneční aktivitu.

Na výzkumnou otázku týkající se toho, zda se cirkulační charakteristiky výrazně mění s prodlužující se odezvou atmosféry na změny sluneční aktivity, byla nalezena zajímavá odpověď. Jak je z výsledků patrné, v případě zpracování celých souborů cirkulačních charakteristik pro celý rok bylo zjištěno, že pro zpoždění cirkulace do 12 měsíců zde existuje téměř lineární vztah a cirkulační charakteristiky se nejvíce mění se zpožděním do jednoho roku. Pro delší zpoždění vliv sluneční aktivity na četnosti cirkulačních typů (resp. subtypů a směru proudění) slábne. Při zpracování celých souborů cirkulačních charakteristik pouze pro zimní období bylo dosaženo odlišných výsledků a vliv sluneční aktivity na cirkulační podmínky v zimním období s rostoucím zpožděním klesá.

Pokud byla tato otázka zkoumána z pohledu variability jednotlivých cirkulačních subtypů, bylo dosaženo částečně stejných výsledků. Variabilita jednotlivých subtypů braná pro celý rok, nabývá s postupující dobou zpoždění velmi obdobného trendu, jako bylo naznačeno výše. V tomto případě zde existuje lineární trend pro kratší dobu zpoždění cirkulace. V případě srovnání statistik pouze pro zimní období není dosažena dobrá shoda. Variabilita jednotlivých cirkulačních subtypů je odlišná a výrazně vyšší než u zpracování celých souborů cirkulačních charakteristik.

Tyto výsledky naznačují, že vliv sluneční aktivity na cirkulační poměry není lineární, jak ve své práci naznačili např. Gray et al. (2013) a Huth et al. (2008), a to ani s rostoucím zpožděním. Bylo zde částečně potvrzeno, že odpověď atmosféry na změny v úrovni sluneční aktivity není okamžitá, jak ve své práci zhodnotili např. Boberg a Lundstedt (2002) aj. a nabývá zpoždění v řádu měsíců až několika málo let. Dozajista by bylo zajímavé sledovat, jak by se cirkulační charakteristiky měnily ještě s větším zpožděním a jaký vztah existuje mezi cirkulačními charakteristikami a úrovní sluneční aktivity v delších časových měřítkách.

9 Závěr

V rámci diplomové práce bylo dosaženo dílčích statisticky významných výsledků. Bylo prokázáno, že četnost severovýchodního cyklonálního cirkulačního subtypu je prokazatelně ovlivněna různou fází sluneční aktivity. Nejčetnější je tento subtyp během vysoké sluneční aktivity, statisticky významný výsledek byl prokázán pro zpoždění odezvy atmosféry 12 měsíců.

Při zkoumání kratšího období let 1949 až 1995 bylo dosaženo srovnatelných výsledků s prací Huth et al. (2008), již tuto problematiku zkoumali pro období let 1949 až 2003. Pokud však byla data zpracována pro delší období (1780 až 1995), dosažené výsledky již nejsou ve stěžejních bodech v dobré shodě s prací Huth et al. (2008), že východní proudění nabývá větší četnosti při nízké sluneční aktivitě a západní proudění je během této fáze sluneční aktivity méně čtené.

Při zkoumání toho, zda zpoždění odezvy atmosféry na změny ve sluneční aktivitě ovlivňuje cirkulační poměry ve střední Evropě, bylo zjištěno, že pozměnění cirkulačních charakteristik není okamžité. Větší variabilita cirkulačních charakteristik je jasně přítomna během zimního období. Ani pro jedno zkoumané období (tedy zimu a celý rok) nebyl jasně vyjádřen trend měnící se variability cirkulačních charakteristik s rostoucí dobou zpoždění.

Tato diplomová práce prokázala, že vliv sluneční proměnlivosti na cirkulační poměry nad střední Evropou není v čase stálý. Bylo zjištěno, že četnosti jednotlivých cirkulačních typů se liší v závislosti na délce zkoumaného období. Vliv proměnlivosti sluneční aktivity na cirkulační poměry střední Evropy je více patrný při zpracování kratšího časového období.

10 Seznam obrázků a tabulek

Obrázky:

Obrázek 1: Průběh sluneční aktivity v letech 1749 až 2014

Obrázek 2: Vzájemný vztah proměnných charakterizujících úroveň sluneční aktivity

Obrázek 3: Schématické znázornění mechanismů přenášejících sluneční signál do troposféry

Obrázek 4: Plošné rozmístění meteorologických stanic vstupujících do klasifikace Beck (2000)

Obrázek 5: Odezva různých komponent troposférické cirkulace na změny v úrovni sluneční aktivity

Obrázek 6: Korelační mapa znázorňující Severoatlantickou oscilaci

Obrázek 7: Porovnání průběhu slunečního cyklu a indexu NAO v období let 1821 až 2011

Obrázek 8: Závislost indexu NAO na prodlužující se odezvu proměnlivosti sluneční aktivity

Obrázek 9: Korelační mapa znázorňující Arktickou oscilaci

Obrázek 10: Výskyt blokujících anticyklon v závislosti na úrovni sluneční aktivity

Obrázek 11: Časový průběh anomálií globální průměrné teploty a odchylky sluneční iradiance v období let 1959 až 2004

Obrázek 12: Vztah mezi úrovní sluneční aktivity a přízemní teplotou vzduchu severní polokoule dle práce Georgieva et al. (2007)

Obrázek 13: Odezva zimních teplot vzduchu v oblasti severního Atlantiku na změny v úrovni sluneční aktivity

Obrázek 14: Schématické znázornění klasifikace slunečních maxim a minim pomocí numerické derivace

Obrázek 15: Výsledky práce Huth et al. (2008)

Obrázek 16: Výsledky porovnávací práci Huth et al. (2008) pro období let 1949 až 1995

Obrázek 17: Porovnání četností cirkulačních typů za různé sluneční aktivity pro zimu za období let 1780 až 1995

Obrázek 18: Porovnání četností cirkulačních typů za různé sluneční aktivity pro celý rok za období let 1780 až 1995

Obrázek 19: Rozložení severozápadního cyklonálního subtypu (NWc) mezi různou úrovní sluneční aktivity pro zpoždění do 24 měsíců v zimním období let 1780 až 1995

Obrázek 20: Závislost rozdílu četností cirkulačních charakteristik při různé úrovni sluneční aktivity na prodlužující se odezvě atmosféry na změny ve sluneční aktivitě pro celý rok v období let 1780 až 1995

Obrázek 21: Závislost rozdílu četností cirkulačních charakteristik při různé úrovni sluneční aktivity na prodlužující se odezvě atmosféry na změny ve sluneční aktivitě pro zimu v období let 1780 až 1995

Obrázek 22: Variabilita rozdílů četností cirkulačních subtypů mezi různou fází sluneční aktivity a jejich trendy s prodlužující se odezvou atmosféry v období let 1780 až 1995

Obrázek 23: Změny relativní četnosti převládajících směrů proudění za různé fáze sluneční aktivity pro zpoždění do 12 měsíců v období let 1780 až 1995

Obrázek 24: Změny relativní četnosti vybraných cirkulačních typů za různé fáze sluneční aktivity pro zpoždění do 12 měsíců v období let 1780 až 1995

Tabulky:

Tabulka 1: Seznam cirkulačních charakteristik definovaných klasifikací dle Becka (2000)

Tabulka 2: Extremita definice úrovně sluneční aktivity a počty měsíců zpracované pro jednotlivá členění

Tabulka 3: Kritické hodnoty testů

Tabulka 4: Seznam cirkulačních supertypů definovaných pomocí cirkulačních subtypů

10.1 Seznam příloh

Příloha 1a: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

Příloha 1b: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

Příloha 1c: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

Příloha 2: Změny tlaku způsobené změnou sluneční aktivity v letech 1870-2010

Příloha 3: Graf průběhu sluneční aktivity v období let 1780-1995 se znázorněním členění úrovně sluneční aktivity

11 Použitá literatura a zdroje dat

11.1 Použitá literatura

AMBAUM, M. H., HOSKINS, B. J., STEPHENSON, D. B. Arctic oscillation or North Atlantic oscillation?. *Journal of Climate* [online]. 2001, vol. 14, no. 16, s. 3495-3507. ISSN0894-8755.

BALDWIN, M. P., DUNKERTON, T. J. Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 1999, vol. 104, no. D24, s. 30937-30946. ISSN 0148-0227.

BALDWIN, M. P., DUNKERTON, T. J. Stratospheric harbingers of anomalous weather regimes. *Science* [online]. 2001, vol. 294, no. 5542, s. 581-584. ISSN 1095-9203.

BARNSTON, A. G., LIVEZEY, R. E. A closer look at the effect of the 11-year solar cycle and the quasi-biennial oscillation on Northern Hemisphere 700 mb height and extratropical North American surface temperature. *Journal of Climate* [online]. 1989, vol. 2, no. 11, s. 1295-1313. ISSN0894-8755.

BARRIOPEDRO, D., GARCÍA-HERRERA, R., LUPO, A. R., HERNÁNDEZ, E. A climatology of Northern Hemisphere blocking. *Journal of Climate* [online]. 2006, vol. 19, no. 6, s. 1042-1063. ISSN0894-8755.

BARRIOPEDRO, D., GARCÍA-HERRERA, R., HUTH, R. Solar modulation of Northern Hemisphere winter blocking. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2008, 113, doi:10.1029/2008JD009789. ISSN 0148-0227.

BECK C. Zirkulationsdynamische Variabilität im Bereich Nordatlantik-Europa seit 1780. *Würzburger Geographische Arbeiten* [online]. 2000, vol 95. ISSN: 0510-9833.

BECK, C., JACOBET, J., JONES, P. D. 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* [online]. 2007, vol. 27, no. 4, s. 473-491. ISSN 1097-0088.

BENESTAD, Rasmus E. *Solar Activity and Earth's Climate*. 2nd printing, 2003. Springer Verlag, New York, c2002. 287 s. ISBN 3-54043-302-3.

BOBERG, F., LUNDSTEDT, H.. Solar wind variations related to fluctuations of the North Atlantic Oscillation. *Geophysical Research Letters* [online]. 2002, vol. 29. no. 15, s. 13-1. ISSN 0094-8276.

BOCHNÍČEK, J., HEJDA, P. The winter NAO pattern changes in association with solar and geomagnetic activity. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics* [online]. 2005, vol. 67, no. 1, s. 17-32. ISSN 1364-6826.

BRÁZDIL, R. *Statistické metody v geografii: cvičení*. 1. vydání, 1981. Brno: Universita J. E. Purkyně v Brně, 177 s. ISBN80-210-1260-9.

BRUGNARA, Y., BRÖNNIMANN, S., LUTERBACHER, J., ROZANOV, E. (2013). Influence of the sunspot cycle on the Northern Hemisphere wintertime circulation from long upper-air data sets. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2013, vol. 13, no. 13, s. 6275-6288. ISSN 1680-7316.

CAI, M. Dynamical amplification of polar warming. *Geophysical research letters* [online]. 2005, vol. 32, doi:10.1029/2005GL02448. ISSN 0094-8276.

CAMP, C. D., TUNG, K. K. Surface warming by the solar cycle as revealed by the composite mean difference projection. *Geophysical Research Letters* [online]. 2007, vol. 34, doi:10.1029/2007GL030207. ISSN 0094-8276.

COUGHLIN, K., TUNG, K. K. Eleven-year solar cycle signal throughout the lower atmosphere. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2004, vol. 109, doi:10.1029/2004JD004873. ISSN 0148-0227.

CROOKS, S. A., GRAY, L. J. Characterization of the 11-year solar signal using a multiple regression analysis of the ERA-40 dataset. *Journal of climate* [online]. 2005, vol. 18, no. 7, s. 996-1015. ISSN0894-8755.

DESER, C. On the teleconnectivity of the 'Arctic Oscillation'. *Geophysical Research Letters* [online]. 2000, vol. 27, no. 6, s. 779-782. ISSN 0094-8276.

DICKINSON, R. E. Solar variability and the lower atmosphere. *Bulletin of the American Meteorological Society* [online]. 1975, vol. 56, no. 12, s. 1240-1248. ISSN 1520-0477.

DOUGLASS, D. H., CLADER, B. D. Climate sensitivity of the Earth to solar irradiance. *Geophysical Research Letters* [online]. 2002, vol. 29, no. 16, s. 33.1-33.4. ISSN 0094-8276.

ERMOLLI, I., MATTHES, K., DUDOK DE WIT, T., KRIVOVA, N. A., TOURPALI, K., WEBER, M., UNRUH, Y. C., GRAY, L., LANGEMATZ, U., PILEWSKIE, P., ROZANOV, E., SCHMUTZ, W., SHAPIRO, A., SOLANKI, S. K., WOODS, T. N. Recent variability of the solar spectral irradiance and its impact on climate modelling. *Atmospheric Chemistry and Physics* [online]. 2013, vol. 13, no. 8, s. 3945-3977. ISSN 1680-7316.

FARRAR, P. D. Are cosmic rays influencing oceanic cloud coverage - or is it only El Nino?. *Climatic Change* [online]. 2000, vol. 47, no. 1-2, s. 7-15. ISSN 0165-0009.

GEORGIEVA, K., KIROV, B., TONEV, P., GUINEVA, V., ATANASOV, D. Long-term variations in the correlation between NAO and solar activity: the importance of north-south solar activity asymmetry for atmospheric circulation. *Advances in Space Research* [online]. 2007, vol. 40, no. 7, s. 1152-1166. ISSN 0273-1177.

GIMENO, L., DE LA TORRE, L., NIETO, R., GARCÍA, R., HERNÁNDEZ, E., RIBERA, P. Changes in the relationship NAO - Northern hemisphere temperature due to solar activity. *Earth and Planetary Science Letters*[online]. 2003, vol. 206, no. 1, s. 15-20. ISSN 0012-821X.

GLEISNER, H., THEJLL, P. Patterns of tropospheric response to solar variability. *Geophysical Research Letters* [online]. 2003, vol. 30, no. 13, s. 44.1-44.4. ISSN 0094-8276.

GLEISNER, H., THEJLL, P., STENDEL, M., KAAS, E., MACHENHAUER, B. Solar signals in tropospheric re-analysis data: Comparing NCEP/NCAR and ERA40. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics* [online]. 2005, vol. 67, no. 8, s. 785-791. ISSN 1364-6826.

Global Patterns- Arctic and North Atlantic Oscillation (AO and NAO) [online]., poslední revize 4. 24. 2015 [cit. 2015-5-3]. <<http://www.nc-climate.ncsu.edu/climate/patterns/NAO.html>>.

GRAY, L. J., BEER, J., GELLER, M., HAIGH, J. D., LOCKWOOD, M., MATTHES, K., CUBASCH, U., FLEITMANN, D., HARRISON, G., HOOD, L., LUTERBACH, J., MEEHL, G. A., SHINDELL, D., VAN GEEL, B., WHITE, W. Solar influences on climate. *Reviews of Geophysics* [online]. 2010, vol. 48, RG4001. ISSN1944-9208.

GRAY, L. J., SCAIFE, A. A., MITCHELL, D. M., OSPREY, S., INESON, S., HARDIMAN, S., BUTCHART, N., KNIGHT, J., SUTTON, R., KODERA, K. A lagged response to the 11 year solar cycle in observed winter Atlantic/European weather patterns. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2013, 118, doi:10.1002/2013JD020062. ISSN 0148-0227.

HAHM, N., YANG, M., HONG, B. I. On a simple high order numerical differentiation using the Lagrange interpolation. *Journal of Applied Mathematics and Computing* [online]. 2005, vol. 19, no. 1-2, s. 527-535. ISSN 1865-2085.

HAIGH, J. D. The role of stratospheric ozone in modulating the solar radiative forcing of climate. *Nature* [online]. 1994, vol. 370, no. 6490, s. 544-546. ISSN 0028-0836.

HAIGH, J. D. The effects of solar variability on the Earth's climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Science* [online]. 2003, vol. 361, no. 1802, s. 95-111. ISSN 1364-503X.

HAIGH, J. D. The impact of solar variability on climate. *Science* [online]. 1996, vol. 272, no. 5264, s. 981-984. ISSN 1095-9203.

HUTH, R., BOCHNÍČEK, J., & HEJDA, P. The 11-year solar cycle affects the intensity and annularity of the Arctic Oscillation. *Journal of atmospheric and solar-terrestrial physics* [online]. 2007, vol. 69, no. 9, s. 1095-1109. ISSN 1364-6826.

HUTH, R., KYSELÝ, J., BOCHNÍČEK, J., HEJDA, P. Solar activity affects the occurrence of synoptic types over Europe. *Annales Geophysicae* [online]. 2008, vol. 26, no. 7, s. 1999-2004. ISSN 1432-0576.

HUTH, R., POKORNÁ, L., BOCHNÍČEK, J., HEJDA, P. Solar cycle effects on modes of low-frequency circulation variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2006, 111, D22107, doi:10.1029/2005JD006813. ISSN 0148-0227.

JONES, P. D., DAVIES, T. D., LISTER, D. H., SLONOSKY, V., JONSSON, T., BÄRRING, L., JÖNSSON, P., MAHERAS, P., KOLYVA-MACHERA, F., BARRIENDOS, M., MARTIN-VIDE, J., RODRIQUEZ, R., ALCOFORADO, M. J., WANNER, H., PFISTER, C., LUTERBACHER, J., RICKLI, R., SCHUEPBACH, E., KAAS, E., SCHMITH, T., JACOBET, J., BECK, C. Monthly mean pressure reconstructions for Europe for the 1780–1995 period. *International Journal of Climatology* [online]. 1999, vol. 19, no. 4, s. 347-364. ISSN 1097-0088.

KODERA, K. Solar influence on the spatial structure of the NAO during the winter 1900-1999. *Geophysical Research Letters* [online]. 2003, vol. 30, no. 4, s. ISSN 0094-8276.

KOPP, G., LEAN, J. L. A new, lower value of total solar irradiance: Evidence and climate significance. *Geophysical Research Letter* [online]. 2011, vol. 38, 10.1029/2010GL045777. ISSN 0094-8276.

KRISTJÁNSSON, J. E., STAPLE, A., KRISTIANSEN, J., & KAAS, E. A new look at possible connections between solar activity, clouds and climate. *Geophysical Research Letters* [online]. 2002, vol. 29, no. 23. ISSN 0094-8276.

LABITZKE, K., VAN LOON, H. Connection between the troposphere and stratosphere on a decadal scale. *Tellus A* [online]. 1995, vol. 47, no. 2, s. 275-286. ISSN 0280-6495.

LABITZKE, K. On the solar cycle – QBO relationship: a summary. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 2005, vol. 67, no.1, s. 45-54. ISSN 1364-6826.

LAUT, P. Solar activity and terrestrial climate: an analysis of some purported correlations. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 2003, vol. 65, no. 7, s. 801-812. ISSN 1364-6826.

LEAN, J., RIND, D. Earth's response to a variable Sun. *Scienc* [online]. 2001, vol. 292, no. 5515, s. 234-236. ISSN 1095-9203.

LOCKWOOD, M. Solar influence on global and regional climates. *Surveys in Geophysics* [online]. 2012, vol. 33, no. 3-4, s. 503-534. ISSN 1573-0956.

LOCKWOOD, M., HARRISON, R. G., WOOLLINGS, T., SOLANKI, S. K. Are cold winters in Europe associated with low solar activity?. *Environmental Research Letters* [online]. 2010, vol. 5, doi:10.1088/1748-9326/5/2/024001. ISSN 1748-9326.

LU, H., JARVIS, M. J., HIBBINS, R. E. Possible solar wind effect on the norther annular mode and northern hemispheric circulation durign winter and spring. *Journal of geophysical research* [online]. 2008, vol. 113, no. D23. ISSN 0148-0227.

LUPO, A. R., OGLESBY, R. J., MOKHOV, I. I. Climatological features of blocking anticyclones: A study of Northern Hemisphere CCM1 model blocking events in present-day and double CO₂ concentration atmospheres. *Climate Dynamics* [online]. 1997, vol. 13, no. 3, s. 181-195. ISSN 0930-7575.

OGI, M., YAMAZAKI, K., TACHIBANA, Y. Solar cycle modulation of the seasonal linkage of the North Atlantic Oscillation (NAO). *Geophysical Research Letters* [online]. 2003, vol. 30, doi:10.1029/2003GL018545. ISSN 0094-8276.

PHILIPP, A., BARTHOLY, J., BECK, CH., ERPICUM, M., ESTEBAN, P., FETTWEIS, X., HUTH, R., JAMES, P., JOURDAIN, S., KREIENKAMP, F., KRENNERT, T., LYKLOUDIS, S., MICHALIDES, S. C., PIANKO-KLUCZYNSKA, K., POST, P., RASILLA ÁLVAREZ, D., SCHIEMANN, R., SPEKAT, A., TYMVIUS, F. S. A database of weather and circulation type classifiacations. *Physics and Chemistry of the Earth* [online]. 2010, vol. 35, no. 9, s. 360-373. ISSN 1474-7065.

QUN, X., QIUMING, Y. Response of the intensity of subtropical high in the Northern Hemisphere to solar activity. *Advances in atmospheric sciences* [online]. 1993, vol. 10, no. 3, s. 325-334. ISSN 0256-1530.

RUZMAIKIN, A., FEYNMAN, J. Solar influence on a major mode of atmospheric variability. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2002, 107, doi:10.1029/2001JD001239. ISSN 0148-0227.

RUZMAIKIN, A., FEYNMAN, J., JIANG, X., NOONE, D. C., WAPLE, A. M., YUNG, Y. L. The pattern of northern hemisphere surface air temperature during prolonged periods of low solar output. *Geophysical Research Letters* [online]. 2004. vol. 31, doi:10.1029/2004GL019955. ISSN 0094-8276.

SCAIFE, A. A., INESON, S., KNIGHT, J. R., GRAY, L., KODERA, K., SMITH, D. M. A mechanism for lagged North Atlantic climate response to solar variability. *Geophysical Research Letters* [online]. 2013, vol. 40, no. 2, s. 434-439. ISSN 0094-8276.

SFÎCA, L., VOICULESCU, M., HUTH, R. The influence of solar activity on action centres of atmospheric circulation in North Atlantic. *Annales Geophysicae* [online]. 2015, vol. 33, no. 2, s. 207-215. ISSN 1432-0576.

SHINDELL, D. T., SCHMIDT, G. A., MILLER, R. L., RIND, D. Northern Hemisphere winter climate response to greenhouse gas, ozone, solar, and volcanic forcing. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* [online]. 2001, vol. 106, no. 7, s. 7193-7210. ISSN 0148-0227.

SVENSMARK, H. Influence of cosmic rays on Earth's climate. *Physical Review Letter* [online]. 1998, vol. 81, no. 22, s. 5027. ISSN 1079-7114.

SVENSMARK, H. (2000). Cosmic rays and Earth's climate. *Space Science Reviews*, [online]. 2000, vol. 93, no. 1-2, s. 175-185. ISSN 1572-9672.

SVENSMARK, H., FRIIS-CHRISTENSEN, E. Variation of cosmic ray flux and global cloud coverage - a missing link in solar-climate relationships. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 1997, vol. 59, no. 11, s. 1225-1232. ISSN 1364-6826.

THEJLL, P., CHRISTIANSEN, B., GLEISNER, H. On correlations between the North Atlantic Oscillation, geopotential heights, and geomagnetic activity. *Geophysical Research Letters* [online]. 2003, vol. 30, 10.1029/2002GL016598. ISSN 0094-8276.

THOMPSON, D. W., WALLACE, J. M. The Arctic Oscillation signature in the wintertime geopotential height and temperature fields. *Geophysical Research Letters* [online]. 1998, vol. 25, no. 9, s. 1297-1300. ISSN 0094-8276.

TINSLEV, B. A. Solar Wind Modulation of the Global Electric Circuit and Apparent Effects on Cloud Microphysics, Latent Heat Release, and Tropospheric Dynamics. *Journal of geomagnetism and geoelectricity* [online]. 1996, vol. 48, no. 1, s. 165-175. ISSN 0022-1392.

TOURPALI, K., SCHUURMANS, C. J. E., VAN DORLAND, R., STEIL, B., BRÜHL, C., MANZINI, E. Solar cycle modulation of the Arctic Oscillation in a chemistry-climate model. *Geophysical research letters* [online]. 2005, vol. 32, doi:10.1029/2005GL023509. ISSN 0094-8276.

VAN LOON, H., MEEHL, G. A., ARBLASTER, J. M. A decadal solar effect in the tropics in July-August. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics* [online]. 2004, vol. 66, no. 18, s. 1767-1778. ISSN 1364-6826.

VAN LOON, H., SHEA, D. J. A probable signal of the 11-year solar cycle in the troposphere of the Northern Hemisphere. *Geophysical Research Letters* [online]. 1999, vol. 26, no. 18, s. 2893-2896. ISSN 0094-8276.

WAGNER, G., LIVINGSTONE, D. M., MASARIK, J., MUSCHELER, R., & BEER, J. Some results relevant to the discussion of a possible link between cosmic rays and the Earth's climate. *Journal of Geophysical Research: Atmosphere* [online]. 2001, vol. 106, no. D4, s. 3381-3387. ISSN 0148-0227.

WOOLLINGS, T., LOCKWOOD, M., MASATO, G., BELL, C., GRAY, L. Enhanced signature of solar variability in Eurasian winter climate. *Geophysical Research Letters* [online]. 2010, vol. 37, no. 20. ISSN 0094-8276.

11.2 Zdroje dat

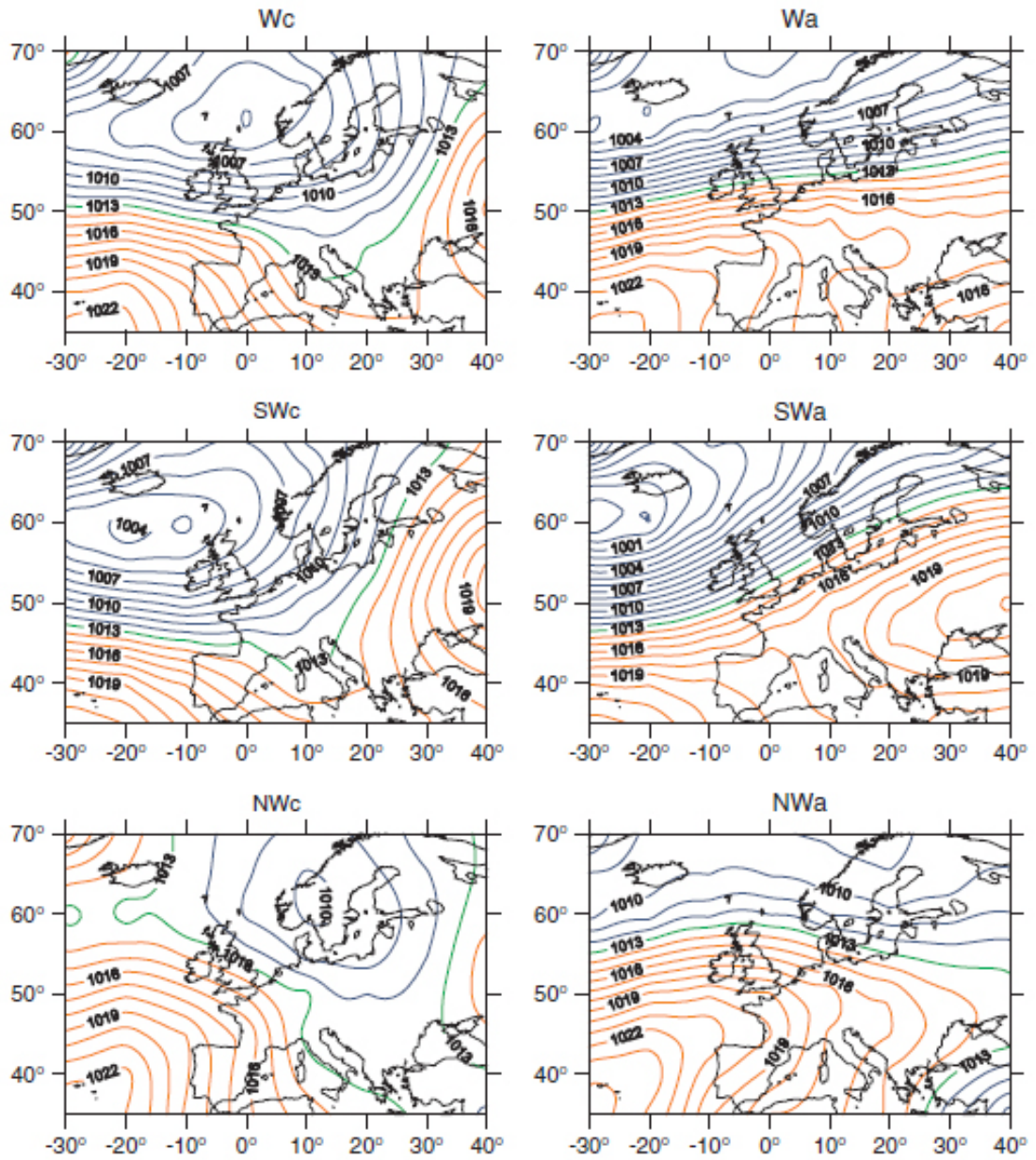
SILSO, World Data Center - *Sunspot Number and Long-term Solar Observations, Royal Observatory of Belgium, on-line Sunspot Number catalogue* [online]., poslední revize 4. 1. 2015 [cit. 2015-01-04]. <<http://www.sidc.be/silso/datafiles>>.

12 Přílohy

Příloha 1a: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

Malá písmena „c“ a „a“ označují cyklonalitu (resp anticyklonalitu)

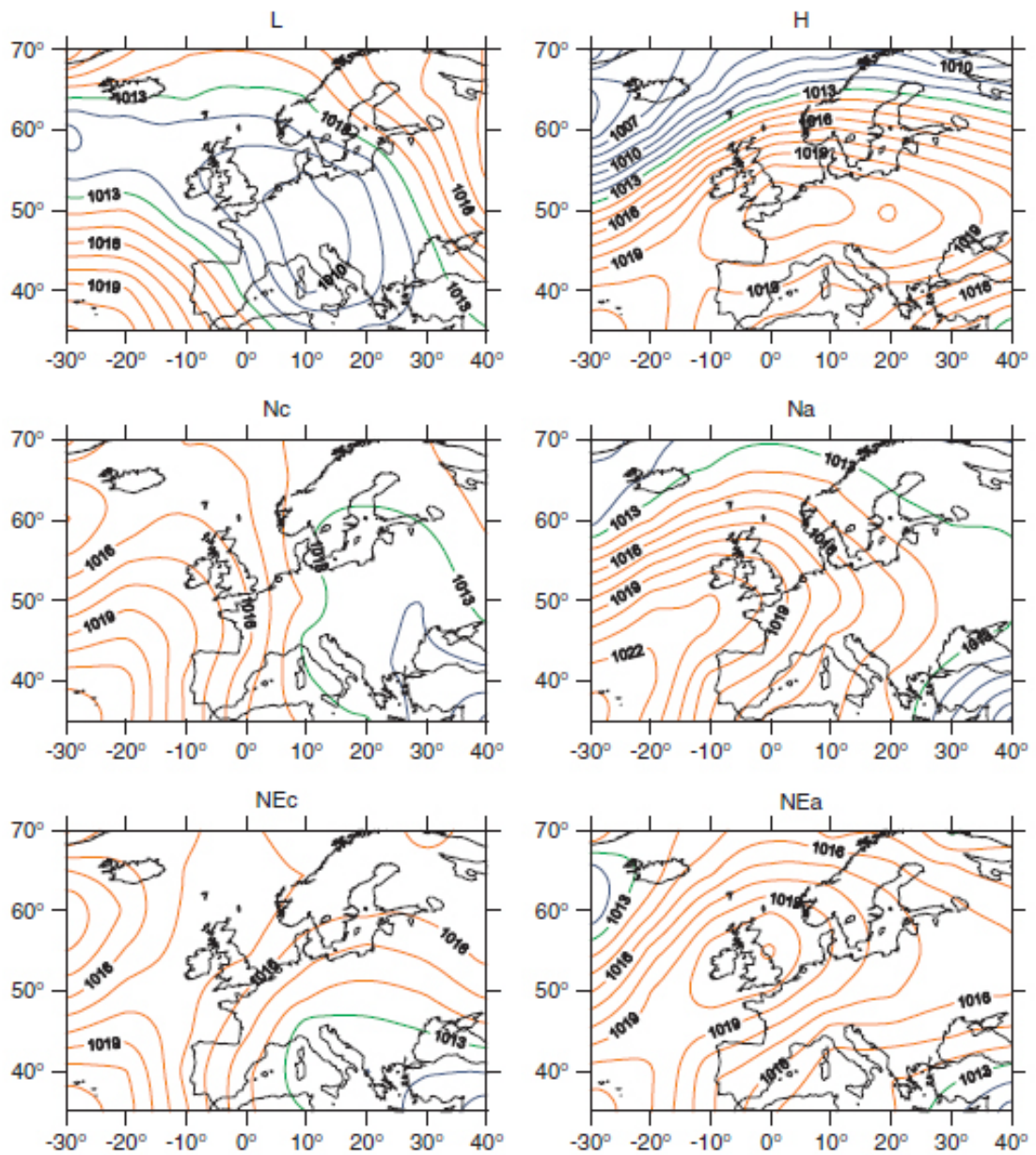
zdroj: Beck et al. (2007)



Příloha 1b: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

Malá písmena „c“ a „a“ označují cyklonalitu (resp anticyklonalitu)

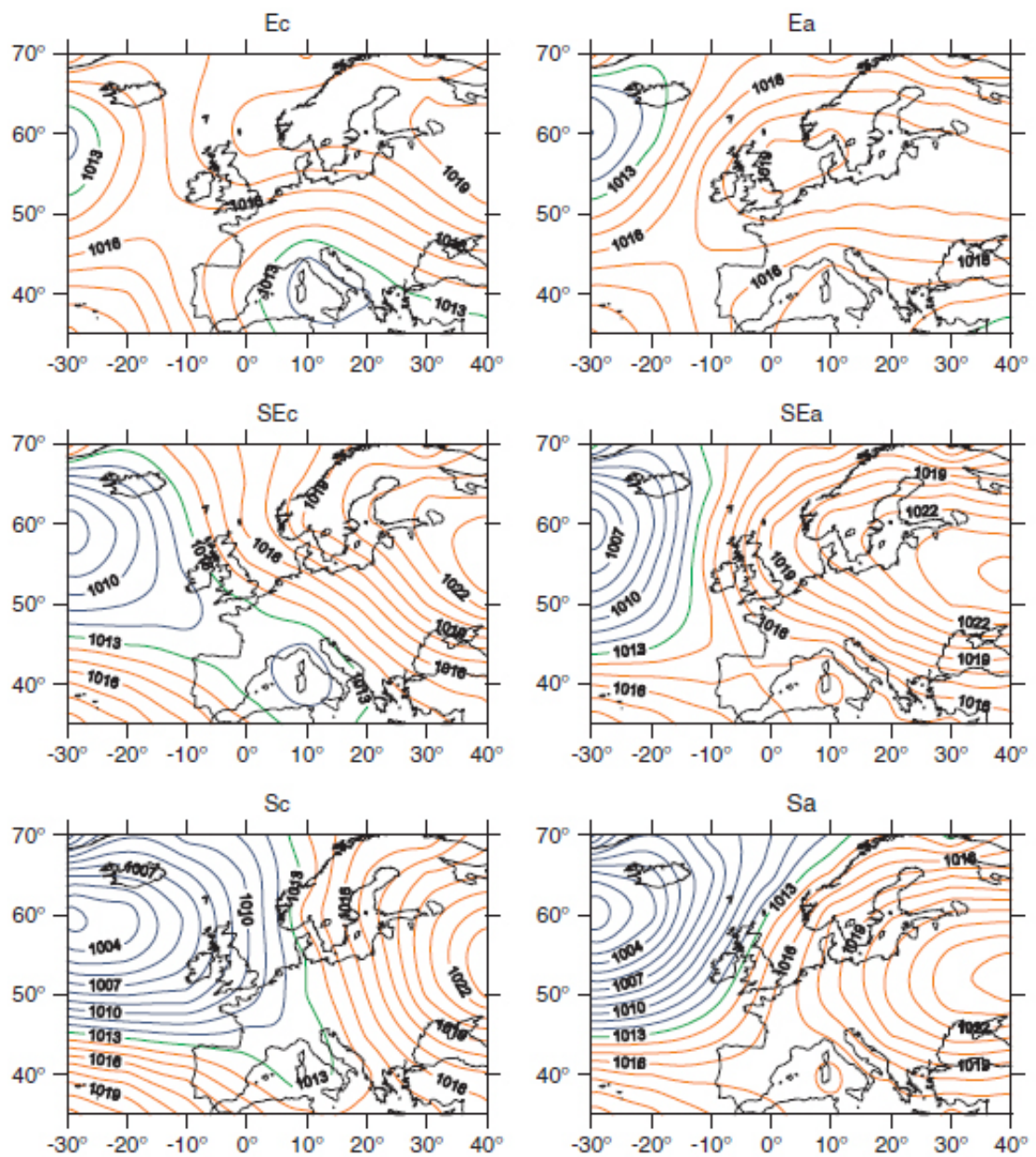
zdroj: Beck et al. (2007)



Příloha 1c: Cirkulační subtypy vytvořené Beckem (2000)

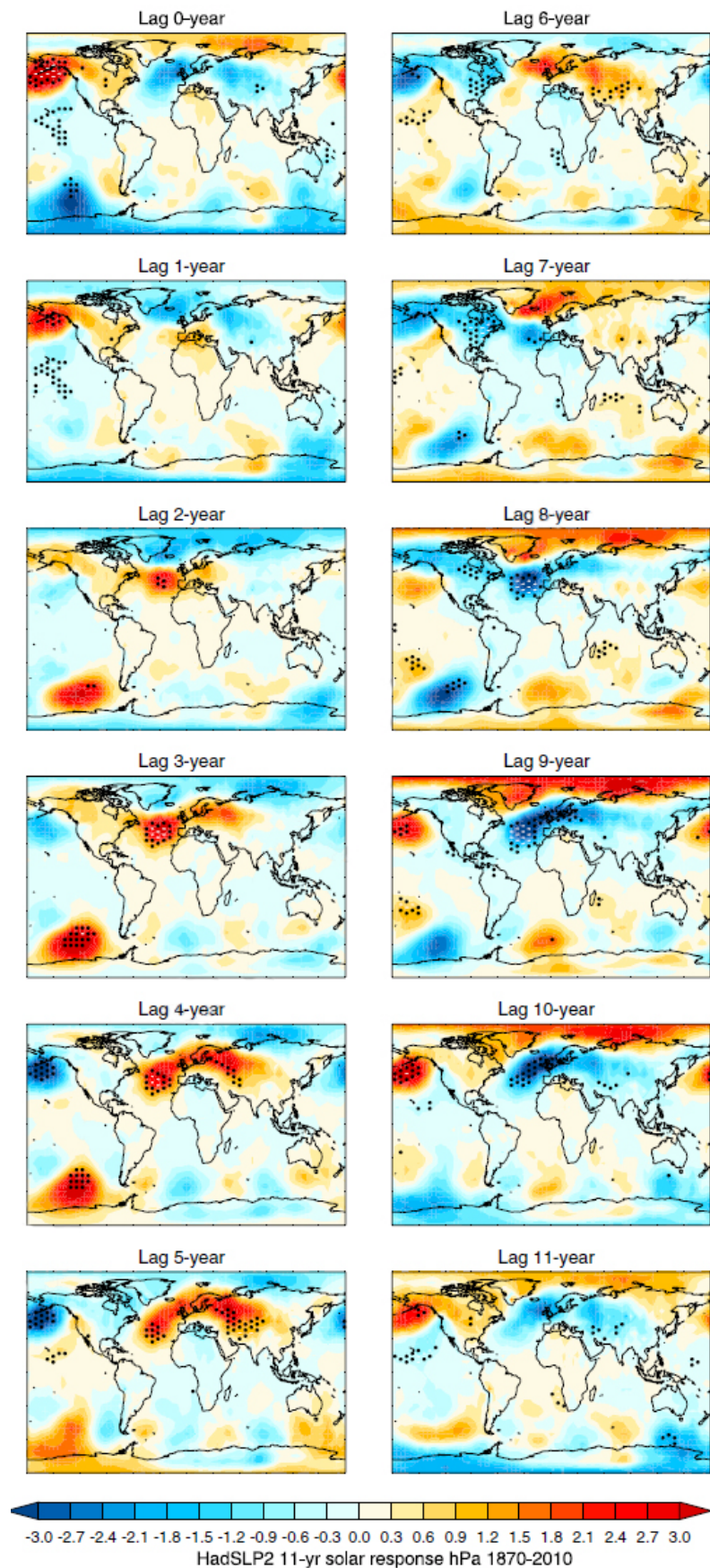
Malá písmena „c“ a „a“ označují cyklonalitu (resp anticyklonalitu)

zdroj: Beck et al. (2007)



Příloha 2: Změny tlaku způsobené změnou sluneční aktivity v letech 1870-2010

zdroj: Gray et al. (2013)



Příloha 3: Graf průběhu sluneční aktivity v období let 1780-1995 se znázorněním členění úrovně sluneční aktivity

Oranžová čára znázorňuje měsíční hodnoty slunečních skvrn, černá čára je pak jejich 15 měsíční klouzavý průměr. Zelené sloupce definují sluneční maxima, růžové sloupce sluneční minima. Čárkovaná čára ohraničuje intervaly sluneční aktivity definované kvartily, tečkovaná čára znázorňuje to samé pro dělení pomocí tercilů.

