# Mogući utjecaj El Niño - Južne oscilacije na međugodišnju varijabilnost arktičkog leda

**Kožul, Ena**

**Master's thesis / Diplomski rad**

**2021**

*Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj:* **University of Zagreb, Faculty of Science / Sveučilište u Zagrebu, Prirodoslovno-matematički fakultet**

*Permanent link / Trajna poveznica:* https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:983799

*Rights / Prava:* In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

*Download date / Datum preuzimanja:* **2024-04-23**

*Repository / Repozitorij:*

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

Ena Kožul

# Mogući utjecaj El Niño - Južne oscilacije na međugodišnju varijabilnost arktičkog leda

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU

PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET

GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOGRAFIJA

Ena Kožul

Diplomski rad

# Mogući utjecaj El Niño - Južne oscilacije na međugodišnju varijabilnost arktičkog leda

Voditeljica: izv. prof. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2021.

**Sažetak**

Arktički led predstavlja važnu komponentu klimatskog sustava jer utječe na energijsku ravnotežu na Zemlji. Promjene u količini leda mogu izazvati procese koji imaju značajan utjecaj na vrijeme i klimatske prilike ne samo u polarnom području, već i umjerenim širinama. Arktička amplifikacija fenomen je izraženijeg zatopljenja arktičkog područja u odnosu na tropsko područje i umjerene širine pri čemu se smanjuje meridionalni temperaturni gradijent. Ono je izravno povezano s globalnim zatopljenjem i otapanjem arktičkog leda. Povećanje površinske temperature i posljedično smanjenje leda uzrokovano je povećanjem silaznog dugovalnog zračenja. Vodena para kao jedan od stakleničkih plinova sudjeluje u stvaranju stakleničkog učinka. Stoga povećan dotok vlage na arktičko područje koje se ostvaruje prodorom zraka s umjerenih širina može pridonijeti jačanju tog učinka. S obzirom da El Niño - Južna oscilacija (ENSO) utječe na strujanje u umjerenim širinama, u ovom je radu ispitana moguća povezanost ENSO-a i dotoka vlage na arktičko područje. Na taj se način pokušalo ispitati postoji li mogući odziv količine arktičkog leda na prinudno djelovanje ENSO-a, odnosno utječe li ENSO na međugodišnju varijabilnost arktičkog leda (sjevernije od 60° s.g.š.). U tu je svrhu izračunat vertikalno integrirani tok vlage i vertikalno integrirana konvergencija toka vlage za jesensku (OND) i zimsku (JFM) sezonu. Korišteni su podaci dobiveni ansamblom numeričkih simulacija provedenih modelom SPEEDY, a analiza je napravljena za razdoblje od 1950. do 2010. godine. Tijekom pozitivne faze ENSO-a, maksimalno povećanje dotoka vlage se javlja u studenom (tj. tijekom sezone OND) i tijekom veljače (sezona JFM). Različito pozadinsko strujanje tijekom određenih mjeseci pospješuje dotok vlage na Arktik. Pomoću modela SPEEDY je provedena analogna analiza za simulacije u uvjetima toplije klime koja odgovara dvostrukoj koncentraciji $CO_2$. Uočen je dotok vlage slične prostorne raspodjele kao i kod prethodnog eksperimenta, ali s povećanjem nad sjevernim Atlantskim oceanom.

**Ključne riječi:** Arktička amplifikacija, ENSO, veritikalno integrirana konvergencija toka vlage, vertikalno integriran tok vlage, SPEEDY

**Possible impact of El Niño – Southern Oscillation on the interannual variability of Arctic sea-ice**


## Abstract

Arctic amplification is a phenomenon of more intense response of Arctic areas to global warming than it is in the tropics. The increase in surface temperature and a decrease in sea-ice is caused by an increase in descending long-wave radiation which is associated with green-house effect. Water vapor is one of the greenhouse gases which increase the descending long-wave radiation. One of the sources of water vapor in the Arctic are intrusions from midlatitudes. An analysis of the impact of ENSO on moisture intrusions at latitudes northern of 60° N is made by calculating the vertically integrated moisture flux and the vertically integrated moisture flux convergence for fall (OND) and winter (JFM) seasons. The ensemble of numerical simulations was made with the SPEEDY model, and the analysis had been made for the period 1950-2010 years. The positive phase of the ENSO has a maximum increase in moisture intrusions in November in the OND season and during February in the JFM season. Different background circulation during certain months enhances the moisture intrusions into the Arctic. The same analysis was performed for SPEEDY simulations with doubled $CO_2$ concentration since an increase in greenhouse gases leads to heating thereby increasing the amount of available water in the air column. A similar spatial pattern of moisture advection is obtained as in the previous experiment, but with an increase over the north Atlantic Ocean.



**Keywords:** Arctic amplification, El Niño – Southern Oscillation, vertically integrated moisture flux convergence , vertically integrated moisture flux, SPEEDY

Popis kratica

AGS – atmosferski granični sloj

Ctrl – kontrolni eksperiment

2×CO2 – eksperiment s udvostručenom koncentracijom ugljikovog dioksida

Dec – prosinac (eng. *December*)

ENSO - El Niño - Južna oscilacija (eng. *El Niño - Southern Oscillation*)

ENSO- - kompozit negativne faze El Niño - Južna oscilacije

ENSO+ - kompozit pozitivne faze El Niño - Južna oscilacije

ECMWF - Europski centar za srednjoročnu progonozu vremena (eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*)

ERA - (eng. *European Reanalysis*)

Feb – veljača (eng. *February*)

i.g.d. -istočna geografska dužina

Jan – siječanj (eng. *January*)

j.g.š. - južna geografska širina

JFM - siječanj, veljača, ožujak (eng. *January, February, March*)

Mar – ožujak (eng. *March*)

MF - tok vlage (eng. *Moisture Flux*)

MFC – konvergencija toka vlage (eng. *Moisture Flux Convergence*)

NAE - Sjeverni Atlantik - Europa (eng. *North Atlantic - European*)

NAO - Sjeverno - Atlantska oscilacija (eng. *North Atlantic Oscillation*)

NCAR - Nacionalni centar za atmosferska istraživanja (eng. *National Center for Atmospheric Research*)

NCEP - Nacionalni centar za prognozu okoliša (eng. *National Centers for Environmental Prediction*)

NOAA - Nacionalna agencija za ocean i atmosferu (eng. *National Ocean and Atmosphere Administration*)

Nov – studeni (eng. *November*)

Oct – listopad (eng. *October*)

OND – listopad, studeni, prosinac (eng. *October, November, December*)

PNA - Pacifik - Sjeverna Amerika (eng. *Pacific - North American*)

s.g.š .– sjeverna geografska širina

SPEEDY - eng. Simplified Parametrizations primitivE-Equation DYnamics

SO - Južna oscilacija (eng. Southern Oscillation)

SOI - Indeks južne oscilacije (eng. Southern Oscillation Index)

SST - površinska temperatura mora (eng. Sea Surface Temperature)

SSTA - anomalija površinske temperature mora (eng. Sea Surface Temperature Anomaly)

VIMF- vertikalno integriran tok vlage (eng. Vertically Integrated Moisture Flux)

VIMFC – konvergencija vertikalno integriranog toka vlage (eng. Vertically Integrated Moisture Flux Convergence)

z.g.d. - zapadna geografska dužina

**Sadržaj**

1. Uvod ... 1
1.1 Arktička amplifikacija ... 1
1.2. El Niño - Južna oscilacija ... 4
1.3 ENSO i daljinske veze ... 7
1.4 Dosadašnja istraživanja ... 9
1.5 Motivacija i cilj istraživanja ... 11
2. Podaci i metode ... 12
2.1 Model SPEEDY ... 12
2.2 Ansambl numeričkih simulacija ... 16
2.3 Analiza po skupovima događaja ... 16
2.4 Određivanje skupova događaja prema Niño 3.4 indeksu ... 17
2.5 Vertikalno integriran tok vlage, VIMF ... 21
2.6 Vertikalno integrirana konvergencija toka vlage, VIMFC ... 21
3. Rezultati i diskusija ... 24
3.1 Sezona OND ... 24
3.2 Sezona JFM ... 27
3.3 Meridionalna kompnenta VIMF-a ... 31
3.4 Dotok vlage tijekom ENSO-a u toplijoj klimi ... 33
3.5 Meridionalna komponenta VIMF-a u toplijoj klimi ... 38
4. Zaključak ... 41
Dodatak A ... 42
Dodatak B ... 43
Literatura ... 45

## 1. Uvod

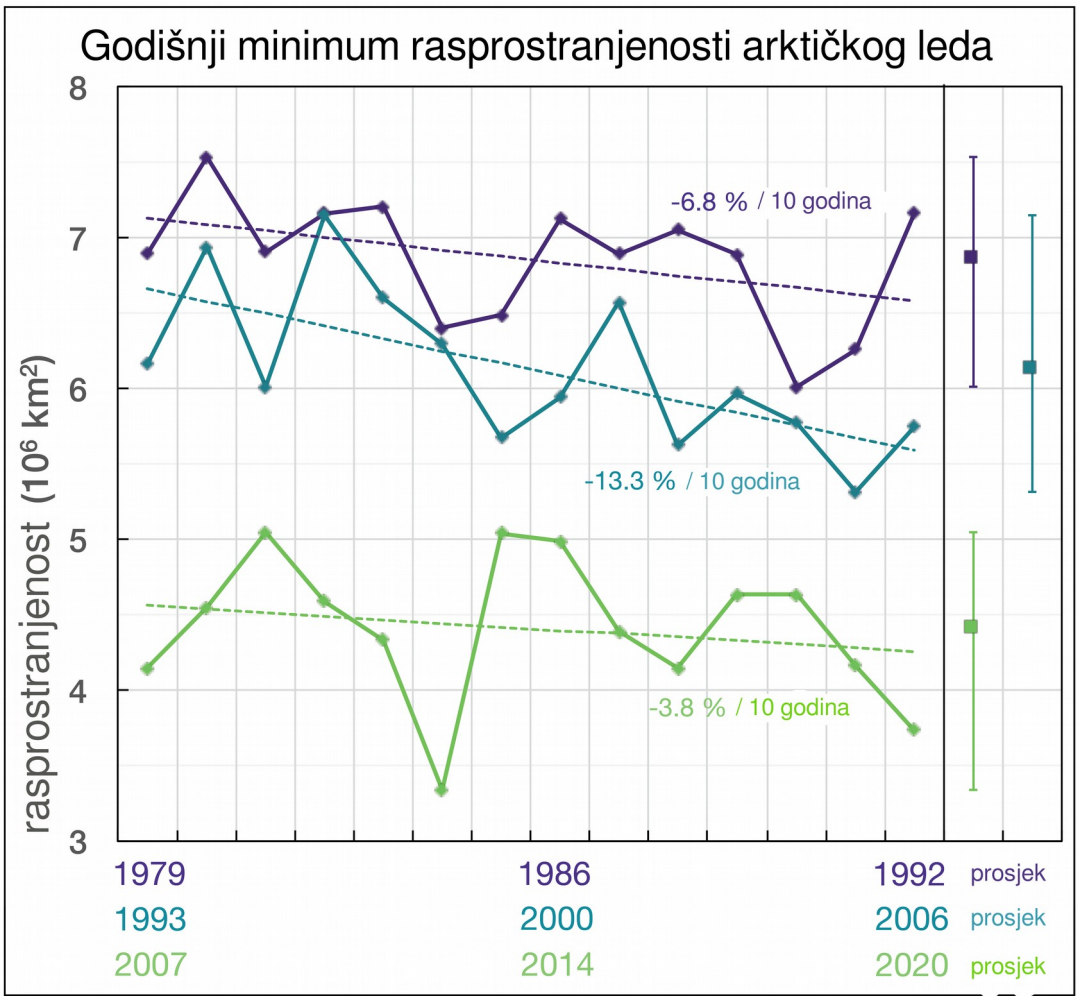
### 1.1 Arktička amplifikacija

Promjene u sastavu atmosfere i posljedično u ukupnoj bilanci zračenja (staklenički učinak) uzrokuju povećanje temperature koje je poznato kao globalno zatopljenje. Ipak, zatopljenje nije jednako na svim područjima Zemlje. Tako podaci ukazuju da se arktičko područje zagrijava dvostruko brže od globalnog srednjaka i ima značajnu varijabilnost u površinskoj temperaturi (Lee, 2014), a ta se pojava naziva Arktička amplifikacija. Uz zagrijavanje atmosfere nad Arktikom zabilježeno je i veliko smanjenje leda čime se mijenja albedo površine što izravno utječe na bilancu zračenja na površini Zemlje. Naime, led ima iznimno visok albedo, a njegovo smanjenje uzrokuje smanjenje ukupnog albeda na tom području čime se povećava udio Sunčevog zračenja koje zagrijava tlo. To je tzv. pozitivni uzajamno-povratni proces jer početna pojava (zatopljenje) izaziva pojavu (topljenje leda) koja pojačava početni proces (zatopljenje).

Dio klimatskog sustava koji obuhvaća sve velike površine zemlje sastavljene od leda naziva se kriosfera. Čine ju ledenjaci, morski led, jezerski led, permafrost i snježni prekrivač. Dva su važna svojstva leda, to su veliki albedo i mala toplinska vodljivost. Važnost tih svojstava je u vidu energetske ravnoteže koja se postiže uz ledene površine. Zbog velikog albeda led će značajno odbijati dolazno kratkovalno Sunčevo zračenje, a zbog male vodljivosti led će smanjiti protok topline prema dubini. Kriosfera je važna sastavnica klimatskog sustava jer se njezinim promjenama mijenja energetski budžet sustava stoga se prati količina leda na Zemlji, osobito promjene u površinskoj pokrivenosti morskim ledom i dubini leda.

Karakteristično je da je minimalna rasprostranjenost morskog leda na Arktiku u rujnu nakon čega slijedi sezonsko povećanje tijekom zime. Međugodišnja varijabilnost se može uočiti praćenjem minimalne godišnje pokrivenosti ledom. Godišnji minimum rasprostranjenosti morskog leda tijekom

42-godišnjeg satelitskog praćenja na Arktiku dan je na slici 1. Najniži godišnji minimum zabilježen je 2012. godine ( $3{,}39 \cdot 10^6$ km$^2$), 2020. godine zabilježena je druga najmanja površinska pokrivenost, $3{,}74 \cdot 10^6$ km$^2$ (izvor: http://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/09/arctic-sea-ice-decline-stalls-out-at-second-lowest-minimum/ 29. rujna 2020.).




Slika 1. *Godišnji minimum rasprostranjenosti arktičkog leda za tri 14-godišnja razdoblja. Trendovi su izračunati u odnosu na srednju minimalnu rasprostranjenost od 1982. do 2010. godine. Desno su prikazani srednja vrijednost i raspon najvećih i najmanjih minimuma rasprostranjenosti za pojedino razdoblje. (http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/1999/09/Min_14year_edited.png , 29. rujna 2020.)*

Smanjenje minimuma rasprostranjenosti morskog leda dovodi do otežanog formiranja leda tijekom hladnijeg doba godine. Toplina koja je primljena u oceane tijekom ljetnih mjeseci predaje se atmosferi preko radijacijskih i turbulentnih tokova i tako zagrijava atmosferu zimi. Zagrijavanje usporava stvaranje leda tijekom zime kako u širinu tako i u dubinu (Inoue i Hori, 2011). Taj efekt međudjelovanja albeda leda i zagrijavanja atmosfere najviše je proučavan kao jedan od uzroka Arktičke amplifikacije. Dosadašnja istraživanja dovela su do zaključaka da su procesi koji dovode do Arktičke amplifikacije sljedeći:

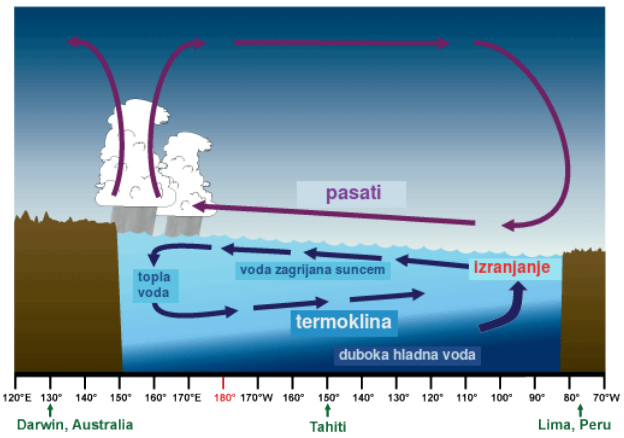
- promjene u albedu zbog promjene površine koju prekrivaju led i snijeg (Winton, 2006; Serreze i Barry, 2011; Screen i sur., 2012)
- promjena zračenja zbog povećanja koncentracije stakleničkih plinova (Stroeve i sur., 2012; Gillett i sur., 2008)
- promjena koncentracija aerosola i taloženja ugljika na ledu i snijegu (Shindell i Faluvegi, 2009 navedeno u Cohen i sur., 2014)
- promjene koncentracije vlage i naoblake na Arktiku (Francis i Hunter, 2006; Graversen i Wang, 2009)
- relativno manje povećanje odlaznog dugovalnog zračenja na Arktiku u odnosu na tropsko područje za isto temperaturno povećanje (Pithan i Mauritsen, 2014)
- na većim skalama, promjena u transportu topline i vlage prema polovima (Francis i Hunter, 2006; Graversen i sur.,2008).

Arktička amplifikacija prisutna je tijekom svih godišnjih doba, ali je tijekom jeseni i zime najjača. Klimatske projekcije s povećanom koncentracijom stakleničkih plinova u združenim klimatskim modelima također ukazuju na fenomen arktičke amplifikacije (Cohen i sur., 2014).

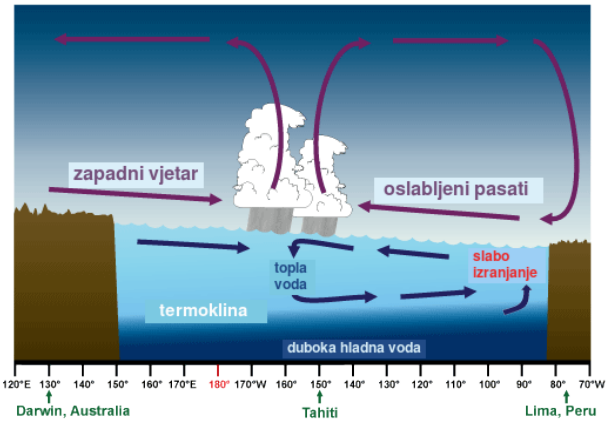
1.2. El Niño - Južna oscilacija

S obzirom na amplitudu i zonalnu rasprostranjenost, Walkerova cirkulacijska ćelija je dominantna longitudinalna ćelija na tropskom području. Obuhvaća područje iznad ekvatorskog Pacifika kao što prikazuje slika 2. Kvaziperiodička varijacija Walkerove cirkulacije i nagiba termokline naziva se El Niño - Južna oscilacija (eng. *El Niño – Southern Oscillation*, ENSO).

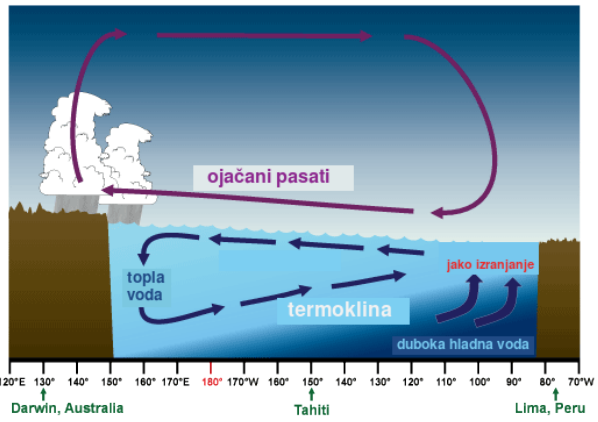
a)




b)




c)




Slika 2. *Shematski prikaz cirkulacije oceana i atmosfere na području tropskog Pacifika; a) Walkerova cirkulacijska ćelija, b) topla faza ENSO-a i c) hladna faza ENSO-a. (izvor: https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns 30. studenoga 2020.)*

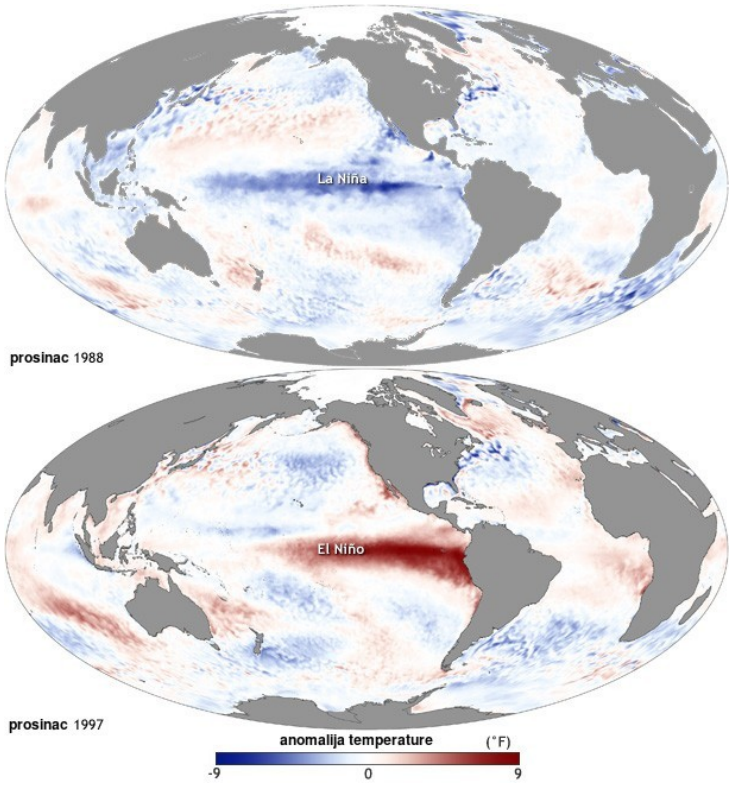
Na zapadnom dijelu Pacifiku područje je niskog tlaka dok je na istočnom dijelu polje visokog tlaka zraka. Takva raspodjela tlaka uzrokuje strujanje zraka pri površini koje je istočnog smjera, odnosno pušu pasati. Vjetar nosi vlagu i potiskuje površinski oceanski sloj prema zapadu, morska razina se povećava uz obale Australije i Indonezije te se tamo termoklina produbljuje, a u istočnom dijelu ekvatorskog Pacifika termoklina je bliže površini. Površinske morske struje usmjerene su prema zapadu, voda zaranja kada dođe do ruba bazena ekvatorskog Pacifika, odnosno na obalama Australije i Indonezije. Pridnena struja je usmjerena prema istoku i na istočnom kraju ekvatorskog bazena dolazi do izranjanja.

Pod utjecajem Coriolisove sile sumarno je transport mase okomit na smjer vjetra, odnosno tok mase na površini je usmjeren prema polovima. Tako na ekvatoru dolazi do divergencije i zbog očuvanja mase na ekvatorskom području izranja voda iz dubljih slojeva, tzv. ekvatorsko izranjanje (eng. *upwelling*). U slučaju kada je termoklina blizu površine, tada na površinu izranja hladna dubinska voda. Polje hladne morske površine na dijelu istočnog ekvatorskog Pacifika nazivamo 'hladni jezik' (eng. *cold tongue*). Kao atmosferski odgovor, nad zapadnim Pacifikom se nalazi topliji, vlažniji zrak, održava se relativno nizak tlak te se pospješuje konvekcija i stvaranje oborine. Nad istočnim se Pacifikom pak nalazi hladniji zrak s manje vlage koji pospješuje subsidenciju zraka i polje visokog tlaka. Tako se održava Walkerova cirkulacija (slika 2a).

ENSO je fenomen združenog međudjelovanja atmosfere i oceana i predstavlja višegodišnji klimatski mod. Promjena gradijenta tlaka zraka iznad Pacifika u smjeru istok-zapad se zove Južna oscilacija. Negativna faza Južne oscilacije vezana je uz slabljenje gradijenta tlaka, a pozitivna uz njegovo jačanje te se očituje u razlici tlaka zraka između Tahitija i Darwina. Anomalije tlaka u Darwinu i Tahitiju su negativno korelirane te značajno variraju s periodom od dvije do pet godina. Kada se gradijent tlaka smanji, Walkerova cirkulacija slabi i područje maksimuma oborine se pomiče prema istoku, istočni vjetrovi slabe što dovodi i do slabljenja cirkulacije u moru i oslabljenog izranjanja dubinske

morske vode. Produbljuje se termoklina na zapadnom Pacifiku, a morska površina ostaje topla. Opisana situacija povezana s povećanom površinskom temperaturom mora (eng. Sea Surface Temperature, SST) u ekvatorijalnom području Pacifika naziva se El Niño (slika 2b).

Suprotna faza je povezana s jačanjem gradijenta tlaka zraka prema zapadu iznad ekvatorskog Pacifika što uzrokuje jačanje vjetrova. Jači vjetrovi pospješuju morsku struju, samim time i izranjanje duboke i hladne morske vode na području istočnog Pacifika. Faza povezana s hladnim anomalijama SST-a naziva se La Niña (slika 2c). Prostorna raspodjela anomalije površinske temperature mora tijekom faza El Niño i La Niña je prikazana na slici 3.




Slika 3. *Prostorna raspodjela SSTA-a za događaj La Niña u prosincu 1988. i El Niño u prosincu 1997. godine. Anomalija je najveća na području istočnog tropskog Pacifika, iznosi do 9 °F u obje faze. ( izvor: https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index , 4.kolovoza 2020.)*

Atmosferski odgovor može održavati stanje oceana ili ga vraćati u neutralno stanje. Na održavanje i razvoj ENSO-a i Walkerove cirkulacije utječe meridionalni temperaturni gradijent, količina vodene pare i oblaci iznad tropskog Pacifika. Meridionalni temperaturni gradijent uvjetuje strujanje zraka nad ekvatorskim područjem, a količina vodene pare u atmosferi zbog povećanog SST-a mijenja bilancu zračenja. Tom utjecaju treba pridodati i vodenu paru koja kao stakleнički plin povećava silazno dugovalno zračenje i tako dodatno zagrijava površinu. Povećana konvekcija u toploj fazi ENSO-a dovodi do povećanja odlaznog dugovalnog zračenja. Ovisno o temperaturi mora, razvit će se različiti oblaci koji će utjecati na smanjenje temperature morske površine (Trenberth, 1997).

### 1.3 ENSO i daljinske veze

ENSO je fenomen u kojem promjene temperature površine ekvatorskog dijela Pacifika u međudjelovanju s atmosferom utječu na klimatsku varijabilnost na višim geografskim širinama.

Jedan od poznatih načina utjecaja ENSO-a na izvantropske širine jesu Rossbyjevi valovi. Na gornjem dijelu Hadleyeve ćelije dolazi do konvergencije/ divergencije za vrijeme La Niñe/El Niña. Ukoliko se to događa u području velike apsolutne vrtložnosti to postaje izvor Rossbyjevih valova koji se šire dominantnom zapadnom strujom u umjerenim širinama, prvo na PNA (eng. *Pacific North American; PNA)* područje (Scaife, 2010). Signal ENSO-a je jasan na području sjevernog Pacifika i sjeverne Amerike.

Na području PNA intenzivira se Aleutska ciklona što dovodi do zagrijavanja obale Aljaske. Interferencijom signala ENSO događaja i Aleutske ciklone dolazi do povećanja amplitude planetarnih valova na sjevernoj hemisferi. Suptropska mlazna struja jača tijekom El Niña, javlja se meridionalni turbulentni

tok topline na 50° s.g.š., geopotencijalna visina je povećana na sjevernom polu, a snižena na 55° s.g.š. (Brönnimann, 2007).

ENSO utječe i na tropski Atlantik jer se tamo mijenja intenzitet istočnih vjetrova, mijenja se tok latentne topline, a to utječe na promjene u oceanskoj i atmosferskoj cirkulaciji izvan ekvatorskog područja (Brönnimann, 2007). Tim putem bi ENSO mogao mijenjati Azorsku anticiklonu pa i Sjeverno-atlantsku oscilaciju (NAO, eng. *North Atlantic Oscillation)*.

Osim prijenosa signala putem troposfere, signal ENSO-a vidljiv je u stratosferi kao vertikalno propagirajući Rossbyjevi valovi koji prenose energiju u stratosferu. Osmotreni podaci su potvrđeni klimatskim modelima, a pokazuju da za vrijeme El Niña slabi polarni vrtlog, amplituda dugih polarnih vrtloga se povećava i zagrijava se površina na polovima (Scaife, 2010; King i sur., 2018).

Provedena su brojna istraživanja koja analiziraju signal ENSO-a na području sjevernog Atlantika i Europe (NAE, eng. *North-Atlantic-European).* Utjecaj ENSO-a na područje NAE je teško detektirati zbog unutarnje varijabilnosti i atmosferskog šuma u umjerenim širinama te signal sam po sebi može biti varijabilan. Varijabilnost signala može biti uzrokovana različitom lokacijom izvora, jačinom i vremenom nastajanja ENSO-a. Detekcija signala na području NAE ovisi o nelinearnoj interakciji s pozadinskim strujanjem, o početnom stanju polarnog vrtloga, kvazidvogodišnjim oscilacijama, ali i tromijim komponentama klimatskog sustava kao što su oceani (Brönnimann, 2007).

Većina studija je pokazala da se za vrijeme tople faze javlja polje odziva tlaka zraka koje se očituje kao negativan NAO (tj. javlja se povećan tlak pri površini nad sjevernim Atlantikom, a Azorska anticiklona slabi). Pojačana je aktivnost stacionarnih vrtloga. Tijekom zime sjeverna Europa je hladnija (toplija) za vrijeme događaja El Niño (La Niña), a nad Mediteranom je staza oluja pomaknuta prema jugu (Scaife, 2010). S druge strane, postoje i studije koje ne ukazuju na značajan signal ENSO događaja nad Europom.

Nadalje, različit je utjecaj ENSO-a na isto područje u različitim razdobljima. Tako se primjerice pokazalo da je utjecaj ENSO-a na umjerene širine tijekom zime različit od utjecaja u jesen/ranu zimu. Razlog tome može biti različito pozadinsko strujanje koje je vezano uz Rossbyjeve valove, određeni mod prirodne varijabilnosti i stratosferske uvjete. Utjecaj ENSO-a zabilježen je kao jačanje zapadnih vjetrova tijekom studenog i prosinca na području sjevernog Atlantika, a slabljenje tog strujanja zabilježeno je tijekom siječnja i veljače.

King i sur. (2018) su pokazali da se u kasnu jesen, točnije u studenom, utjecaj ENSO-a jasno vidi na području sjevernog Atlantika i pritom je signifikantan. Taj signal slabi i mijenja oblik tijekom siječnja i veljače. Različit utjecaj tijekom različitih mjeseci dovodi u pitanje analizu sezonskih srednjacka koja može prekriti značajan signal.

### 1.4 Dosadašnja istraživanja

Kada se promatra veza smanjenja leda i Arktičke amplifikacije, studije se slažu da je gubitak morskog leda pospješen lokalnim zagrijavanjem uslijed čega slabi površinski meridionalni temperaturni gradijent, granični sloj postaje vlažniji te se smanjuje statička stabilnost zraka (Cohen i sur., 2014). Sve je više rezultata motrenja, modeliranja i teorijskih dokaza koji pokazuju da uslijed zagrijavanja površine visokih širina dolazi do povećavanja geopotencijalne visine što utječe na atmosfersku cirkulaciju umjerenih širina, odnosno na planetarne valove. Još se ne zna uzrok amplificiranja i usporavanja planetarnih valova, ali pospješena vertikalna propagacija Rossbyjevih valova u stratosferu slabit će stratosferski polarni vrtlog što na kraju može rezultirati naglim stratosferski zatopljenjem (Cohen i sur., 2014).

Anomalije u cirkulaciji koje se javljaju kao odgovor na smanjenje arktičkog leda i s time povezanu promjenu meridionalnog gradijenta temperature, slične su onoj koja je povezana s negativnom fazom NAO-a: brijeg kod Arktika u polju tlaka (posebno kod Grenlanda) i slabljenje polarne mlazne struje koja se pomiče

prema ekvatoru. Kao rezultat se javljaju topliji uvjeti na Arktiku, a hladniji u umjerenim širinama gdje se također povećava vjerojatnost za snježne oluje (Cohen i sur., 2014).

Očito je da promjene u arktičkom području utječu na klimatsku varijabilnost umjerenih širina. S druge strane, zanimljivo je znanstveno pitanje utječu li promjene u umjerenim širinama na Arktik. Tako su Lee i sur. (2017) zaključili da je silazno dugovalno zračenje dominantan čimbenik trenda površinske temperature dok tok topline ima lokalnu i ograničenu ulogu kroz Arktičku amplifikaciju. Pokazalo se i da prodori vlage na sinoptičkoj skali utječu na silazno zračenje u smislu njegovog jačanja uslijed čega se Arktik dodatno zagrijava. Prodori vlage mogu biti uzrokovani sinoptičkim aktivnostima nad područjem NAE, varijabilnosti umjerenih širina ili nekom niskom frekvencijskom varijabilnošću kao što je veza s tropima.

Wood i sur. (2013) su pokazali da dotok vlage iz umjerenih širina predstavlja značajan udio u klimatskom transportu vlage na Arktik te predstavlja dinamičku vezu promjena na Arktiku s nižim geografskim širinama. S obzirom da arktički oblaci zimi sadrže relativno malo tekuće vode, povećanje količine vode uslijed transporta vlage s juga povećava koncentraciju vodene pare u tom području i uzrokuje jačanje silaznog dugovalnog zračenja. Uz dotok vlage s juga i dotok topline dodatno doprinosi povećanju dugovalnog zračenja što rezultira smanjenjem leda. Smanjenje leda takvim prodorima nije značajno u odnosu na godišnje varijacije leda, ali kumlativan efekt može biti značajan, pogotovo jer se osjetljivost leda na povećanje dolaznog zračenja povećava što je led tanji. Općenito, na debljinu morskog leda utječe vjetar koji uzrokuje gibanje morskog leda, temperaturne anomalije i povećanje silaznog dugovalnog zračenja (Park i sur., 2015).

## 1.5 Motivacija i cilj istraživanja

Dosadašnja istraživanja ukazuju da na količinu arktičkog leda utječe dotok vlage iz umjerenih širina. S obzirom da ENSO utječe na klimatsku varijabilnost umjerenih širina, može se pretpostaviti i njegov utjecaj na transport vlage putem utjecaja na strujanje. Stoga je cilj ovog rada ispitati mogući utjecaj ENSO-a na dotok vlage nad arktičko područje. Ukoliko se pokaže postojanje te veze, to bi ukazalo na moguću povezanost međugodišnje varijabilnosti arktičkog leda i tropskog Pacifika (ENSO-a). Može se pretpostaviti da će dotok vlage uzrokovan ENSO-om biti značajan na području PNA za vrijeme El Niño događaja.

Pojava ENSO je najjače izražena zimi pa se tada može očekivati i njen najjači utjecaj. Nadalje, s obzirom da su King i sur. (2018) pokazali da je utjecaj ENSO-a na područje sjevernog Atlantika i Europe signifikantan i pozitivno koreliran tijekom kasne jeseni, može se očekivati da se u toj sezoni stvaraju cirkulacijski oblici pogodni za dotok vlage prema Atlantiku. Stoga se u ovom radu proučava i dotok vlage s Atlantika prema polarnom području u jesenskoj i zimskoj sezoni.

## 2. Podaci i metode

### 2.1 Model SPEEDY

Model SPEEDY (eng. *Simplified Parametrizations, PrimitivE – Equation Dynamics*) numerički je model opće cirkulacije atmosfere koji koristi primitivne jednadžbe i pojednostavljene parametrizacije za računanje meteoroloških polja. Razvijen je u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku Abdus Salam u Trstu u Italiji te je korišten pri izradi polja meteoroloških veličina u ovom radu. Radi se o modelu srednje složenosti, hidrostatički je i koristi sigma koordinatu, σ. Korištenje sigma koordinate pri gruboj rezoluciji kakvu ima ovaj globalni model omogućuje bolje praćenje tla kao rubne površine jer je to koordinata definirana kao omjer tlaka na nekoj visini i tlaka pri tlu. Model je računski povoljan zbog pojednostavljenih parametrizacija i relativno niske prostorne rezolucije (Kucharski i sur., 2013).

Vremenska shema koju koristi je preskočna shema s vremenskim filtrom. Prostorna mreža se sastoji od 96×48 točaka Gaussove mreže, a horizontalna rezolucija je 3.75° geografske širine × 3.75° geografske dužine i odgovara trokutastom odsijecanju spektralnih polja pri valnom broju 30. Vertikalno model ima 8 slojeva gdje σ koordinata ima vrijednosti redom 0, 0.05, 0.14, 0.26, 0.60, 0.77, 0.90 i 1.

Rubni uvjeti potrebni za izračun na površini su određivanje toka impulsa, toka topline i vlage, a na gornjoj granici potrebno je određivanje toka dolaznog Sunčevog zračenja. Donja granica modela zahtijeva topografiju, udio kopna i mora i klimatološka polja SST-a, udjela leda, temperature tla na dubini sloja od jednog metra, količine vlage na vrhu tla i u zoni korijenja, dubine snijega, albeda tla bez leda i udjela kopna prekrivenog vegetacijom. Za albedo i vegetaciju koriste se godišnji srednjaci, a za ostala polja mjesečni srednjaci koji su onda linearno interpolirani da bi se dobile dnevne vrijednosti. Model ima mogućnost

superponiranja anomalnih polja na klimatološka kao što je slučaj za SST. Podatke o SSTA objavljuje NOAA_ERSST_V3 za razdoblje od 1854. do 2010. godine (izvor: https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v3.html, 20. listopada 2020.).

Sva klimatološka polja su izračunata usrednjavanjem podataka iz ERA reanalize (eng. *European Reanalysis*) iz Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (ECMWF, eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*) u razdoblju od 1979. do 2008.

Varijable koje model računa kao prognostičke jesu vrtložnost, divergencija, apsolutna temperatura, logaritam prizemnog tlaka i dodatna varijabla, specifična vlažnost. Varijable se računaju na nivoima na σ vrijednostima 0.025, 0.095, 0.20, 0.34, 0.51, 0.658, 0.835 i 0.95 i kasnije se interpoliraju na standardne izobarne plohe 30, 100, 200, 300, 500, 700, 850 i 925 hPa. Osim prognostičkih jednadžbi imamo i niz dijagnostičkih koje se uglavnom koriste za fizikalne parametrizacije.

Pri formuliranju fizikalnih parametrizacijskim shema korišteni su osnovni principi parametrizacije kao i u kompleksnim modelima globalne atmosfersko-oceanske cirkulacije (eng. *atmosphere-ocean global circulation model,* AOGCM), a parametrizira se konvekcija, kondenzacija na velikoj skali, oblaci, kratkovalno zračenje, dugovalno zračenje, površinski tok impulsa i energije i vertikalna difuzija.

Parametrizacija kreće tako da se prvo izračuna vrijednost u točkama mreže za primarne varijable (vjetar, temperatura, specifična vlažnost, geopotencijal i površinski tlak iz spektralne prezentacije i onda se definiraju dodatne dijagnostičke varijable, kao što su specifična vlažnost zasićenja, relativna vlažnost, statička energija suhog zraka, statička energija vlažnog zraka i statička energija zasićenog vlažnog zraka. Ako je potrebno linearnom interpolacijom izračunamo vrijednosti na granicama sloja.

Konvekcija je predstavljena kao podizanje zasićenog zraka iz atmosferskog graničnog sloja (AGS-a) do definirane visine TCN (eng. *top-of-convection)* u

srednjoj ili gornjoj troposferi. Ova shema predstavlja sekundarnu izmjenu vlage između AGS-a i slojeva ispod TCN nivoa. Preko toka mase, vlažnosti i *SE*, pretpostavlja se da se uvlačenje zraka događa u donjim dijelovima troposfere iznad AGS-a i slojevima ispod TCN-a. Izvlačenje se događa samo na TCN sloju, odnosno na vrhu oblaka. Ta shema se aktivira kada uvjetna nestabilnost područja opada s visinom.

Kondenzaciju na velikoj skali modelira približavanje specifične vlažnosti referentnoj vrijednosti. To se odvija u troposferskim slojevima kad god relativna vlažnost dosegne prag koji ovisi o sigma koordinati. Od atmosfere se oduzima latentna toplina pri čemu se ona pretvara u statičku energiju suhog zraka.

Parametrizacija oblaka i kratkovalnog zračenja ovisi o velikom broju parametara. Dijagnostički iz vrijednosti relativne vlažnosti u stupcu zraka i količini oborine računamo svojstva oblaka. Pretpostavlja se da oblaci imaju svoju bazu na drugom najdonjem sloju modela i da je njihov vrh gornja granica.

Naoblaka je određena sumom članova proporcionalnih količni ukupne oborine i relativnoj vlažnosti. Stratokumulusna naoblaka na vrhu graničnog sloja je parametrizirana ovisno o statičkoj stabilnosti. Kada je definirana stratokumulusna naoblaka, kratkovalno zračenje se računa pomoću dolaznog na vrhu atmosfere iz astronomskih formula.

Nakon apsorpcije ozona, ono što je ostalo od dolaznog zračenja dijeli se u dvije vrpce, jedna odgovara vidljivom dijelu spektra, a druga je blizu infracrvenog. Za svaku vrpcu i za pojedini troposferski sloj koeficijent transmisije se definira kao funkcija dnevno usrednjenog zenitnog kuta koji ovisi o geografskoj širini, dubini sloja, specifičnoj vlažnosti i svojstvima oblaka. Na površini pak klimatološki albedo je definiran kao funkcija sezonski varirajućeg polja morskog leda i debljine snijega. Dolazno kratkovalno zračenje reflektira se na vrhovima oblaka i od tla. Kako je gotovo cijeli tok u vrpci koja je blizu infracrvenog dijela spektra apsorbiran tijekom propagacije prema dolje, propagacija odlaznog solarnog zračenja modelira za vidljivi spektar.

Parametrizacijska shema dugovalnog zračenja dijeli infracrveni spektar na 4 područja: infracrveni prozor, vrpcu apsorpcije $CO_2$, područje slabe apsorpcije vodene pare i područje jake apsorpcija vodene pare. Svaka vrpca i model sloja ovisno o dubini sloja, vlažnosti i svojstvima oblaka ima definiranu propusnost. Silazno dugovalno zračenje računa se kao težinska funkcija temperature u središnjim dijelovima i na donjoj granici sloja, a uzlazno dugovalno prema temperaturi u središtu i gornjoj granici sloja.

Kako je AGS predstavljen samo jednim slojem, model ne može koristiti varijable u najdonjem sloju kao aproksimacije površinskih tokova. Isto tako gradijenti između dva sloja modela ne mogu se koristiti za procjenu AGS stabilnosti koja može utjecati na definiciju koeficijenata razmjene. Površinska temperatura je izračunata iz energetske ravnoteže površine pretpostavljajući površinski sloj bez toplinskog kapaciteta.

Shemom za vertikalnu difuziju opisani su različiti procesi, plitka konvekcija koja redistribuira vlagu i statičku energiju suhog zraka između dva najniža sloja u slučaju uvjetne stabilnosti, sporu difuziju vlage u stabilnim uvjetima i brzu redistribuciju statičke energije suhog zraka kada je opadanje s visinom blizu suho-adijabatske granice (izvor: http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy_description/km_ver41_appendixA.pdf ).

Prostorna raspodjela leda dana je klimatološkim mjesečnim vrijednostima ukupnog udjela leda (Dodatak A). Napravljena su dva eksperimenta, kontrolni eksperiment Ctrl koji simulira sadašnju klimu, to jest za rubni donji uvjet ima postavljene izmjerene vrijednosti SST-a u razdoblju od 1854.-2010. godine. Drugi eksperiment je $2\times CO_2$, koji se bazira na jednom pokretanju AOGCM-a HadCM3 (eng. *Hadley Centre Coupled Model, version 3*) povećavajući količinu $CO_2$ tijekom 70 godina do udvostručenja, zatim se drži konstantnim slijedećih 150 godina. Taj eksperiment simulira klimu s dvostrukom koncentracijom $CO_2$. Mjesečne vrijednosti anomalija SST-a u tom eksperimentu izračunate su dodavanjem SST klimatologije na mjesečne anomalije kontrolnog eksperimenta što čuva unutarnju varijabilnost sustava. Klimatološka polja SST-a i morskog leda

ostaju produkt udvostručavanja ugljikovog dioksida, $CO_2$. Ovakva analiza s unaprijed zadanim atmosferskom klimatologijom ENSO-a pretpostavlja da se varijabilnost ENSO-a ne mijenja u klimi s udvostručenom koncentracijom $CO_2$ (Herceg Bulić i sur., 2011). Izračun je napravljen za arktičko područje (Dodatak B).

## 2.2 Ansambl numeričkih simulacija

Ansambl numeričkih simulacija je skup produkata modela dobivenih iz različitih početnih uvjeta. Ansamblu možemo izračunati klimatološki srednjak i odstupanje od srednjaka ili anomaliju. Ansambl analiza se koristi kako bi se smanjio atmosferski šum, odnosno bolje detektirala pojava koju proučavamo (Herceg Bulić i Branković, 2007). Ta analiza se često koristi kod proučavanja klimatske varijabilnosti, a u ovom radu izračunati su sezonski i mjesečni srednjaci i anomalije. Izračunate su dvije tromjesečne sezone i mjesečne vrijednosti tih sezona, zimu (JFM, eng. *January February March*) i jesen ( OND, eng. *October November December*). Analiza je provedena za razdoblje od 1950. do 2010., a integracija je napravljena za razdoblje od 149 godina (1854. do 2010.).

## 2.3 Analiza po skupovima događaja

Analiza po skupovima događaja (eng. *composite analysis*) je metoda kojom se podaci vezani za promatrani fenomen grupiraju prema postavljenom uvjetu, računaju se statistički parametri pojedine grupe te se na temelju istih radi analiza. Ovakav pristup se koristi kad želimo uočiti pravilnost pojave (npr. s obzirom na dvije faze) i kada želimo detektirati signal unutar šuma unutarnje varijabilnosti, kao što je slučaj kod ENSO-a i to kada imamo dovoljno dug niz podataka. Dovoljno dug niz je određen prirodom pojave koju promatramo, dakle koliko nam podataka treba da bi se signal izdvojio od šuma. Osnovni uvjet na

temelju kojeg se određuju kategorije treba biti fizikalno opravdan i takav da što bolje izdvaja signal od šuma, odnosno da su ostali utjecaji smanjeni.

Glavna ideja je da procijenimo očekivanu vrijednost grupe koja predstavlja njezino tipično stanje koju smo odredili preko uvjeta. Pri radu s podacima očekivanje se zamijeni sa sumom. Pri tome nema određene pretpostavke o vezi indeksa i vrijednosti varijable. Za slučaj da postoji značajna varijabilnost oko pojedinog kompozita onda kompozit nije reprezentativan kao tipično stanje varijabli (von Strock i Zwiers, 1999.). Kompozit $\vec{V}_\Theta$ se računa prema sljedećem izrazu:

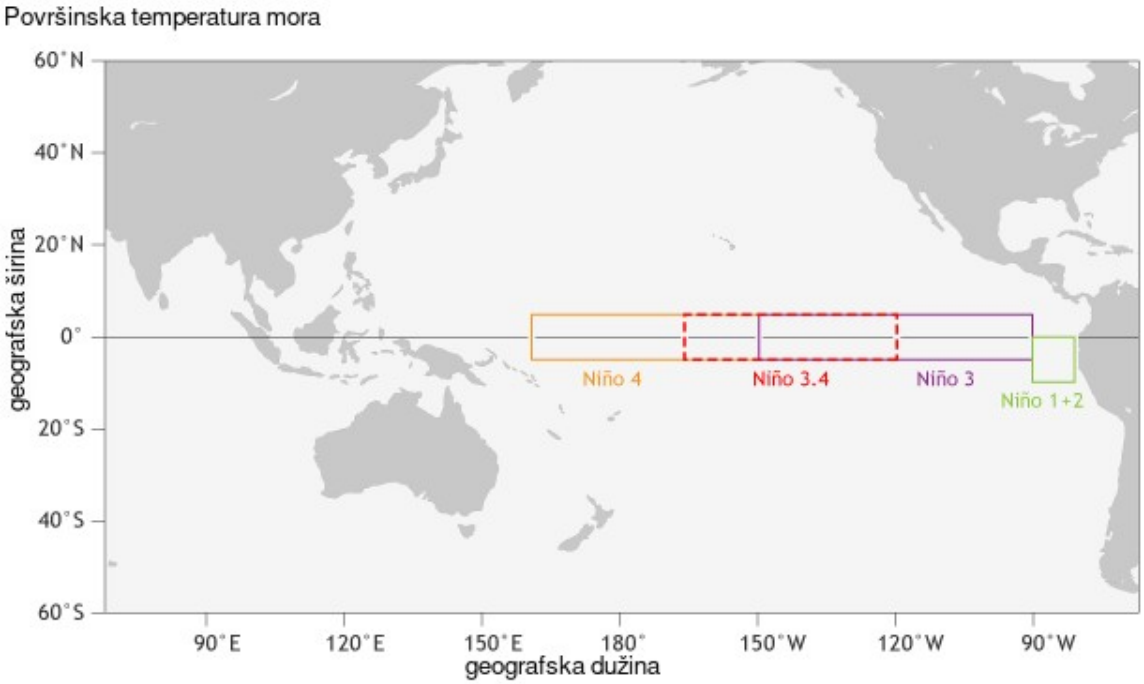
$$\vec{V}_\Theta = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k} \vec{V}_{t_j} \; za\, t \in 1,..,k \; za\, koje\, je\, \vec{z}_{t_j} \in \Theta \qquad (1)$$

gdje su

$$\vec{z}_t \,..\, indeks\, kojim\, se\, opisuje\, promatrana\, pojava$$
$$\vec{V}_t \,..\, skup\, podataka$$
$$\vec{V}_\Theta \,..\, kompozit$$
$$\vec{V}_\Theta = \varepsilon\left(\vec{V}_t \vee \vec{z}_t \in \Theta\right).$$

## 2.4 Određivanje skupova događaja prema Niño 3.4 indeksu

S obzirom da se radi združenom fenomenu međudjelovanja oceana i atmosfere definirani su indeksi koji opisuju atmosfersku komponentu pojave kao što je SOI (eng. *Southern Oscillation Index,* koji opisuje Južnu oscilaciju kao razliku tlaka zraka između Tahitia i Darwina), ali i indeksi koji opisuju oceansku komponentu pojave (na temelju SSTA za određenu površinu Pacifika). Razlikujemo Niño 1+2, Niño 3, Niño 4 i Niño 3.4 indekse, koji su prikazani na slici 4.




Slika 4. *Područje koje obuhvaća pojedini Niño indeks*

*(izvor:https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one 22. listopada 2020.)*

Skupovi su u ovom radu napravljeni prema Niño 3.4 indeksu. Za izračun indeksa se koristi uzastopni petomjesečni srednjak i kada on šest mjeseci ili više odstupa za +/- 0.4 °C za pojedinu fazu ENSO-a. On se računa za područja Pacifika određenog koordinatama 5° j.g.š. do 5° s.g.š . i od 170° z.g.d. do 120° z.g.d.

Taj indeks obuhvaća područje u kojem je promjenjivost SST-a izrazita i koje je ključno u promatranju združenog djelovanja atmosfere i oceana (Trenberth, 1997). Na tom dijelu Pacifika se i događa značajno pomicanje područja s konvektivnom oborinom.

Skupovi koji su korišteni u ovom radu se odnose na godine s deset najjačih Niño 3.4 indeksa u razdoblju od 1950. do 2010. za toplu i hladnu fazu. Vrijednost Niño 3.4 indeksa za pojedini ENSO događaj dana je u tablici 1 i 2.

Tablica 1. *Podaci za 10 najjačih događaje ENSO-a za obje faze tijekom sezone OND u razdoblju od 1950. do 2010.*

| OND | El Niño | | La Niña | |
|---|---|---|---|---|
| | godina | Niño 3.4 | godina | Niño 3.4 |
| 1. | 1965. | 1.02 | 1950. | -1.13 |
| 2. | 1972. | 1.31 | 1954. | -1.19 |
| 3. | 1982. | 1.32 | 1955. | -1.98 |
| 4. | 1987. | 1.06 | 1964. | -1.31 |
| 5. | 1991. | 0.87 | 1973. | -1.77 |
| 6. | 1994. | 0.91 | 1975. | -1.78 |
| 7. | 1997. | 1.69 | 1988. | -1.71 |
| 8. | 2002. | 1.03 | 1998. | -1.26 |
| 9. | 2006. | 0.85 | 1999. | -1.20 |
| 10 | 2009. | 1.16 | 2010. | -1.35 |

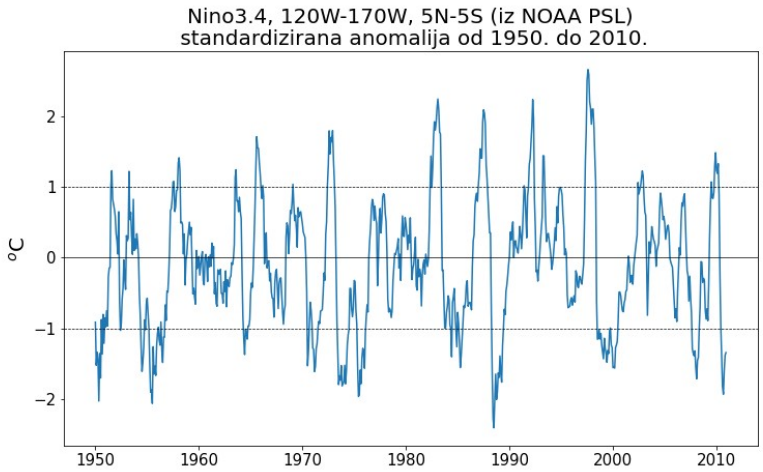
Za sezonu OND u skupu La Niña svih 10 događaja su iznad jedne standardne devijacije, dok su kod El Niña faze tri događaja za 1991., 1994. i 2006. između pola i jedne standardne devijacije.

Tablica 2. *Deset najjačih ENSO događaja tijekom sezone JFM, za obje faze, godine kada su se dogodili i iznos Niño 3.4 indeksa za razdoblje od 1950. do 2010.*

| JFM | El Niño | | La Niña | |
|---|---|---|---|---|
| | godina | Niño 3.4 | godina | Niño 3.4 |
| 1. | 1958. | 2.20 | 1950. | -1.49 |
| 2. | 1966. | 1.67 | 1955. | -0.85 |
| 3. | 1969. | 1.71 | 1956. | -0.89 |
| 4. | 1973. | 1.70 | 1971. | -1.40 |
| 5. | 1983. | 2.40 | 1974. | -1.80 |
| 6. | 1987. | 1.83 | 1976. | -1.20 |
| 7. | 1992. | 2.20 | 1989. | -1.59 |
| 8. | 1995. | 1.70 | 1999. | -1.32 |
| 9. | 1998. | 2.50 | 2000. | -1.48 |
| 10 | 2010. | 2.20 | 2008. | -1.43 |

Za sezonu JFM, u skupu El Niño svih 10 događaja su iznad jedne standardne devijacije, dok su kod La Niña faze dva događaja za 1955. i 1956. između pola i jedne standardne devijacije.

Na slici 5 je prikazana standardna anomalija Niño 3.4 indeksa za razdoblje od 1950. do 2010. (izvor: https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/ 22. listopada 2020.).




Slika 5. *Vremenski niz Niño 3.4 indeksa (°C) za razbolje od 1950. do 2010. godine. Horizontalne isprekidane linije označavaju jednu standardnu devijaciju indeksa.*

## 2.5 Vertikalno integriran tok vlage, VIMF

Tok vlage (MF, eng. *moisture flux*) je veličina definirana umnoškom vjetra $\vec{v}$ i specifične vlažnosti q:

$$MF = \vec{v}\, q. \tag{2}$$

Vertikalno integrirani tok vlage *VIMF* (eng. *Vertically Integrated Moisture Flux*) predstavlja integral MF-a od površinskog tlaka $p_s$ do nekog tlaka p podijeljen s gravitacijskim ubrzanjem. U ovom radu se integrira do 300 hPa jer je količina vodene pare zanemariva iznad tih visina.

$$VIMF = \frac{1}{g}\int_{p_s}^{p} \vec{v}\, q dp \tag{3}$$

Mjerna jedinica je kg $m^{-1}$ $s^{-1}$. Često je VIMF pokazatelj potencijalne oborine, latentne topline pohranjene u atmosferi za razvoj ciklona i ostalih čimbenika hidrološkog ciklusa. U ovom radu je izabran jer se promatra dostupna

količina vodene pare u stupcu zraka na polarnom području, a vodena para sudjeluje u povećanju silaznog dugovalnog zračenja.

## 2.6 Vertikalno integrirana konvergencija toka vlage, VIMFC

Za izračun vertikalno integrirane konvergencije toka vlage (eng. *Vertically Integrated Moisture Flux Convergence,* VIMFC) krećemo od konvergencije vlage na jednom nivou (eng. *Moisture Flux* Convergence, MFC), to je veličina koja je dio jednadžbe očuvanja vodene pare pri određenom tlaku p. Jednadžba očuvanja vlage glasi:

$$\frac{dq}{dt} = S \tag{4}$$

gdje S predstavlja pohranu vodene pare u stupcu zraka, q je specifična vlažnost, dakle totalna promjena vlage u zraku jednaka je razlici izvora i ponora vodene pare u atmosferi, odnosno razlici između evaporacije i oborine. Uzimajući u obzir definiciju totalnog diferencijala i divergencije, te uzimajući u obzir i da je vjetar vektor,

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y} + \omega\frac{\partial}{\partial p} \tag{5}$$

$$V = (u, v, \omega) \tag{6}$$

jednadžba očuvanja mase ima oblik:

$$\frac{\partial q}{\partial t} + u\frac{\partial q}{\partial x} + v\frac{\partial q}{\partial y} + w\frac{\partial q}{\partial z} + q\underbrace{\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z}\right)}_{0} = E - P. \tag{7}$$

Uvažavajući jednadžbu kontinuiteta uz pretpostavku nestlačivog fluida, član u zagradi jednak je nuli.

$$\nabla = \vec{i}\frac{\partial}{\partial x} + \vec{j}\frac{\partial}{\partial y} \tag{8}$$

Tako dobivamo izraz

$$\underbrace{\frac{\partial q}{\partial t}}_{\text{lokalna promjena } q} + \underbrace{\nabla \cdot (q V_h)}_{-\text{ horizontalni MFC}} + \underbrace{\frac{\partial (q\omega)}{\partial p}}_{-\text{ vertikalni MFC}} = \underbrace{E - P}_{\text{izvori - ponori}}, \tag{9}$$

gdje je $V_h = (u, v)$.

Dobili smo jednadžbu očuvanja vlage koja predstavlja budžet vlage česti zraka. Jednadžba se sastoji od lokalne promjene specifične vlažnosti, negativne horizontalne i vertikalne konvergencije vodene pare i članova izvora i ponora vodene pare u česti. Horizontalna MFC je negativna divergencija umnoška specifične vlažnosti i horizontalnog vjetra

$$MFC = -\nabla \cdot (q V_h) = -V_h \cdot \nabla q - q \nabla \cdot V_h, \tag{10}$$

$$MFC = \underbrace{-u \frac{\partial q}{\partial x} - v \frac{\partial q}{\partial y}}_{\text{advekcijski član}} \underbrace{- q\left(\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}\right)}_{\text{konvergencijski član}}. \tag{11}$$

Tako se MFC se dijeli na advekcijski član (tj. horizontalnu advekciju specifične vlažnosti) i na konvergencijski član koji je proporcionalan horizontalnoj konvergenciji mase.

Integracijom jednadžbe očuvanja vlage od površine do vrha atmosfere i dijeljenjem s gravitacijskom akceleracijom, dobiva se da je vertikalno integrirana lokalna promjena specifične vlažnosti u stupcu zraka jednaka vertikalno integriranoj konvergenciji toka vlage i razlici oborine i evaporacije otežano s gravitacijskom akceleracijom u stupcu zraka.

$$\overline{P} - \overline{E} = \frac{-1}{g} \int_p^{p_s} \frac{\partial q}{\partial t} dp - \frac{1}{g} \int_p^{p_s} V_h \cdot \nabla q dp - \frac{1}{g} \int_p^{p_s} q \nabla \cdot V_h dp \tag{12}$$

Prepoznamo da su zadnja dva člana na desnoj strani jednadžbe jednaka VIMFC-u:

$$VIMFC = \frac{-1}{g} \int_p^{p_s} \nabla \cdot (q V_h) dp \tag{13}$$

Mjerna jedinica je kg $m^{-2}$ $s^{-1}$.

MFC je bolja mjera za označavanje dostupnosti vlage dok tok vlage pokazuje samo koliko je vlage prošlo. MFC je pozitivan prije i tijekom oborine i negativan je nakon oborinskog događaja (Banacos i Schultz, 2004).

## 3. Rezultati i diskusija

Kao glavni parametar proučavanja dotoka vlage na arktičko područje u ovom radu se koriste vertikalno integriran tok (VIMF) i konvergencija vertikalno integriranog toka vlage (VIMFC) opisani u 2.5 i 2.6.

Prvo se razmatraju sezonski srednjaci i anomalije kompozita deset najjačih ENSO događaja iz razdoblja od 1950. do 2010., prvo za sezonu OND, zatim i JFM. Izračunati su kompoziti i klimatološka prostorna raspodjela za svaki pojedini mjesec tih dviju sezona.

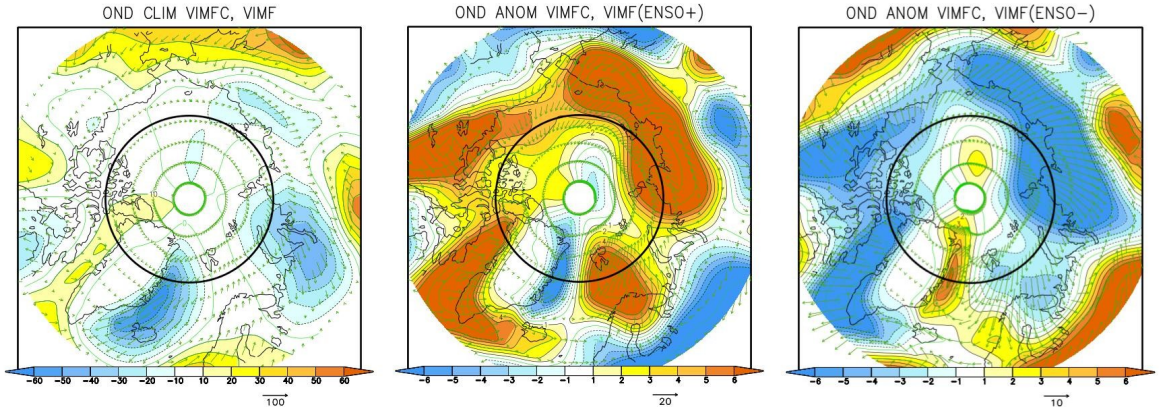
Na slikama 6-9 te 12 i 13 VIMF je prikazan strelicama, a prostorna raspodjela VIMFC-a konturama, konvergencija vlage označena je pozitivnim vrijednostima, a divergencija negativnim. Crna kružnica predstavlja paralelu koja prolazi 75° s.g.š. za koju je kasnije izračunat tok vlage kroz plohu na toj paraleli od 20° z.g.d. do 50° i.g.d. S ENSO+ označeni su kompoziti tople faze ENSO-a, a ENSO- označava kompozit hladne faze. Svaki red, s lijeva na desno, sastoji se od prikaza klimatološkog polja (CLIM) odnosno srednjeg polja za razdoblje od 1950. do 2010., kompozita anomalija (ANOM) za događaje ENSO+ i za događaje ENSO-.

### 3.1 Sezona OND

VIMF i VIMFC za sezonu OND su prikazani na slici 6 . Za tu sezonu odabrani su događaji dani u tablici 1.

Za sezonu OND raspodjela klimatološkog polja ima centar konvergencije vlage niže od 60° s.g.š. Slabija konvergencija se događa na sjeveru Sjeverne Amerike. Divergentni centri su izraženi sjevernije, istočno od Grenlanda i iznad sjeverne Rusije. Divergencija je maksimalna istočno od Grenlanda, manje od 60 kg $m^{-2}$ $s^{-1}$. Na kompozitu anomalije tople faze ENSO-a uočava se izražena konvergencija nad područjem geografskih širina viših od 60° s.g.š. Ukoliko se gleda konvergencija oko 75° s.g.š. (crna kružnica), ona je izražena duž cijele

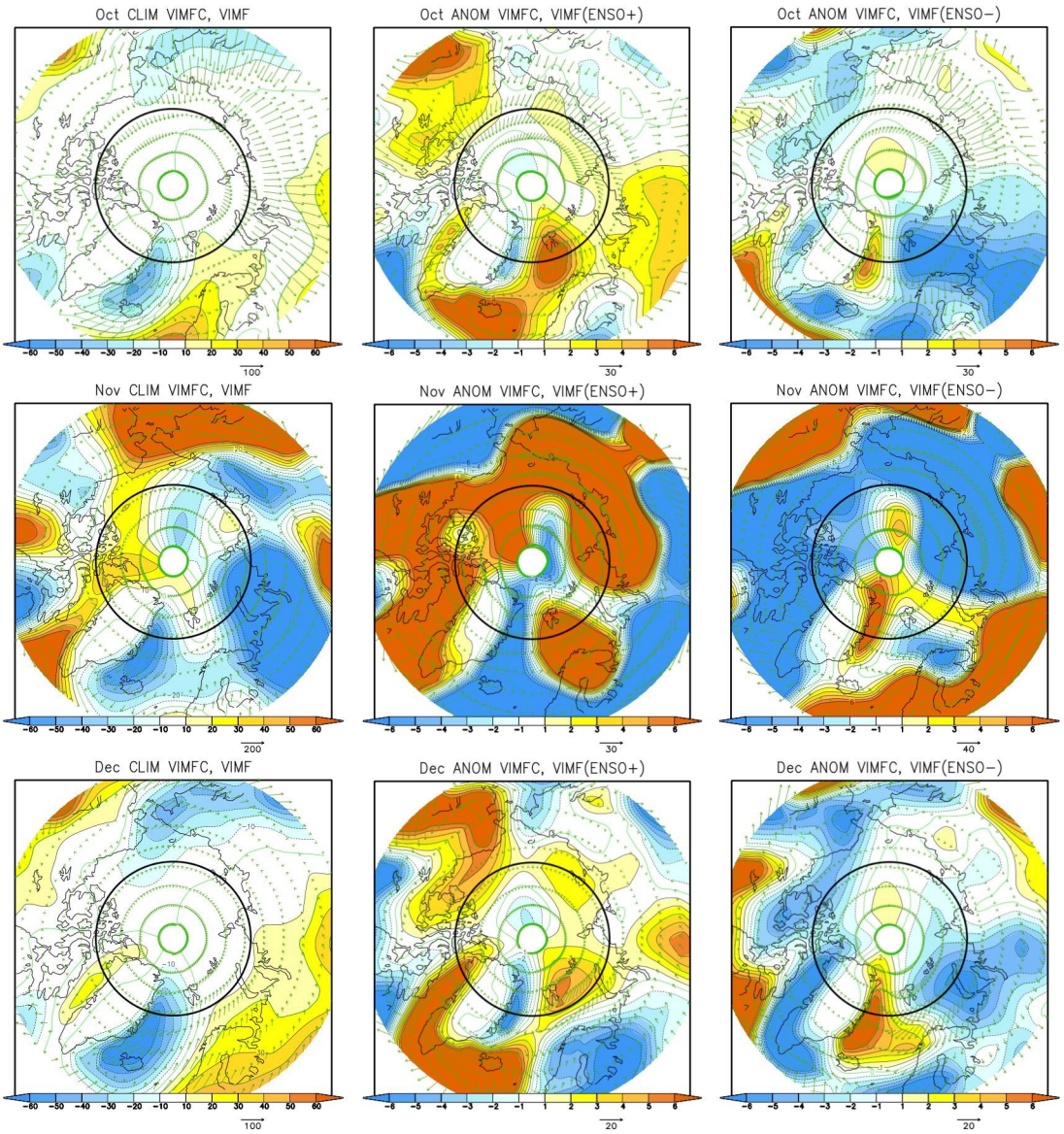
paralele osim uz istočnu obalu Grenlanda. Anomalija kompozita hladne faze ENSO-a uglavnom je negativna, odnosno dolazi do povećanja divergencije vlage u višim geografskim širinama, kao i duž paralele na 75° s.g.š. s iznimkom obalnog područja istočnog Grenlanda.




Slika 6. *VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$): klimatološko polje i kompoziti anomalija za sezonu OND. S lijeva na desno redom su dani klimatološko (CLIM) polje izračunato za razdoblje od 1950. do 2010., kompozit anomalije (ANOM) za toplu fazu (ENSO+) i kompozit anomalije tih veličina za hladnu faza (ENSO-). Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

Tijekom ENSO+ događaja povećava se dotok vlage na PNA područje. Povećan dotok vlage događa se i nad područjima u kojima je izražena divergencija u srednjoj raspodjeli, sjeverni Atlantik i Sibir. U hladnoj fazi ENSO-a povećava se dotok vlage duž istočne obale Grenlanda, dok je u ostalim dijelovima arktičkog područja smanjen dotok vlage. Na području NAE, signal tijekom hladne faze ENSO-a (tj. La Niñe) slabiji je nego što je to u toploj fazi ENSO-a (tj. El Niñu).

Slika 7 prikazuje mjesečnu analizu VIMFC-a i VIMF-a za sezonu OND, pozitivne vrijednosti označavaju područje nad kojim tok vlage konvergira, a negativne divergenciju toka vlage. Gledajući klimatološka polja, rezultati za mjesec studeni se dosta razlikuju od onih za listopad i prosinac. Naime, iako su klimatološke razdiobe za listopad i prosinac različite po intenzitetu, centri divergencije i konvergencije toka vlage su na sličnim područjima.




Slika 7. *VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$): klimatološko polje i kompoziti anomalija za pojedini mjesec sezone OND. Prvi red predstavlja razdiobe za listopad (Oct), drugi red studeni (Nov) i treći red za prosinac (Dec). U pojedinom redu prva slika predstavlja klimatološko polje, zatim kompozit anomalija za toplu i hladnu fazu. Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

U studenom je cirkulacija atmosfere takva da je konvergencija vlage prisutna na sjevernom Pacifiku veća nego u ostala dva mjeseca te sezone, konvergencija se događa i na arktičkom području sjeverne Amerike. Značajne razlike se opažaju i između kompozita anomalija u studenom i onih za ostala dva mjeseca te sezone,

posebno u intenzitetu. Zaključujemo da je pozadinsko strujanje različito u studenom od preostala dva mjeseca te sezone.

U sva tri mjeseca tijekom tople faze ENSO-a povećan je dotok vlage prema polu, ali je najizraženiji u studenom. Tijekom hladne faze ENSO-a smanjen je dotok vlage nad arktičkim područjem, odnosno anomalija toka vlage je negativna te najizraženija tijekom studenog. U obje faze ENSO-a iznimka je obalno područje istočnog Grenlanda.

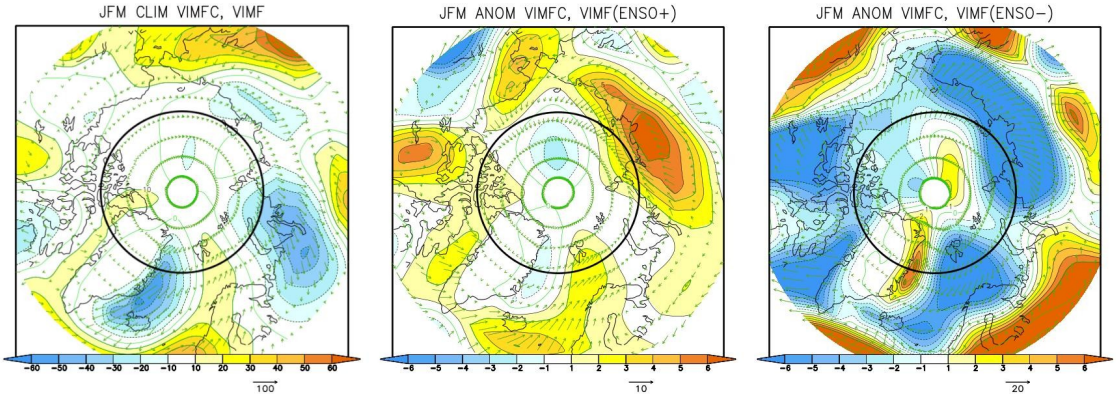
Promatranjem Atlantika i sjeverne Europe možemo uočiti različite položaje centara konvergencije ili divergencije po mjesecima. Tijekom tople faze ENSO-a, u listopadu su centri konvergencije južnije od Islanda i sjevernije od Skandinavskog poluotoka. U studenom područje oko Islanda pokazuje smanjen dotok vlage, a centar konvergiranja vlage je izražen nad sjevernim skandinavskim predjelima. Tijekom prosinca se ponovno javlja centar oko Islanda i sjevernije od Skandinavskog poluotoka. Za hladnu fazu ENSO-a u listopadu se smanjuje dotok vlage nad Arktik s područja sjevernog Atlantika. U studenom je na većem dijelu Arktika smanjen dotok vlage, ali se nad sjevernom Europom povećava dotok vlage. Tijekom prosinca nad većim dijelom Arktika je negativna anomalija dotoka vlage, jedino konvergentno područje je istočno od Grenlanda.

Za vrijeme tople faze događaja ENSO javlja se strujanje takvo da je pojačan dotok vlage tijekom OND sezone. Najveći dotok vlage, odnosno najveći porast vidljiv je tijekom studenog.

### 3.2 Sezona JFM

Za zimu, JFM (slika 8) gledajući srednjak sezone klimatološki izraženija je divergencija vlage istočno od Grenlanda i nad sjevernom Euroazijom, ali se u odnosu na prethodnu sezonu uočava konvergencija sjevernije od skandinavskog poluotoka. Anomalija toka vlage kompozita ENSO+ je uglavnom pozitivna,

sibirsko područje ima povećan dotok vlage sa sjevernog Atlantika, sjeverne Amerike i Pacifika, ali je konvergencija u sezoni JFM manja od one u sezoni OND. Za vrijeme hladne faze ENSO-a na polu je smanjen dotok vlage. U odnosu na sezonu OND, divergentni centar europskog područja Arktika većeg je intenziteta.

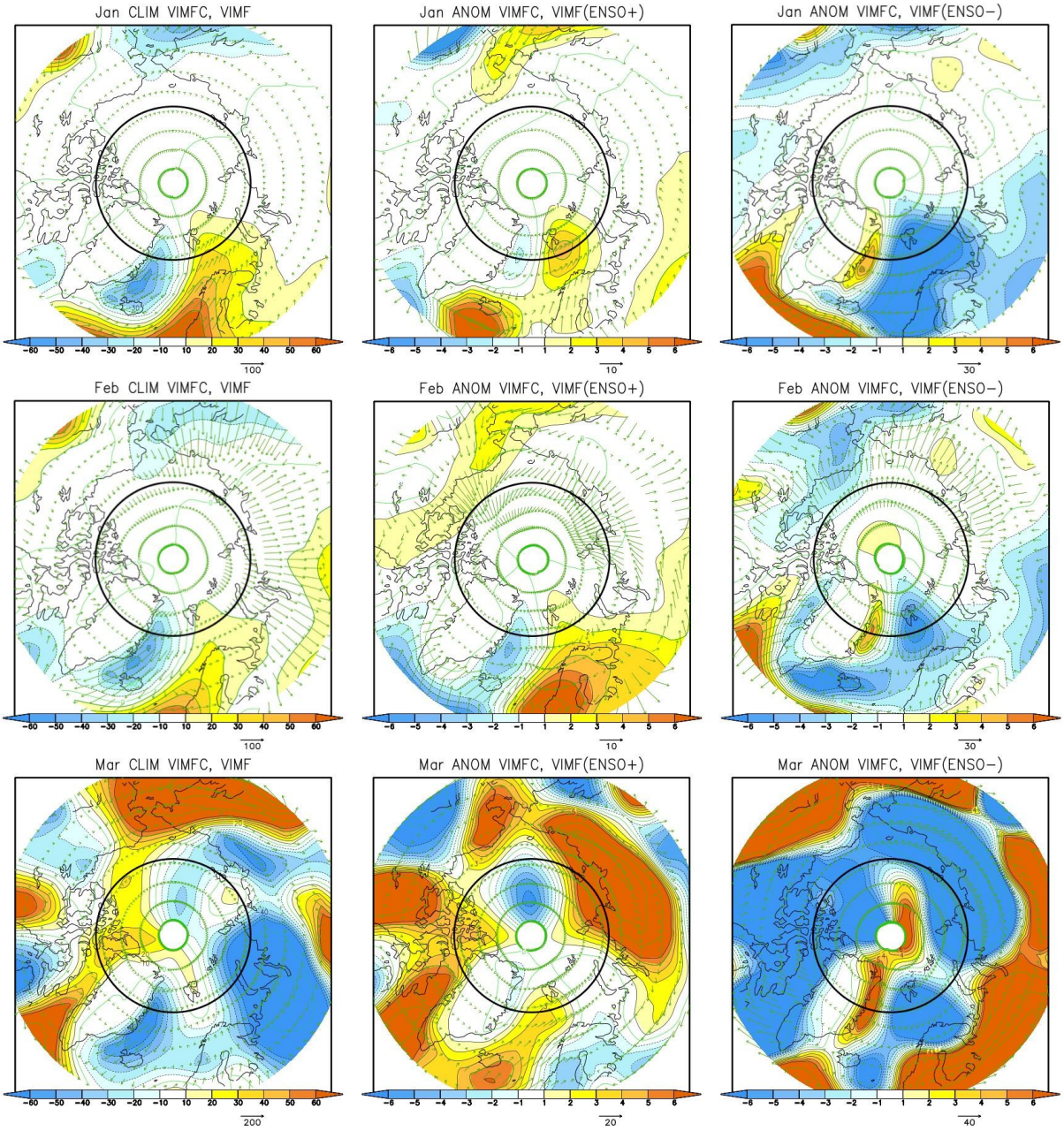



Slika 8. *VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$): klimatološko polje i kompoziti anomalija za sezonu JFM. S lijeva na desno redom je prikazano klimatološko (CLIM) polje izračunato za razdoblje od 1950. do 2010., kompozit anomalije (ANOM) za toplu fazu (ENSO+) i kompozit anomalija tih veličina za hladnu faza (ENSO-). Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

U usporedbi sa sezonom OND, klimatološke prostorne raspodjele vertikalno integriranog toka vlage kao i anomalna polja za oba kompozita su slična, a razlika je prvenstveno u iznosu anomalija. Konvergencija vlage veća je u sezoni OND za toplu fazu, iznosi iznad 6 kg $m^{-2}$ $s^{-1}$ u svim konvergentnim centrima, najviše do 9 kg $m^{-2}$ $s^{-1}$, a za sezonu JFM najviše do 6 kg $m^{-2}$ $s^{-1}$ i to u Sibirskom području. Divergencija vlage u hladnoj fazi ENSO-a ipak je izraženija u sezoni JFM na području sjevernog Atlantika i sjeverne Amerike u odnosi na sezonu OND, a na području Sibira je maksimum negativne anomalije za oba kompozita.

Pogledamo li rezultate za sezonu JFM prema mjesecima (slika 9) može se vidjeti da se raspodjela klimatološkog polja toka vlage kao i signal ENSO-a za ožujak izdvaja od prethodna dva u toj sezoni. Klimatološki gledano, tijekom siječnja i veljače dotok vlage na Arktik je s područja sjevernog Atlantika, uz veći

dotok vlage tijekom siječnja nego veljače. Prema raspodjeli klimatološkog polja za koje iznad sjevernog Pacifika uočavamo divergenciju vlage tijekom ta dva mjeseca.




Slika 9. *VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$): klimatološko polje i kompoziti anomalija za pojedini mjesec sezone JFM. Prvi red predstavlja razdiobe za siječanj (Jan), drugi red veljača (Feb) i treći red za ožujak (Mar). U pojedinom redu prva slika predstavlja klimatološko polje, zatim kompozit anomalije za toplu (ENSO+) i hladnu (ENSO-) fazu. Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

U ožujku se mijenja raspodjela klimatološkog polja, konvergencija vlage izražena je nad sjevernim Pacifikom i područjem Sjeverne Amerike. Nad Atlantikom i sjevernom Euroazijom smanjen je dotok vlage.

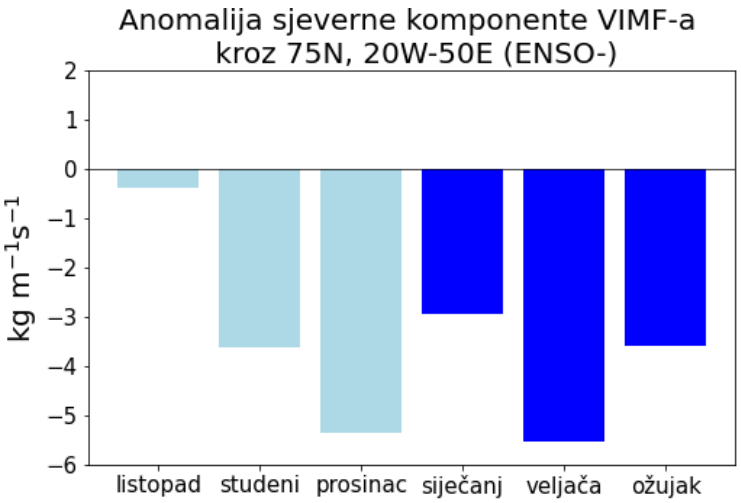
U siječnju dotok vlage nad Atlantikom raste u slučaju tople faze ENSO-a, a smanjuje se u hladnoj fazi. Prostorna razdioba anomalnih vrijednosti kompozita u veljači je slična onoj za siječanj. Tijekom ta dva mjeseca kompoziti anomalija VIMFC-a za toplu i hladnu faze ENSO-a su suprotnog polariteta, a sličnog uzorka. Izraženi su centri na NAE području. Ožujak se razlikuje u raspodjelama polja kompozita anomalija, anomalije su veće po iznosu u odnosu na siječanj i veljaču, ali i po uzorku. Tijekom tople faze ENSO događaja konvergencija vlage događa se i na PNA i NAE području, ali i u predjelima sjeverne Rusije. Kompozit hladne faze pokazuje značajnu divergenciju nad Arktikom u ožujku.

U siječnju i veljači prema klimatološkoj raspodjeli najveći dotok vlage na Arktik je na području NAE, u slučaju tople faze ENSO događaja najveće pozitivna anomalija je također na tom području. Hladna faza ENSO događaja dovodi do smanjenja vlage na većem dijelu Arktika. Unutar sezone JFM, odstupanje ožujka s prosotornom raspodjelom toka vlage ukazuje na različito pozadinsko strujanje u odnosu na prethodna dva mjeseca.

### 3.3 Meridionalna kompnenta VIMF-a

Jedan od pokazatelja dotoka vlage s Atlantika je meridionalna komponenta VIMF-a izračunata kao tok kroz vertikalnu plohu postavljenu na 75° s.g.š, od 20° z.g.d do 50° i.g.d.

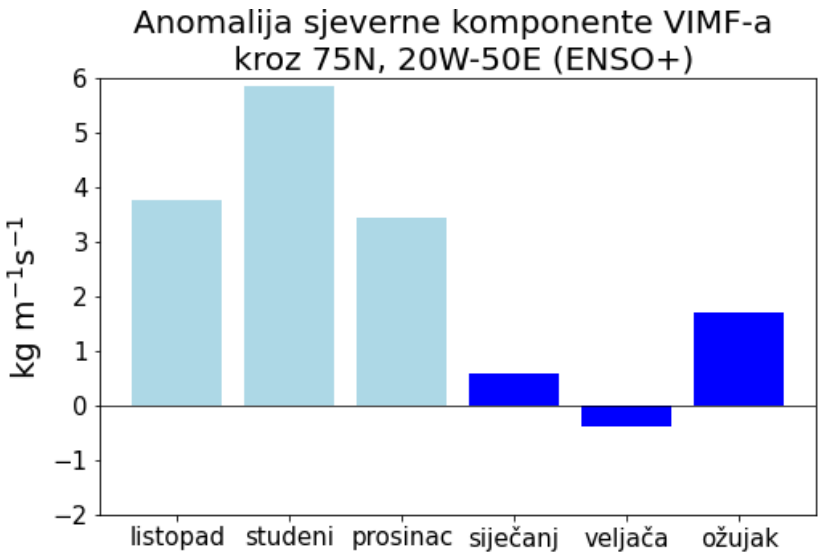
Na slici 10 je prikazana anomalija VIMF-a prema polu za kompozit negativne faze ENSO-a. Smanjen je dotok vlage za sve mjesece, maksimum je tijekom prosinca za sezonu OND i tijekom veljače za sezonu JFM.




Slika 10. *Mjesečne vrijednosti anomalija komponente VIMF-a u smjeru sjever-jug kroz plohu na 20° z.g.d do 50° i.g.d. na 75° s.g.š. za kompozit hladne faze ENSO-a (ENSO-) za razdoblje od 1950. do 2010. Svijetloplavo su označeni mjeseci OND sezone za koju je kompozit izračunat pomoću OND ENSO događaja, a plavom bojom mjeseci JFM izračunati za JFM ENSO događaje.*

Slika 11 prikazuje anomalije kompozita ENSO+ događaja tijekom sezone OND (svijetloplavi stupci) i sezone JFM (plavi stupci). Za razliku od vrijednosti dobivenih za hladne ENSO događaje slika (10), topla faza ENSO-a povezana je s pozitivnim anomalijama VIMF-a, osim za veljaču kada se javljaju male negativne vrijednosti. Najveća pozitivna anomalija dobivena je za mjesec studeni. Ovi rezultati ukazuju na suprotan učinak tople i hladne faze ENSO-a: tijekom hladne faze je integrirani meridionalni tok vlage značajno smanjen u razdoblju od studenog do ožujka, a tijekom tople faze je povećan od listopada do prosinca. Dakle, s obzirom da se uočava promjena dotoka vlage ovisno o fazi ENSO-a, moguć je utjecaj te pojave i na količinu leda na arktičkom području. Sezona OND

pokazuje puno veće povećanje toka vlage prema polu sa područja sjeverne Europe.



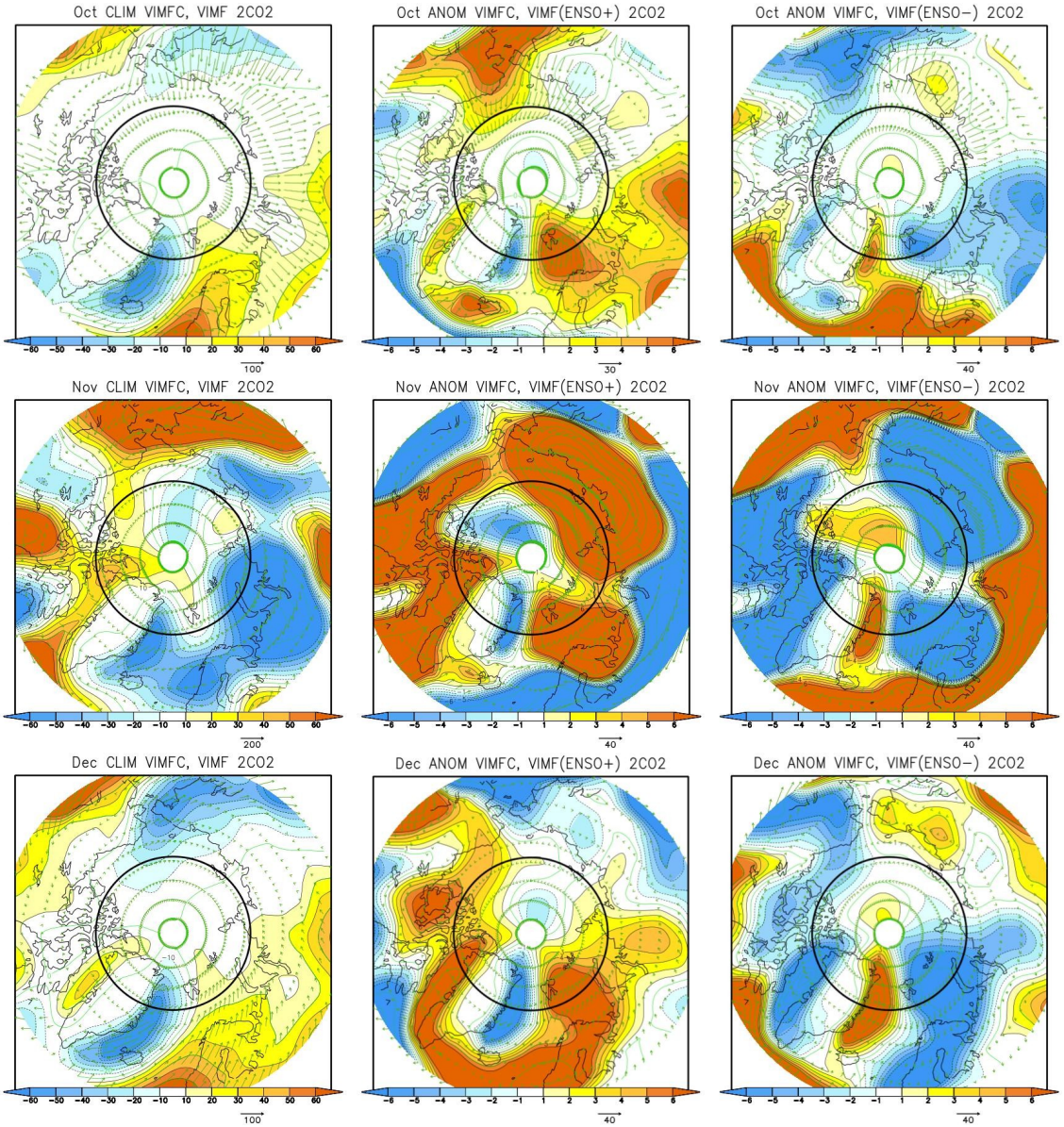

Slika 11. *Mjesečne vrijednosti anomalija komponente VIMF-a u smjeru sjever-jug kroz plohu na 20° z.g.d do 50° i.g.d. na 75° s.g.š. za kompozit tople faze ENSO-a (ENSO+) za razdoblje od 1950. do 2010. Svijetloplavo su označeni mjeseci OND sezone za koju je kompozit izračunat pomoću OND ENSO događaja, a plavom bojom mjeseci JFM izračunati za JFM ENSO događaje.*

### 3.4 Dotok vlage tijekom ENSO-a u toplijoj klimi

Do sada prikazani rezultati su ukazali na moguć utjecaj ENSO-a na dotok vlage nad područje Arktika, s čime je neizravno pokazan mogući utjecaj ENSO-a na međugodišnju varijabilnost leda nad tim područjem. S obzirom da je led vrlo važna komponenta klimatskog sustava, a očekuje se njegovo daljnje smanjivanje u budućoj (toplijoj) klimi, ovdje je utjecaj ENSO-a razmatran i za simulacije s udvostručenim CO2. U ovom eksperimentu je manje leda nego u Ctrl (sukladno odgovarajućem zatopljenju), ali također se mijenja i sam utjecaj ENSO-a na umjerene širine (Herceg Bulić i sur. 2011).

Sezona OND prikazana je na slici 12. Klimatološko polje za listopad pokazuje da se događa konvergencija vlage nad sjevernom Europom i europskim dijelom Arktika. Kada je uzeta anomalija za ENSO+ događaje dobije se povećanje dotoka vlage, odnosno kovergencija nad već klimatološki konvergentnim poljem što ukazuje na povećan dotok vlage. Rezultati za ENSO- ukazuju na suprotan učinak. Prostorna raspodjela anomalija je slična, ali su one suprotnog predznaka u odnosu na one za toplu fazu ENSO-a. U slučaju ENSO- faze, anomalno polje pokazuju u pozitivnu anomaliju nad Atlantikom između Islanda i Skandinavskog poluotoka, no sjevernije od 70° s.g.š. anomalno polje je divergentno. U usporedbi s istim mjesecom kontrolnog eksperimenta, u toplijoj je klimi dipol nad sjevernim Atlantikom jači, ali je prostorna raspodjela slična. Topla faza ENSO-a u toplijoj klimi rezultirala je većim dotokom vlage na području iznad 60° s.g.š., a povećanje dotoka vlage uočava se i u hladnoj fazi, ali samo do otprilike 70° s.g.š.

Klimatološko polje VIMFC-a za studeni ima značajno različitu raspodjelu u odnosu na onu za listopad., a iznosi VIMFC-a su bitno veći. Konvergentno je područje iznad Kanade, a divergentno iznad euroazijskog dijela Arktika. Što se polja anomalija tiče, ona su prostorno slična u ENSO+ anomalnom polju, konvergencija je izražena nad većim dijelom Arktika. Pojavljuje se i područje konvergencije vlage iznad skandinavskog poluotoka. U hladnoj fazi ENSO događaja prostorna raspodjela slična je anomaliji u Ctrl eksperimentu, ali su amplitude bitno veće.




Slika 12. *VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$): klimatološko polje i kompoziti anomalija za pojedini mjesec sezone OND u eksperimentu toplije klime (2CO2). Prvi red predstavlja razdiobe za listopad (Oct), drugi red studeni (Nov) i treći red za prosinac (Dec). U pojedinom redu prva slika predstavlja raspodjelu klimatološkog polja, zatim kompozit anomalije za toplu (ENSO+) i hladnu (ENSO-) fazu. Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

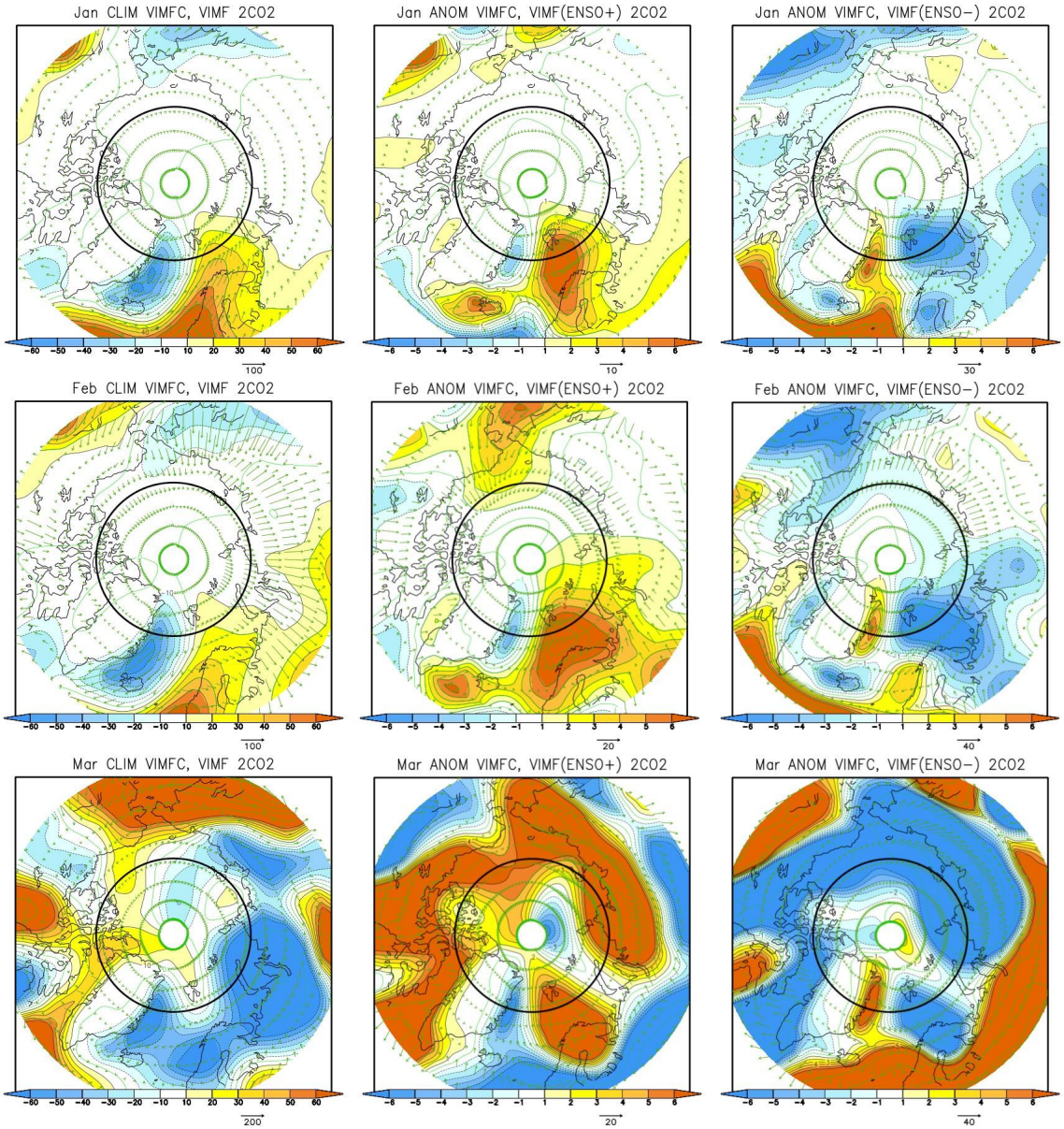
Prosinac pokazuje sličnosti klimatološkog polja s listopadom, siječnjem i veljačom. Ta su anomalna polja pojedine faze ENSO događaja slična u polaritetu, ali različita po iznosu. No dotok vlage s NAE područja u ovom mjesecu značajno

je veći u toplijoj klimi nego u kontrolnom eksperimentu tijekom El Niño događaja.

Dotok vlage u toplijoj klimi za zimu dan je na slici 13. U siječnju je klimatološka prostorna raspodjela slična u oba eksperimenta, ali je tijekom tople faze centar konvergencije iznad sjeverne Europe jači u ekperimentu $2\times CO_2$. Hladna faza pokazuje povećanje dotoka vlage nad srednjim Atlantikom, ali strujanje vlage ostaje pretežno divergentno nad Arktikom. Veća je negativna anomalija u kontrolnom eksperimentu nego u toplijoj klimi.

U veljači izraženi je dotok vlage nad Arktik iznad NAE područja, ali je izražena i divergencija za hladnu fazu ENSO događaja. Treći mjesec klimatski je sličan jedanaestom, dok je izraženija divergencija u toploj fazi.

Rezultati se slažu sa tim da povećanjem koncentracije $CO_2$ na području PNA raspodjela anomalija ostaje ista u daljinskoj vezi s ENSO-om. Na NAE području jači je odgovor na ENSO nego u kontrolnom eksperimentu (Herceg Bulić i sur., 2011).




Slika 13. *Razdioba VIMFC-a (kg $m^{-2}$ $s^{-1}$) i VIMF (kg $m^{-1}$ $s^{-1}$) i kompozita anomalija za pojedini mjesec JFM sezone u eksperimentu koji predstavlja topliju klimu (2CO2). Prvi red predstavlja razdiobe za siječanj (Jan), drugi red veljača (Feb) i treći red za ožujak (Mar). U pojedinom redu prva slika predstavlja raspodjelu klimatološkog polja, zatim kompozit anomalije za toplu (ENSO+) i hladnu (ENSO-) fazu. Crna kružnica predstavlja paralelu na 75° s.g.š.*

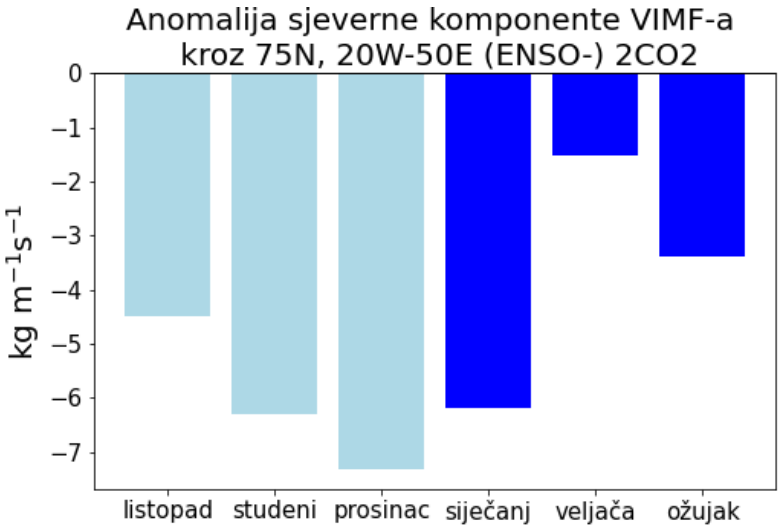
Odstupanje cirkulacije u studenom i ožujku jednako je izraženo u oba eksperimenta. To pokazuje različito pozadinsko strujanje tijekom sezone i opet

se nameće pitanje promatranja sezonskih srednjaka uz sezonu definiranu kao jesen i zima, tj . koji su mjeseci reprezentativni za određenu sezonu.

Sezonski srednjak sezone OND za anomaliju tijekom El Niño događaja pokazuje značajnu divergenciju nad većim dijelom Arktika, a suprotnog polariteta je signal povezan s La Niña događajima s razlikom u intenzitetu na području NAE. U toplijoj klimi je mjesečni kompozit anomalija sezone JFM za vrijeme ENSO+ je veći. Veća je konvergencija vlage nad područjem Arktika, i to iznad 75° s.g.š. za sva tri mjeseca. Hladni događaj ENSO-a u toplijoj klimi rezultira povećanom divergencijom vlage iznad arktičkog područja. U toplijoj klimi utjecaj ENSO događaja će biti jači. Značajnija konvergencija/divergencija tijekom El Niño/La Niña događaja što bi u slučaju tople faze ENSO događaja značilo više vlage nad Arktikom te pojačan efekt topljenja leda.

### 3.5 Meridionalna komponenta VIMF-a u toplijoj klimi

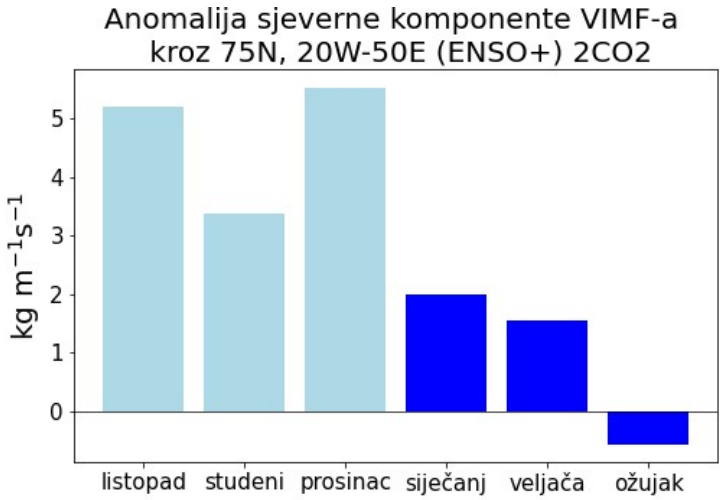
Meridionalna komponenta toka vlage kroz plohu postavljenu na 75° s.g.š, od 20° z.g.d do 50° i.g.d. izračunata je u slučaju toplije klime eksperimentom $2\times CO_2$. Na slici 14 i 15 prikazani su kompoziti anomalija za redom hladnu i toplu fazu.




Slika 14. *Mjesečne vrijednosti anomalija komponente VIMF-a u smjeru sjever-jug kroz plohu na 20° z.g.d do 50° i.g.d. na 75° s.g.š. za kompozit hladne faze ENSO-a (ENSO-) za razdoblje od 1950. do 2010. u toplijoj klimi (2CO2). Svijetloplavo su označeni mjeseci sezone OND za koju je kompozit izračunat pomoću OND ENSO događaja, a plavom bojom mjeseci JFM izračunati za JFM ENSO događaje.*

Tijekom hladne faze ENSO-a, dotok vlage nad Arktik je smanjen od listopada do ožujka. Maksimum za sezonu OND je tijekom prosinca, a za sezonu JFM tijekom siječnja. Usporedbom s kontrolnim eksperimentom vidljivo je da se u toplijoj klimi povećava negativna anomalija dotoka vlage s područja sjeverne Europe u svim mjesecima sezone OND te tijekom siječnja. Negativna anomalija dotoka vlage tijekom veljače smanjena je u toplijoj klimi, a u ožujku je približno ista.

U toploj fazi ENSO-a, dotok vlage kroz zadanu plohu je povećan od listopada do veljače, a tijekom ožujka je anomalija negativna. Kao i kod kontrolnog eksperimenta dotok vlage je veći tijekom sezone OND nego JFM. Uočeno je povećanje u siječnju i veljači, a smanjenje u ožujku u odnosu na sadašnju klimu.




Slika 15. *Mjesečne vrijednosti anomalija komponente VIMF-a u smjeru sjever-jug kroz plohu na 20° z.g.d do 50° i.g.d. na 75° s.g.š. za kompozit tople faze ENSO-a (ENSO+) za razdoblje od 1950. do 2010. u toplijoj klimi (2CO2). Svijetloplavo su označeni mjeseci sezone OND za koju je kompozit izračunat pomoću OND ENSO događaja, a plavom bojom mjeseci JFM izračunati za JFM ENSO događaje.*

Različit utjecaj suprotnih faza ENSO događaja na vertikalno integrirani meridionalni tok vlage vidljiv je i u slučaju toplije klime. Suprotno je i povećanje anomalija za dvije faze ENSO događaja u odnosu na kontrolni eksperiment.

## 4. Zaključak

Zabilježene su značajne promjene i trendovi u morskom ledu i površinskoj temperaturi Arktika što dodatno budi interes za proučavanje Arktičke amplifikacije. Arktička amplifikacija je fenomen bitno većeg zagrijavanja arktičkog područja u odnosu na tropsko područje i umjerene širine. Jedan od doprinosa smanjenju leda i ubrzanom povećanju temperature je povećano silazno dugovalno zračenje što može biti uzrokovano prodorima vlage s umjerenih širina. Numeričkim simulacijama modela SPEEDY i analizom po skupovima ENSO događaja za razdoblje od 1950. do 2010. godine izračunata je konvergencija vertikalno integriranog toka vlage na području sjevernije od 60° s.g.š. za jesen i zimu.

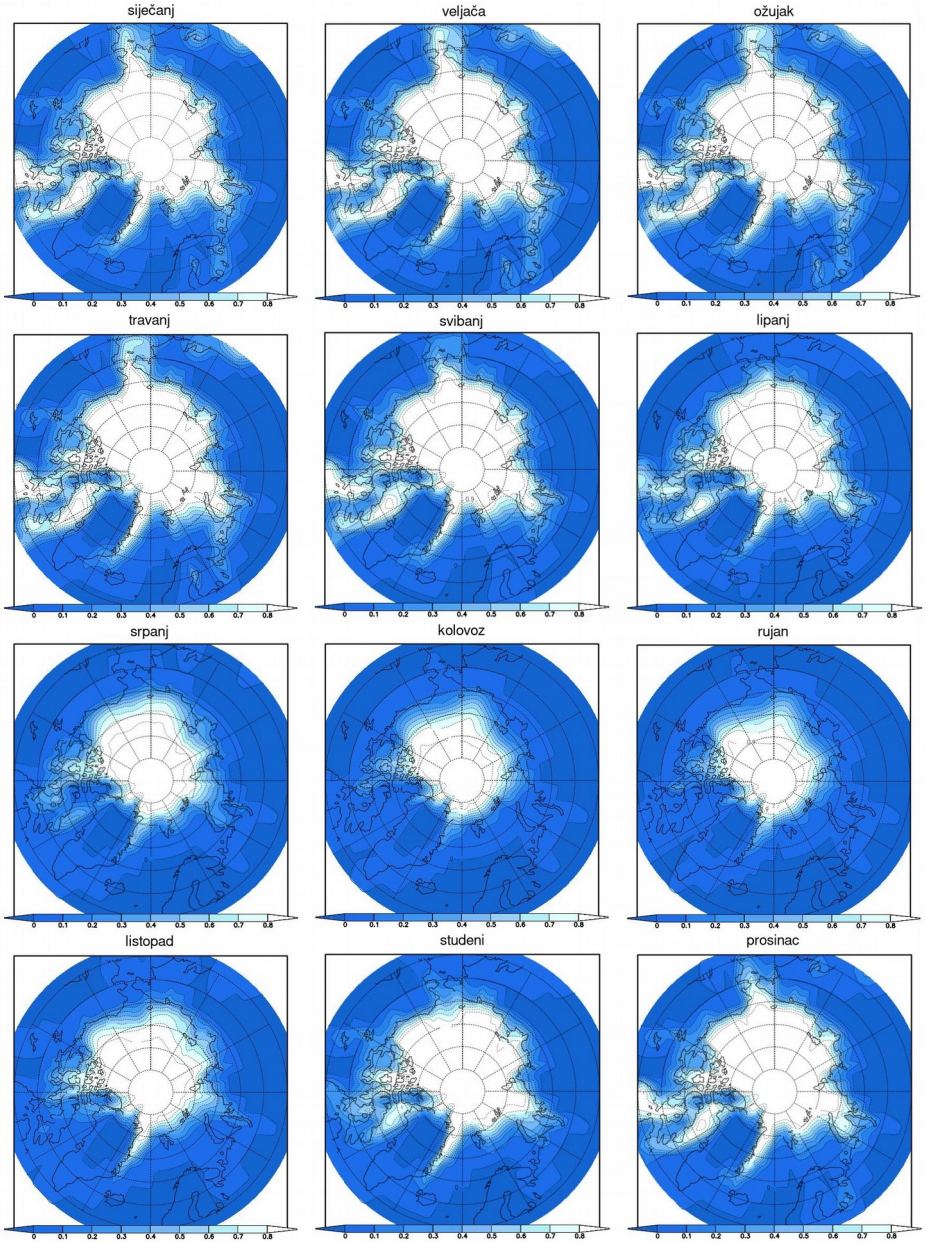
Topla faza ENSO događaja u sezoni OND i JFM povezana je sa strujanjem uz pojačan dotok vlage nad Arktikom, dok je suprotna faza ENSO događaja rezultirala pretežno divergencijom vlage na arktičkom području. Unutar pojedine sezone određeni mjesec odstupa cirkulacijskim oblikom i iznosom VIMF-a i VIMFC-a od preostala dva unutar sezone. Za sezonu OND to je studeni, a za JFM ožujak.

Rezultati eksperimenta u uvjetima toplije klime uspoređeni su s kontrolnim eksperimentom. U slaganju s prijašnjim rezultatima povećana je konvergencija (divergencija) u NAE području tijekom eksperimenta toplije klime u odnosu na kontrolni eksperiment za vrijeme El Niño (La Niña) događaja.

Proučavanjem meridionalne komponente VIMF-a suprotan učinak pojedine faze ENSO događaja dovodi do suprotnih efekata u toku vlage. Topla faza povećava meridonalni tok vlage, a hladna smanjuje. U slučaju toplije klime negativna anomalija dodatno se smanjuje, a pozitivna povećava.

## Dodatak A

Prostorna raspodjela leda dana je klimatološkim mjesečnim vrijednostima ukupnog udjela morskog leda (slika 16). To je pretpostavka SPEEDY-ja i ograničenje u proučavanju utjecaja prodora vlage na otapanje leda.




Slika 16. *S lijeva na desno redom je za pojedini mjesec u godini prikazan udio morskog leda u modelu SPEEDY, tijekom simulacija SPEEDY za pojedinu godinu uvijek uzima ovu klimatološku godišnju raspodjelu. (izvor: E. Kožul)*

**Dodatak B**

Arktik

Područje istraživanja ovog rada je Arktik, prikazan na slici 17. Različite su definicije za arktičko područje, jedna od definicija je da je to područje iznad arktičke kružnice kao paralele na aproksimativno 66° 34' s.g.š. koja je određena geografskom širinom gdje Sunce ne dolazi u ljetni i zimski solsticij. Arktičkim područjem se još smatra i ono gdje je zemlja zamrznuta i prekrivena s grmljem i lišajevima, odnosno gdje prosječna dnevna ljetna temperatura ne prelazi 10 °C (na slici 17 naznačeno je crvenom linijom).

Slika 17. *Prikazano je Arktičko područje, plava isprekidana linija je granica arktičkog kruga. Crvena linija je izoterma koja povezuje mjesta u kojima je srednja najviša dnevna temperatura u srpnju jednaka 10 °C. (izvor: https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/arctic.html 14. studenoga 2020.)*

## Literatura


Banacos, C. P., Schultz, D. M., (2004). The Use of Moisture Flux Convergence in Forecasting Convective Initiation: Historical and Operational Perspectives. Dostupno na: https://www.spc.noaa.gov/publications/banacos/mfc-waf.pdf [23.listopada 2020.]

Brönnimann, S., Xoplaki, E., Casty, C., Pauling, A., Luterbacher, J., (2007). ENSO influence on Europe during the last centuries, *Clim. Dyn.* 28: 181-197.

Cohen, J., Screen, J., Furtado, J., Barlow, M., Whittleston, D., Coumou, D., Francis, J., Dethloff, K., Entekhabi, D., Overland, J., Jones, J. (2014). Recent Arctic amplification and extreme mid-latitude weather. *Nature Geosci* **7,** 627–637

Francis, J. A., Hunter, E. (2006). New insight into the disappearing Arctic sea ice, *Eos Trans. AGU*, 87( 46), 509– 511

Gillett, N., Stone, D., Stott, P. Nozawa T., Karpechko A.Y., Hegerl G. C., Wehner M.F., Jones P. D. (2008). Attribution of polar warming to human influence. *Nature Geosci* **1,** 750–754

Graversen, R., Mauritsen, T., Tjernström, M., Källén, E., Svensson, G. (2008). Vertical structure of recent Arctic warming. *Nature* **451,** 53–56

Graversen, R.G., Wang, M. (2009). Polar amplification in a coupled climate model with locked albedo. *Clim Dyn* **33,** 629–643

Herceg Bulić, I., Branković, Č. (2007). ENSO forcing of the northern hemisphere climate in a large ensemble model simulations. *Clim Dyn* 28:231–254

Herceg Bulić, I., Branković, Č., Kucharski, F. (2011). Winter ENSO teleconnections in a warmer climate. *Clim Dyn*, 38, 1593-1613.

http://nsidc.org/arcticseaicenews/2020/09/arctic-sea-ice-decline-stalls-out-at-second-lowest-minimum [29. rujna 2020.]

http://nsidc.org/arcticseaicenews/files/1999/09/Min_14year_edited.png ,[29. rujna 2020.]

http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy_description/km_ver41_appendixA.pdf [14. srpnja 2020.]
https://nsidc.org/cryosphere/arctic-meteorology/arctic.html [14. studenoga 2020.]

https://psl.noaa.gov/gcos_wgsp/Timeseries/ [22. listopada 2020.]

https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.noaa.ersst.v3.html [20. listopada 2020.]

https://www.climate.gov/news-features/blogs/enso/why-are-there-so-many-enso-indexes-instead-just-one [22.listopada 2020.]

https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-variability-oceanic-ni%C3%B1o-index [4. kolovoza 2020.]

https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns [30. studenoga 2020.]

Inoue, J., Hori, M. E. (2011). Arctic cyclogenesis at the marginal ice zone: A contributory mechanism for the temperature amplification? *Geophys. Res. Lett.*, 38, L12502

King, M. P., Herceg-Bulić, I., Bladé, I., García-Serrano, J., Keenlyside, N., Kucharski, F., Li, C., Sobolowski S.(2018). Importance of Late Fall ENSO Teleconnection in the Euro-Atlantic Sector. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **99**, 1337–1343

Kucharski, F., Molteni, F., King, M. P., Farneti, R., Kang, I.-S., Feudale, L., (2013). On the need of intermediate complexity general circulation models: a “SPEEDY” example., *Bull. Amer. Meteor. Soc*. 94: 25-30.

Lee, S. (2014). A Theory for Polar Amplification from a General Circulation Perspective, *Asia-Pac. J. Atmos. Sci*., 50(1), 31-43, Springer

Lee, S., Gong, T., Feldstein, S. B., Screen, J. A., Simmonds, I. (2017). Revisiting the cause of the 1989–2009 Arctic surface warming using the surface energy budget: Downward infrared radiation dominates the surface fluxes. *Geophysical Research Letters*, 44, 10,654– 10,661

Park, H., Lee, S. , Son, S., Feldstein, S. B., Kosaka, Y. (2015). The Impact of Poleward Moisture and Sensible Heat Flux on Arctic Winter Sea Ice Variability. *J. Climate*, **28**, 5030–5040

Pithan, F., Mauritsen, T. (2014). Arctic amplification dominated by temperature feedbacks in contemporary climate models. *Nature Geosci* **7,** 181–184

Scaife, A. (2012). "Impact of ENSO on European Climate."

Screen, J. A., Deser, C., Simmonds, I. (2012). Local and remote controls on observed Arctic warming, *Geophys. Res. Lett.*, 39, L10709

Serreze, M. C. , Barry, R. G., (2011). Processes and impacts of Arctic amplification: a research synthesis. *Glob. Planet. Change* 77, 85–96

Shindell, D., Faluvegi, G. (2009). Climate response to regional radiative forcing during the twentieth century. *Nature Geosci*. 2, 294–300

Stroeve, J.C., Serreze, M.C., Holland, M.M., Kay, J. E., Malanik, J., Barrett, A.P. (2012). The Arctic's rapidly shrinking sea ice cover: a research synthesis. *Climatic Change* **110,** 1005–1027

Trenberth, K. E. (1997). The Definition of El Niño. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **78**, 2771–2778.

von Stroch, H., Zwiers, W. (1999). Statistical Analysis in Climate Research, Cambridge University Press, Cambridge, UK, 484-485.

Winton, M. (2006). Amplified Arctic climate change: What does surface albedo feedback have to do with it? *Geophys. Res. Lett.*, 33, L03701

Wood, K. R., Overland, J. E., Salo, S. A., Bond, N. A., Williams, W. J., Dong, X. (2013). Is there a “new normal” climate in the Beaufort Sea?, *Polar Research*, 32:1