

Analýza zmien v prevládajúcom prúdení v dôsledku zmien klímy

Autor: Katarína Čatlošová

Anotácia: Práca je venovaná analýze zmeny v prevládajúcom prúdení a rozložení tlakových útvarov v dôsledku zmien klímy. Zmeny cirkulačných pomerov v atmosfére sú ovplyvnené charakterom zmien prízemného a výškových polí jednotlivých meteorologických prvkov, ktorých podrobnú charakteristiku je možné v súčasnosti získať z viacerých zdrojov meteorologického merania a pozorovania (pozemné, rádionsondážne, satelitné, radarové). Okrem toho existujú modelové výstupy očakávaného vývoja cirkulačných pomerov v atmosfére až do roku 2100 za predpokladu splnenia zmien radiačného forcingu vplyvom zosilnenia skleníkového efektu atmosféry.

Kľúčové slová: atmosférická cirkulácia, premenlivosť klímy.

Key words: atmospheric circulation, climate variability

Abstract

In this work we analyse the changes in prevailing atmospheric circulation due to climate change. We focused on the analysis of the pressure and temperature fields and the trajectories of the wind which crosses the area of Slovakia. We also measured the NAO indices and calculated Rossby wavelengths. The data applied for our analysis proceed from reanalysis CERA-20C provided by ECMWF, particularly we used monthly means of studied variables for periods 1911-1940 and 1981-2010. In the second part, we analysed also an outlook for the future. The data for future simulations were taken from The third generation coupled global climate model provided by Canadian Centre for Climate modelling and analysis, we aimed particularly for the period 2021-2050. The data for the future analysis are adapted according to the A1B climate scenario.

We mention the possible future scenarios and we present here some indications of the global warming. We observed warming in various geopotential height levels (not all are shown here), so we can affirm that warming was measured in the past across the whole troposphere and it is also expected in the future. The expansion of the troposphere is closely related to the warming. The warm air is enlarging the occupied volume and the whole troposphere becomes higher. These facts reflect the prediction of the A1B scenario.

Due to the climate change we expect some impact on the atmospheric circulation patterns and on the values of the NAO index. We calculated the NAO indices for every month of the studied periods and averaged them across the chosen thirty years periods. The results show that the positive phase of the North Atlantic oscillation was dominant and, in fact, we received only positive values of the NAO index from the averaged data. Except of it, we analysed the Rossby wavelengths. We observed certain dependance. Increasing the values of Rossby wavelengths, the NAO indices also increased. Both of the phenomena are closely related to the alternating cyclonic and anticyclonic circulation in mid-latitudes.

Finally, we focused on the simulations of the wind trajectories crossing Slovakia. We observed the trajectories mainly in the upper levels of the atmosphere, not near the surface. It was because the friction near the surface is evident and the trajectories are highly influenced by the orography of the country. While in the upper air we can observe the general path. The wind coming to Slovakia originates near the east coast of Central America and the southern part of North America. It crosses Atlantic Ocean and comes to Slovakia from north-west. Along the year, we did not observe any significant change in the shape of the path. But we observed that the path is moving northerly in summer months and southerly in the winter. Looking at the future simulation, the trajectories

conserve their shape from the past. We can affirm that any significant change in the wind patterns are not expected in the future.

Úvod do témy

V tejto práci sme sa venovali štúdiu poľa tlaku a poľa teploty v prízemnej vrstve a vybraných výškových hladinách počas troch tridsaťročných období. Študovali sme vplyv variability teploty a tlaku na zmenu klímy a s ňou súvisiace prúdenie vetra nad naším územím. V súvislosti s rozložením tlaku sme vypočítavali NAO index a jeho spojitosť s rozsahom Rossbyho vln.

Budeme uvažovať veľkorozmerové javy v atmosfére. Je zrejmé, že tlakové pole na Zemi je približne symetrické. Jeho rozloženie vysvetľuje teória troch buniek. My sa zameriame na niektoré z nepravidelností v bežnom správaní sa procesov v atmosfére.

Zmeny v poliach tlaku a teploty podliehajú predovšetkým ročnému chodu (v malých rozmeroch môžeme hovoriť aj o inom pravidelnom chode, dennom chode). V atmosfére však pozorujeme aj javy, ktorých perióda sa výrazne líši a je nepravidelná. Príkladom je fenomén ENSO (El Niño – Southern Oscillation), známy ako El Niño. Jav El Niño spočíva v striedaní sa oblasti teplej a studenej vody v Tichom oceáne v rovníkovej oblasti na západnom pobreží Strednej a Južnej Ameriky a sprievodných prejavoch počasia, ktoré zasahujú nielen americké pobrežie, ale aj Indonéziu či Austráliu.

Podobným druhom oscilácie, ktorá zasahuje aj Európu, je Severoatlantická oscilácia (NAO - North Atlantic Oscillation). Mierou intenzity tohto javu je NAO index [1], ktorý je definovaný ako rozdiel tlaku pri zemi nameranom v Lisabone (v Portugalsku) a v Stykkisholmure (na Islande) v jednotkách ich štandardnej odchýlky. NAO index nadobúda tak kladné ako aj záporné hodnoty. Kladná fáza je charakteristická nadpriemernými hodnotami geopotenciálnej výšky a teploty v miernych šírkach. V severnej Európe sa vyskytujú nadpriemerné zrážky a v južnej Európe sucho. Záporná fáza sa prejavuje opačne, geopotenciálna výška a teplota je podpriemerná v miernych šírkach, v severnej Európe je neobvykle sucho, v južnej Európe neobvyčajne vlhko.

Fenomén, ktorý úzko súvisí so striedaním cyklonálnej a anticyklonálnej činnosti, sú Rossbyho vlny. Sú to veľkopriestorové vlny pozorované v smere rovnobežiek miernych až severných šírok. Vysoký tlak vyskytujúci sa v oblastiach subtrópov a nad pólmi posilňuje prúdenie smerom do oblastí medzi nimi, teda do miernych šírok. Pôsobením Coriolisovej sily dochádza k stáčaniu prúdenia a výsledný tvar prúdenia nadobúda vlnový charakter.

Pre výpočet vlnovej dĺžky stacionárnych Rossbyho vln sme použili rovnicu vorticity v priblížení západného zonálneho a nedivergentného prúdenia v nasledujúcom tvare [2].

$$\frac{d(\xi+f)}{dt} = 0 \quad (1)$$

Člen f predstavuje Coriolisov parameter, závislý od zemepisnej šírky a ξ reprezentuje vorticitu, ktorou je možné charakterizovať schopnosť tvorby cyklóny alebo anticyklóny. Úpravou rovnice priamo dostávame vzťah pre výpočet vlnovej dĺžky (λ) Rossbyho vln, kde β je konštanta, ktorá vyjadruje veľkosť Coriolisovho parametra a pre naše zemepisné šírky nadobúda hodnotu $\beta = 1,471 \cdot 10^{-5} \text{ km}^{-1} \text{ s}^{-1}$. Veličina u je rýchlosť prúdenia v zonálnom smere.

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{u}{\beta}} \quad (2)$$

Spomenuli sme viaceré charakteristiky popisujúce vlastnosti prúdenia na Zemi všeobecne aj v oblasti Slovenska. Niet pochýb o tom, že zmeny globálnej klímy sa dejú. V posledných desaťročiach pozorujeme rôzne prejavy, napríklad roztápanie sa ľadovcov, z čoho plynie predpoklad na zvyšovanie hladiny oceánov či rôzne extrémny v počasí, ktoré majú za následok náročnejšiu predvídateľnosť.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) [3], [4] vypracoval niekoľko klimatických scenárov, ktoré simulujú možný vývoj klímy. Všetky sú konzistentné v predpovedi globálneho oteplenia, rôznia sa v tom, do akej miery otepľovanie predpovedajú. Zoradené od najoptimistickejších po najpesimistickejšie ich uvádzame v nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 1).

| Scenár | B1 | A1T | B2 | A1B | A2 |
|------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Odhad nárastu teploty do roku 2100 | 1,8°C | 2,4°C | 2,4°C | 2,8°C | 3,4°C |

Tabuľka 1: Odhad nárastu priemernej globálnej prízemnej teploty do konca 21.storočia vzhľadom na obdobie 1980-1999.

B1 scenár predpokladá udržateľný technologický rozvoj, zavádzanie zdrojov energie neznečisťujúcich životné prostredie. Zároveň očakáva rýchly ekonomický rast a nárast počtu obyvateľstva na Zemi do polovice 21. storočia a následné zastavenie rastu. Najkritickejší A2 scenár tiež predpovedá rast počtu obyvateľov. Očakáva, že zavádzanie zelených zdrojov energie bude oneskorené voči iným scenárom, priemysel sa sústreďuje na jadrovú energiu. Podľa A2, krajiny sveta nespolupracujú na spoločnom rozvoji za účelom ochrany životného prostredia a miera rozvoja a využitia ekologických technológií je nerovnomerná.

V našej analýze používame dáta pre budúcnosť z kanadského modelu tretej generácie (CGCM3), ktorý reprezentuje scenár A1B. Podľa tohto scenára, krajiny sveta úzko spolupracujú na spoločnom rozvoji, ekonomika rastie a miera využitia nových zelených zdrojov energie v porovnaní s tradičnými je vyvážená.

Metodika spracovania

Na štúdium zmien tlakového a teplotného poľa a tiež trajektórií vetra sme použili dáta z dvoch zdrojov. Dáta z minulých období (1911-1940 a 1981-2010) pochádzali z reanalýzy CERA-20C, čo je kombinovaný atmosféricko-oceánsky model pre 20.storočie prevádzkovaný ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecast). Údaje pre budúce obdobie (2021-2050) sú prevzaté z kanadského kombinovaného atmosféricko-oceánskeho modelu tretej generácie CGCM3 a pochádzajú z Kanadského centra pre klimatické modelovanie a analýzy.

Výhodou kombinovaného atmosféricko-oceánskeho modelu je spojitosť okrajových podmienok na rozhraní atmosféry a oceánov. Doména dát z minulých období (CERA-20C) je ohraničená 82° západnej geografickej šírky (g.š.) a 47° východnej g.š. a v severojužnom smere zasahuje oblasť od 10° do 80°

severnej geografickej dĺžky (g.d.). Krok v oboch smeroch je $0,5^\circ$. V prípade dát modelovaných pre budúcnosť (CGCM3) je doména približne zachovaná, predstavuje oblasť od $81,5^\circ$ západnej g.š. do $49,5^\circ$ východnej g.š. a od $9,5^\circ$ do 82° severnej g.d. Keďže ide o modelovanie do vzdialenej budúcnosti, krok je väčší - $2,8^\circ$. Pre výpočty sme využili mesačné priemery každej premennej, ktoré sú vypočítané ako priemery pre každý synoptický termín. V prípade prízemného tlaku a teploty ide o interval 6 hodín, resp. meranie štyrikrát denne.

Na spracovanie dát sme použili softvér CDO (Climate Data Operators) a na zhotovenie grafických výstupov sme využili program GrADS (Grid Analysis and Display System).

Výsledky

V prvom rade sa zameriame na pozorovanie súvislosti medzi hodnotami NAO indexu a vlnovou dĺžkou Rossbyho vln. Ďalej popíšeme trajektórie vetra prichádzajúceho na naše územie a pokračujúce ďalej v hladine 850hPa. Na záver doplníme obraz o vlastnostiach atmosféry prehľadným grafom priebehu priemernej teploty a geopotenciálnej výšky v uvažovanom období v hladine 850hPa.

Stacionárne Rossbyho vlny sme vypočítali podľa uvedených vzťahov a uvažovali sme len oblasť nad územím Slovenska v severo-južnom smere ohraničenú $47,4^\circ$ - $49,5^\circ$ severnej g.d., v západo-východnom smere rozsah výpočtu zodpovedá pôvodnej doméne.

V nasledujúcej tabuľke (Tabuľka 2) môžeme vidieť porovnanie rýchlostí prúdenia v prízemnej vrstve a zodpovedajúce vlnové dĺžky Rossbyho vln, vypočítané podľa vzťahov uvedených vyššie. Pozorujeme, že v zime sú Rossbyho vlnové dĺžky väčšie ako v lete. Čím je silnejšie západné prúdenie v zonálnom smere, tým sú Rossbyho vlny dlhšie.

| Mesiac | 1911-1940 | | 1981-2010 | | 2021-2050 | |
|--------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|
| | Vietor (m/s) | λ (km) | Vietor (m/s) | λ (km) | Vietor (m/s) | λ (km) |
| 1 | 2.496 | 2588 | 0.629 | 1299 | 3.833 | 3207 |
| 2 | 1.832 | 2217 | 0.500 | 1158 | 3.090 | 2880 |
| 3 | 1.277 | 1851 | 0.369 | 995 | 2.356 | 2515 |
| 4 | 0.725 | 1395 | -0.026 | — | 1.928 | 2275 |
| 5 | 0.733 | 1403 | -0.057 | — | 1.343 | 1898 |
| 6 | 1.092 | 1712 | 0.303 | 901 | 2.287 | 2477 |
| 7 | 1.545 | 2036 | 0.275 | 859 | 2.958 | 2818 |
| 8 | 1.416 | 1950 | 0.013 | 187 | 2.649 | 2666 |
| 9 | 1.232 | 1818 | 0.138 | 608 | 3.059 | 2865 |
| 10 | 1.529 | 2025 | 0.074 | 445 | 3.378 | 3011 |
| 11 | 1.882 | 2247 | 0.360 | 983 | 3.414 | 3027 |
| 12 | 2.210 | 2435 | 0.440 | 1086 | 3.758 | 3176 |

Tabuľka 2: Zonálna zložka prízemného vetra a jeho súvis s Rossbyho vlnami

Vidíme, že v apríli a máji v období 1981-2010 nemáme žiadnu hodnotu Rossbyho vlnovej dĺžky. To je spôsobené tým, že priemerné prúdenie sa prejavovalo vo východnom smere, čo značí znamienko mínus. Využitím definície Rossbyho vlnovej dĺžky by sme dostali komplexné číslo.

Ďalej uvedieme hodnoty NAO indexu pre tri sledované obdobia.

| NAO index | | | |
|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Mesiac | 1911-1940 | 1981-2010 | 2021-2050 |
| 1 | 1.903 | 2.007 | 2.396 |
| 2 | 1.503 | 1.376 | 2.608 |
| 3 | 0.858 | 1.569 | 2.075 |
| 4 | 0.875 | 0.888 | 1.308 |
| 5 | 0.413 | 0.337 | 0.893 |
| 6 | 1.281 | 0.876 | 1.549 |
| 7 | 1.649 | 3.175 | 2.291 |
| 8 | 2.749 | 1.710 | 3.707 |
| 9 | 1.746 | 2.264 | 3.312 |
| 10 | 1.411 | 1.394 | 3.181 |
| 11 | 1.647 | 1.641 | 2.993 |
| 12 | 1.887 | 1.449 | 3.189 |

Tabuľka 3: NAO index v sledovaných obdobiach

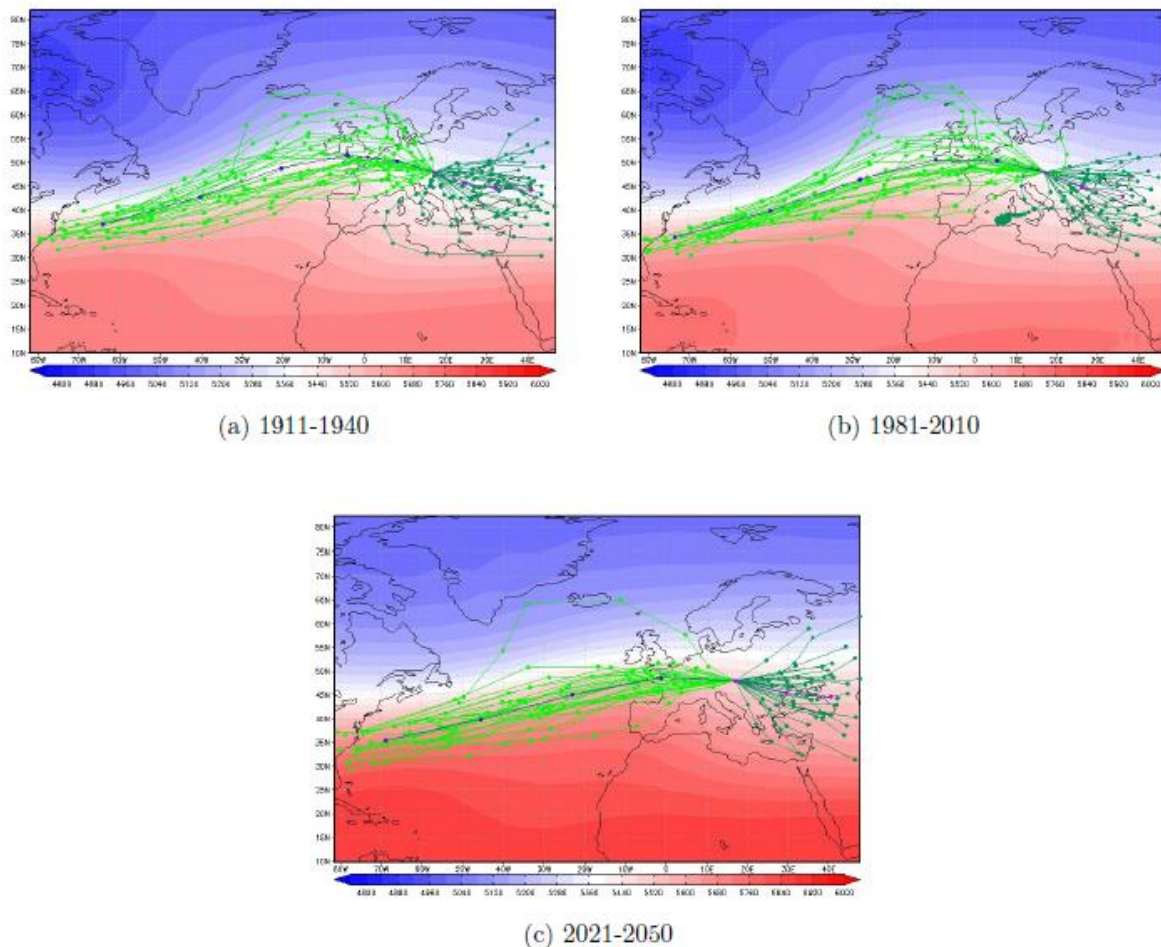
Je potrebné poznamenať, že uvedené NAO indexy boli vypočítané z mesačných priemerných tlakov v Lisabone (Portugalsko) a Stykkisholmure (Island), čo viedlo k istému skresleniu výsledku. NAO je jav, ktorého trvanie sa obmedzuje na niekoľko dní a vyskytuje sa nepravidelne. Z našej tabuľky vyplýva, že v priemere sa vyskytuje častejšie kladná fáza, keďže všetky hodnoty NAO indexu sú tu kladné. Po preštudovaní vstupných dát (tu neuvedené) vieme, že sa vyskytli aj krátke obdobia zápornej fázy, hoci prevláda kladná fáza severoatlantickej oscilácie.

Môžeme konštatovať, že A1B scenár predpovedá vyššie hodnoty NAO indexu v budúcnosti (2021-2050). To môže súvisieť s väčšími vlnovými dĺžkami Rossbyho vln a skutočnosťou, že počas kladnej fázy severoatlantickej oscilácie pozorujeme silnejší západný vietor.

V ďalšom sa pozrieme na výsledky trajektórie vetra simulované pomocou GrADS. Za počiatočný bod sme zvolili súradnice približne v strede Slovenska. Hľadali sme spätné a dopredné trajektórie zo Slovenska. V každom obrázku vidíme tridsať spätných a tridsať dopredných trajektórií, ktoré predstavujú mesačný priemer vybraného mesiaca za tridsať rokov sledovaného obdobia. Spätné (dopredné) trajektórie pre jednotlivé roky sú zobrazené svetlou zelenou (tmavou zelenou) farbou. Priemery za daný mesiac sú modré (fialové) pre spätné (dopredné) trajektórie. Zobrazené línie sú spojnicou sto bodov, ktoré predstavujú kroky počas jedného mesiaca. Čím sú body bližšie k sebe, tým pomalšie bolo prúdenie v tom mieste. Pozadie mám tvorí farebná škála zobrazujúca rozloženie geopotenciálnej výšky nad uvažovanou oblasťou.

Študovali sme priebeh v troch výškových hladinách: 1000hPa, 850hPa a 500hPa. Tu uvádzame len ilustračný príklad z hladiny 500hPa. V hladine 500hPa je vietor prevažne zonálny, prúdi v západnom smere. Naopak, v hladine 1000hPa, čo približne zodpovedá prízemnej vrstve, prúdenie si zachováva západný smer, ale zároveň je veľmi nepravidelné kvôli silnému vplyvu orografie. Podobne je tomu v hladine 850hPa, ktorú sme tiež študovali. Za reprezentatívnu hladinu sme preto zvolili 500hPa.

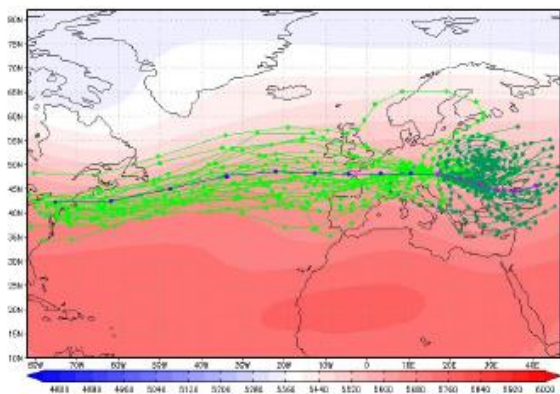
Na prvej trojici obrázkov (Obrázok 1) môžeme vidieť situáciu v januári.



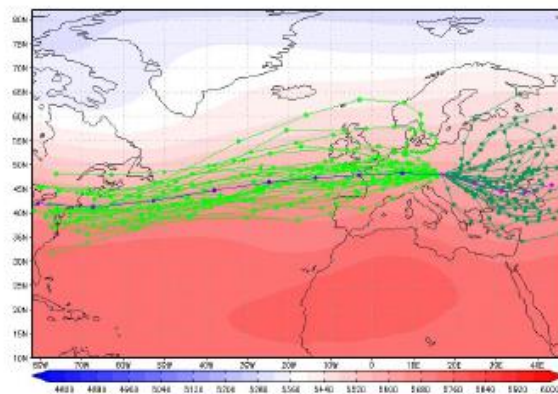
Obrázok 1: Januárové trajektórie vetra v hladine 500hPa. Svetlozelená (tmavozelená) línia predstavuje spätnú (doprednú) trajektóriu. Mesačná priemerná trajektória spätná (dopredná) je vyznačená modrou (fialovou). Pozadie tvorí mesačný priemer geopotenciálnej výšky v januári za príslušné tridsaťročné obdobie.

Vietor prichádzajúci na naše územie pochádza z oblasti subtrópov na severoamerickom pobreží. Prúdenie križuje Atlantický oceán, ohýba sa mierne na sever a pri Britských ostrovoch uzatvára oblúk. Do našej oblasti, v centre Európy, prichádza so severozápadu. Na pozadí každej mapy vidíme pole geopotenciálnej výšky, ktoré odráža pole teploty. Pozorujeme, že gradient geopotenciálnej výšky je väčší na simulácii pre budúce obdobie a tiež tu dosahuje relatívne vyššie hodnoty v oblasti blízkej k rovníku. Prúdenie je geostrofické, čo znamená rovnováhu medzi silou barického gradientu a vychýľujúcou Coriolisovou silou.

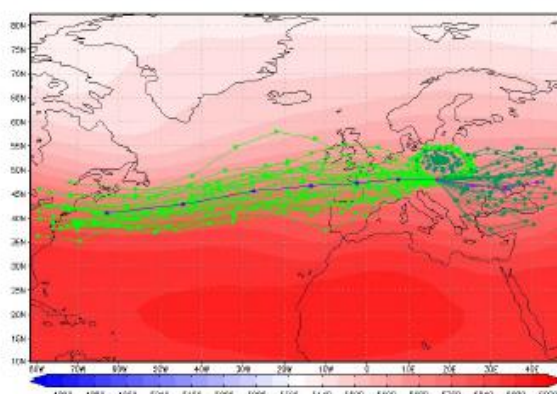
Pre porovnanie ukážeme letnú situáciu v júli (Obrázok 2). Oblúk tvorený spätnou trajektóriou v januári je v lete zhladený. Pôvod vetra sa posunul severnejšie od asi 35° severnej g.d. do približne 40°-45° severnej g.d. Na pozadí vidíme priemerne vyššiu hodnotu geopotenciálnej výšky. V prípade oboch minulých období sú simulácie veľmi podobné. V simulácii pre budúcnosť vidíme známky oteplenia a väčší gradient geopotenciálnej výšky. Trajektórie pozdĺž celej trasy sa menej odlišujú od priemeru.



(a) 1911-1940



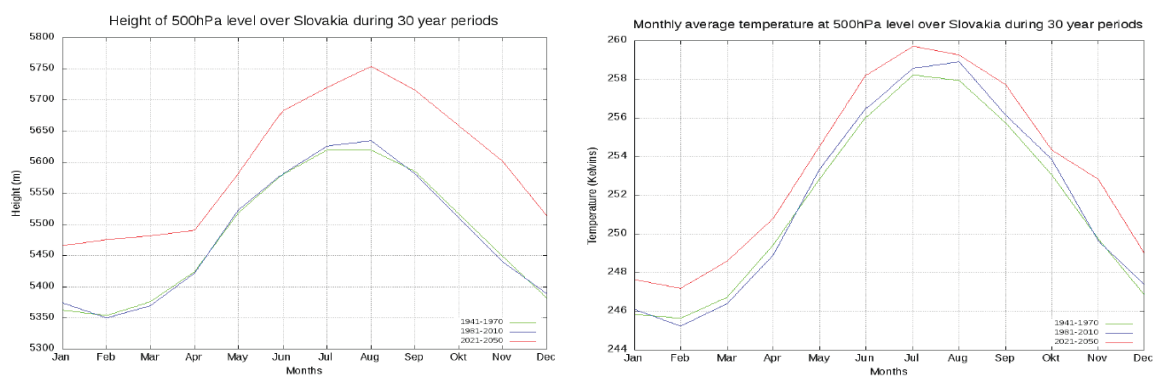
(b) 1981-2010



(c) 2021-2050

Obrázok 2: Júlové trajektórie vetra v hladine 500hPa. Svetlozelená (tmavozelená) línia predstavuje spätnú (doprednú) trajektóriu. Mesačná priemerná trajektória spätná (dopredná) je vyznačená modrou (fialovou). Pozadie tvorí mesačný priemer geopotenciálnej výšky v júli za príslušné tridsaťročné obdobie.

Pre ucelený obraz o zmenách geopotenciálnej výšky a teploty v hladine 500hPa prikladáme nasledujúce grafy (Obrázok 3). Vidíme, že priebeh výšky tlakovej hladiny 500hPa sa v dvoch skúmaných minulých obdobiach veľmi nelíšil. Do budúcnosti ale očakávame veľký nárast s vrcholom v lete. V prípade teploty pozorujeme pozvoľný nárast už porovnaním dvoch období z minulosti a výrazný skok môžeme očakávať smerom do budúcnosti. Analyzovali sme aj priebeh teploty pre hladiny 1000hPa a 850hPa (tu neuvádzame), kde sme rovnako pozorovali nárast teploty počas celého roka v modelovaných dátach do budúcnosti voči situácii z minulých období.



Obrázok 3: (vľavo) Priemerný priebeh výšky tlakovej hladiny 500hPa počas troch tridsaťročných období nad územím Slovenska; (vpravo) Priemerný priebeh teploty v v hladine 500hPa počas troch tridsaťročných období nad územím Slovenska.

Diskusia

Študovali sme súvis medzi vlnovou dĺžkou Rossbyho vln a hodnotami NAO indexu. Zistili sme, že pri vyšších hodnotách NAO indexu pozorujeme aj dlhšie Rossbyho vlny. Je dôležité pripomenúť, že použité vstupné dáta boli mesačné priemery. Severoatlantická oscilácia je jav s periódou niekoľkých dní, preto kratšie a miernejšie záporné fázy NAO boli týmto výpočtom zastreté.

Z grafu teploty vidíme, že teplota rastie. Do budúcnosti pozorujeme očakávaný nárast 1-2K v hladine 500hPa. Z priebehu teploty pre prízemnú vrstvu (graf neuvádzame) sme zistili, že môžeme očakávať podobný nárast teploty, čo približne zodpovedá predpovedi scenára A1B, ktorý očakáva oteplenie o 2,8K do konca 21. storočia (viď Tabuľka 1). S nárastom teploty súvisí aj expanzia troposféry do výšky. Z grafu vľavo v Obrázku 3 vidíme, že výška hladiny 500hPa rastie, lebo teplý vzduch sa rozptína.

Pri analýze trajektórií vetra sme pozorovali posun trajektórie smerom od rovníka počas letných mesiacov, naopak, počas zimných mesiacov sa spätná trajektória nachádzala bližšie k rovníku. Prúdenie si približne zachováva svoj tvar aj v simulácii do budúcnosti. Môžeme konštatovať, že výraznú prestavbu v prúdení vzduchu, ktorý prichádza na naše územie, ani toho, čo odchádza zo Slovenska, počas sledovaných období nepozorujeme.

Bibliografia

[1] IPCC *Climate Change 2007, The physical Science Basis* Cambridge: Cambridge University Press, 2007 ISBN: 978-0-521-88009-1

[2] PECHALA,F.,BEDNÁR,J.*Příručka dynamické meteorologie* Praha: Academia, nakladatelství československé akademie ved, 1991 ISBN: 80-200-0198-0

[3] HOUGHTON,J. *Global warming: The Complete Briefing* Cambridge: Cambridge University Press, 2009 ISBN:9781107463790

[4] IPCC *Emission Scenarios* Cambridge: Cambridge University Press, 2000 ISBN: 0-521-80081-1