

# Simulacije ljetne oborine modelom Speedy

---

Suk, Filip

Master's thesis / Diplomski rad

2024

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://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:954437>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-02**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb](#)



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

Filip Suk

Simulacije ljetne oborine modelom SPEEDY

Diplomski rad

Zagreb, 2024.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET  
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA  
SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGIJA

Filip Suk

Diplomski rad

**Simulacije ljetne oborine modelom  
SPEEDY**

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

Suvoditeljica diplomskog rada: dr. sc. Sara Ivasić

Zagreb, 2024.

Ovaj je rad napravljen u sklopu aktivnosti projekta „Klima i ekstremni vremenski uvjeti u prirodnom i urbanom okolišu Hrvatske – CroClimExtremes“ (HRZZ IP-2022-10-4144).

# Sažetak

El Niño – južna oscilacija (engl. *El Niño – Southern Oscillation*, ENSO) je naziv za mod međugodišnje varijabilnosti koja je povezana s promjenama u vjetrovima i površinskoj temperaturi mora u području tropskog Pacifika. Promjene u tropskoj konvekciji utječu na opću cirkulaciju atmosfere, a učinci ENSO-a mogu se pomoću mehanizma daljinskih veza prenijeti do udaljenih područja širom svijeta. Utjecaji u Pacifiku su temeljito istraženi, dok se utjecaji na Europu i sjeverni Atlantik još uvijek istražuju, a nedavna istraživanja pokazuju da je utjecaj ENSO-a na europsku klimu nestacionaran i sezonski varijabilan. Pomoću numeričkih simulacija oborine modelom SPEEDY za razdoblje 1855. – 2010., u ovom radu je istražen utjecaj različitih oceanskih bazena na oborinu područja NAE (engl. *North Atlantic-European*) i PNA (engl. *Pacific-North American*) u sezoni JAS (engl. *July-August-September*). Na temelju izračunatog indeksa Niño 3.4 u sezoni JAS, godine su razvrstane u ENSO godine i ne-ENSO godine. Anomalije oborine numeričkih simulacija korištene su za izračun polja signala oborine koja su prikazana u polarnoj stereografskoj projekciji za područje sjeverne hemisfere od 40°N do 90°N. Pronađeno je da tropski Atlantik ima najveći utjecaj na oborinu područja NAE kada se gledaju sve godine, no tijekom El Niño godina tropski Pacifik je oceanski bazen s najviše utjecaja. Na kraju, polja signala su usrednjena preko područja NAE i PNA, te su relativni odnosi različitih oceanskih bazena prikazani pomoću histograma. Najveći porast signala oborine uočen je za mjesec rujan tijekom El Niño godina u oba područja, dok u srpnju i kolovozu signal nije značajno uvećan.

**Ključne riječi:** ENSO, daljinske veze, oborina, simulacije modelom SPEEDY

# Simulations of summer precipitation with the SPEEDY model

## Abstract

El Niño – Southern Oscillation (ENSO) is the mode of interannual variability associated with the changes in winds and sea surface temperatures in the tropical Pacific region. Changes in tropical convection affect the general circulation of the atmosphere and the effects of ENSO can be transferred to distant regions of the world through the mechanism of teleconnections. The impacts in the Pacific have been thoroughly studied, while the impacts on Europe and the North Atlantic are still being investigated. Recent research indicates that ENSO's influence on European climate is non-stationary and varies by season. This study investigates the influence of different oceanic basins on precipitation in the North Atlantic-European (NAE) and Pacific North-American (PNA) regions during the July-August-September (JAS) season, by using the precipitation data from numerical simulations with the SPEEDY model for the period 1855-2010. The years were classified into ENSO years and non-ENSO years based on the calculated Niño 3.4 index in the JAS season. Precipitation anomalies of the numerical simulations were used to calculate precipitation signal fields, which were then displayed using polar stereographic projection for the Northern Hemisphere from 40°N to 90°N. When considering all years, it was found that the tropical Atlantic has the greatest impact on precipitation in the NAE region, but during El Niño years, the tropical Pacific is the oceanic basin with the greatest impact. Finally, the signal fields are averaged over the NAE and PNA regions, and the relative contributions of different oceanic basins are presented using histograms. The greatest increase in precipitation signal is observed in September during El Niño years in both regions, while in July and August the signal did not significantly increase.

**Keywords:** ENSO, teleconnections, precipitation, SPEEDY AGCM simulations

# Popis kratica

AGCM	model opće cirkulacije atmosfere (engl. <i>Atmospheric General Circulation Model</i> )
AMO	Atlantska multidekadska oscilacija (engl. <i>Atlantic Multidecadal Oscillation</i> )
DJF	prosinac-siječanj-veljača (engl. <i>December-January-February</i> )
EA	istočni Atlantik (engl. <i>East Atlantic</i> )
ENSO	El Niño – južna oscilacija (engl. <i>El Niño – Southern Oscillation</i> )
ERSST	engl. <i>Extended Reconstructed Sea Surface Temperature</i>
GH200	geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa
ICTP	Međunarodni centar za teorijsku fiziku (engl. <i>International Centre for Theoretical Physics</i> )
JAS	srpanj-kolovoz-rujan (engl. <i>July-August-September</i> )
JFM	siječanj-veljača-ožujak (engl. <i>January-February-March</i> )
MLD	dubina sloja miješanja (engl. <i>Mixed Layer Depth</i> )
NAE	sjeverni Atlantik-Europa (engl. <i>North Atlantic-European</i> )
NAO	Sjeverno-atlantska oscilacija (engl. <i>North Atlantic Oscillation</i> )
NOAA	Nacionalna administracija za oceane i atmosferu (engl. <i>National Oceanic and Atmospheric Administration</i> )
PNA	Pacifik-Sjeverna Amerika (engl. <i>Pacific-North American</i> )
SAD	Sjedinjene Američke Države
SO	Južna oscilacija (engl. <i>Southern Oscillation</i> )
SPEEDY	engl. <i>Simplified Parametrizations primitive-Equation Dynamics</i>
SSS	površinski salinitet mora (engl. <i>Sea Surface Salinity</i> )
SST	površinska temperatura mora (engl. <i>Sea Surface Temperature</i> )

## Sadržaj

<b>1. Uvod</b> .....	1
1.1 <i>El Niño – južna oscilacija (ENSO)</i> .....	1
1.2 <i>Atmosferski most</i> .....	4
1.3 <i>Dosadašnja istraživanja</i> .....	6
1.4 <i>Motivacija i cilj istraživanja</i> .....	12
<b>2. Podaci i metode</b> .....	13
2.1 <i>Geografska domena</i> .....	13
2.2 <i>Numerički model i simulacije</i> .....	14
2.3 <i>Određivanje Niño 3.4 indeksa</i> .....	15
2.4 <i>Analiza varijance signala</i> .....	16
<b>3. Rezultati i diskusija</b> .....	18
3.1 <i>Niño 3.4 indeks</i> .....	18
3.2 <i>Anomalije ukupne oborine za sezonu JAS</i> .....	19
3.3 <i>Polja signala oborine za sjevernu hemisferu</i> .....	25
3.4 <i>Histogrami signala oborine usrednjenog preko područja NAE i PNA</i> .....	41
<b>4. Zaključak</b> .....	48
<b>Literatura</b> .....	50

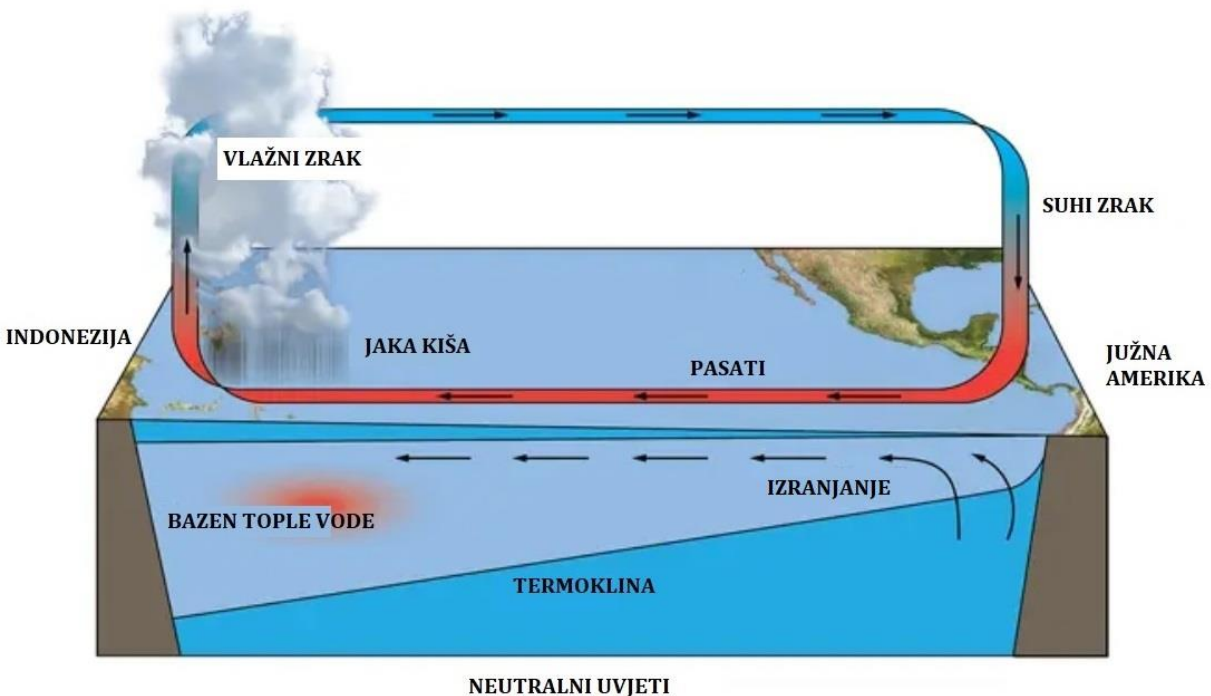


# 1. Uvod

## 1.1 *El Niño – južna oscilacija (ENSO)*

Južna oscilacija (engl. *Southern Oscillation*, SO) naziv je za međugodišnju fluktuaciju tropskog tlaka zraka na površini mora, između zapadne i istočne hemisfere, koju je prvi uočio i istraživao Sir Gilbert Walker u 20-im i 30-im godinama prošlog stoljeća. Berlage (1957, 1966) je zatim prepoznao vezu između SO-a i povremenih zagrijavanja temperature na površini mora (engl. *sea surface temperature*, SST) duž obale južnog Ekvadora i sjevernog Perua. Ta zagrijavanja mora su se obično javljala oko Božića i lokalno su bila poznata pod nazivom El Niño. Koristeći se podacima iz prijašnjih istraživanja, Bjerknes (1966, 1969) pruža dokaze da je dugoročna perzistencija klimatskih anomalija povezanih sa SO-om (Walker i Bliss, 1932) usko povezana sa sporim promjenama anomalija SST-a u ekvatorijalnom istočnom i središnjem Pacifiku. Bjerknes je prepoznao važnost međudjelovanja oceana i atmosfere nad istočnim tropskim Pacifikom, te je pretpostavio da je pozitivna sprega sustava ocean-atmosfera odgovorna za zagrijavanje površine mora u ekvatorijalnom istočnom i središnjem Pacifiku. Tijekom narednih godina oceanografi i meteorolozi zajedničkim snagama proširuju i dorađuju Bjerknesovu hipotezu na način da sistematski proučavaju El Niño i SO kao jedan fenomen koji nazivamo „El Niño – južna oscilacija“, ili skraćeno ENSO (Wang i Fiedler, 2006).

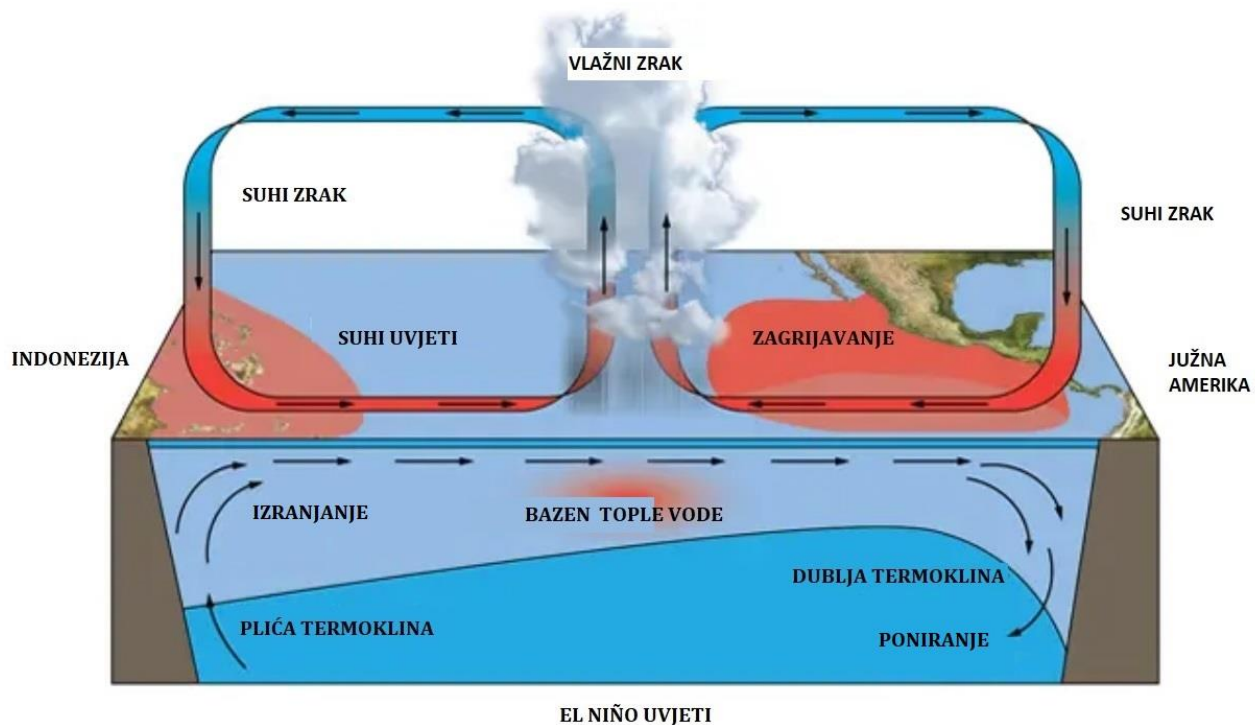
ENSO se očituje kao periodička izmjena faza sustava ocean-atmosfera u tropskom Pacifiku koja utječe na vremenske prilike širom svijeta. Događa se u prosjeku svakih nekoliko godina i obično traje oko godinu dana, te je povezana s poplavama, sušama i drugim poremećajima u atmosferi. Dok je El Niño poznat po neuobičajeno visokim temperaturama oceana u središnjem i istočnom dijelu ekvatorijalnog Pacifika, La Niña je poznata po neuobičajeno niskim temperaturama u tom području. Tijekom proljeća dolazi do nestajanja tih promjena u anomalijama SST-a i prema kraju ljeta El Niño ili La Niña događaj je završio (McGregor i Ebi, 2018). Faze El Niño i La Niña ne moraju slijediti jedna drugu, ponekad se nakon ENSO događaja javljaju neutralni uvjeti. Kada su uvjeti u tropskom Pacifiku neutralni, pasati pušu od istoka prema zapadu duž Pacifika i gomilaju toplu površinsku vodu u zapadnom dijelu Pacifika (slika 1.1). To uzrokuje da je razina mora oko Indonezije viša od razine mora oko Ekvadora te posljedično dolazi do izranjanja hladne oceanske vode uz obale tropskog istočnog Pacifika (Trenberth, 2016).



Slika 1.1 Neutralni uvjeti u tropskom Pacifiku. Izvor: URL1

Tijekom neutralnih godina, površina morske vode duž obale Perua i Ekvadora, te duž ekvatora, relativno je hladna zbog obalnog ekvatorijalnog izranjanja. Temperature rastu prema zapadnom tropskom Pacifiku gdje se stvara bazen tople morske vode i konvekcija u atmosferi je najintenzivnija. Zrak koji se podiže i temperaturni gradijent u smjeru istok-zapad na površini održavaju snažne pasate. Ti pasati guraju toplu površinsku vodu prema zapadnom Pacifiku i tako podržavaju oceansko izranjanje, a time i hlađenje istočnog Pacifika. Stoga, pozitivna povratna sprega održava ovu površinsku granu Walkerove cirkulacije, koju upotpunjuje obrnuta cirkulacija na višim nivoima: vlažni zrak koji se podiže nad zapadnim tropskim Pacifikom struji istočno duž ekvatora i ponire nad istočnim dijelom tropskog Pacifika. Posebno jaka intenzifikacija neutralnih uvjeta u tom području se naziva La Niña (Brönnimann, 2007).

Za vrijeme ENSO događaja dolazi do povećanja tlaka zraka nad Indonezijom i Australijom, te pada tlaka zraka nad središnjim i istočnim Pacifikom. Pasati u južnom Pacifiku slabe i okreću smjer prema istoku, te započinje širenje tople morske vode zapadnog Pacifika prema istoku. Zbog ovih promjena dolazi do velikih suša u zapadnom Pacifiku i velikih količina kiše u obično suhom istočnom Pacifiku (Trenberth, 2016). Ovi uvjeti su prikazani na slici 1.2.



Slika 1.2 El Niño uvjeti u tropskom Pacifiku. Izvor: URL1

Tijekom El Niña pasate slabe, oceansko izranjanje je potisnuto u istočnom dijelu tropskog Pacifika, a površinska temperatura mora se podiže i do 5 °C iznad uobičajene temperature. Kao rezultat, temperaturni gradijent se smanjuje i dodatno oslabljuje pasate. Konvektivna aktivnost se pomiče prema središnjem i istočnom dijelu tropskog Pacifika, te dolazi do promjene smjera Walkerove cirkulacije (Brönnimann, 2007).

Za vrijeme hladnih ili neutralnih uvjeta postoji snažan nagib termokline od istoka prema zapadu i odgovarajući gradijent površinske temperature mora (Marshall i Pumb, 2008). Hladna voda koja izranja raspodijeljena je po istočnom dijelu Pacifika, a topla voda po zapadnom. Konvekcija u atmosferi nad toplom površinom mora pokreće Walkerovu cirkulaciju, osnažujući pasate nad ekvatorijalnim oceanom. Tijekom El Niña, bazen tople vode se širi prema istoku, što je povezano sa spuštanjem nagiba termokline, i konvekcija u atmosferi se također širi prema istoku, mijenjajući obrazac atmosferske cirkulacije. Tlak zraka povećava se nad zapadom, a snižava se nad središtem Tihog oceana. Promjena Walkerove cirkulacije dovodi do slabljenja, ili u snažnom slučaju, potpunog kolapsa pasata, barem u zapadnom dijelu oceana.

U obalnim područjima Ekvadora i Perua obrasci SST-a su pod utjecajem prostorne strukture termokline koja odvaja toplu površinsku vodu od hladne vode u dubini.

Temperature su niže tamo gdje je termoklina plitka, a više tamo gdje je termoklina duboka. Vjetrovi koji pušu u tom obalnom području potiču oceansko izranjanje i tako termoklinu čine plićom. Dodatni faktor koji ima utjecaj na termoklinu je dinamički odziv tropskog Pacifika na promjene u vjetrovima. Kada tijekom El Niña pasati duž ekvatora oslabe, nagib termokline se smanjuje. Ova promjena je povezana s protokom tople površinske vode prema istoku, zbog kojeg se termoklina u zapadnom dijelu bazena podiže, dok u istočnom dijelu bazena dubina termokline raste (Philander, 1998). Jednom kada je El Niño potpuno razvijen, negativna povratna sprega počinje dominirati nad pozitivnom povratnom spregom smanjivanjem SST-a, i tako se događaj privodi kraju kroz nekoliko mjeseci. Kada na početku događaja istočni vjetrovi nad središnjim Pacifikom počinju slabjeti, to dovodi do stvaranja signala termokline izvan ekvatora koji je plići nego inače. Taj signal se širi zapadno, odbija se od zapadne granice Pacifika i putuje istočno. Nakon nekoliko mjeseci, zakašnjelo osciliranje termokline dolazi na istočnu granicu gdje termoklina postaje plića i tako završava topli događaj (Marshall i Pumb, 2008).

Utjecaji ENSO-a su najvidljiviji u ekvatorijalnom Pacifiku. Debeo sloj tople površinske vode u istočnom Pacifiku potiskuje izranjanje duboke hladne vode bogate nutrijentima. Manje nutrijenata u vodi znači manje fitoplanktona, što dovodi do gladi duž hranidbenog lanca i mnoge životinje sele u potrazi za boljim hranidbenim uvjetima. Iako El Niño ima najviše utjecaja na život u ekvatorijalnom Pacifiku, njegov utjecaj se širi i duž obala Amerike. Topla voda u istočnom i središnjem Pacifiku, kao i vlaga i energija koju predaje atmosferi, potiču nastajanje tropskih oluja i podržavaju njihov razvoj u uragane. Razvoj tropskih oluja također je potpomognut uobičajenim El Niño obrascima, koji obično imaju istu brzinu i smjer horizontalnog vjetra na površini, ali i na višim nivoima. Ovaj nedostatak razlike brzine vjetra po visini, odnosno nedostatak smicanja vjetra, omogućava olujama da predaju toplinu u visinu i nastave jačati. S druge strane, nad Atlantskim oceanom i Karijskim morem smicanje vjetra je veće i sprječava stvaranje uragana. Kako topli bazen morske vode putuje istočno u ekvatorijalnom Pacifiku, oblaci i kiša se pomiču za njime, i ostavljaju zapadni Pacifik u suhim uvjetima koji često dovode do suša širom Indonezije, jugoistočne Azije i sjeverne Australije. Iako se utjecaji El Niña najviše osjete u tropskom Pacifiku, reorganizacija oceanske topline, oblaka, kiše i vjetrova može utjecati na vremenske uvjete u drugim dijelovima svijeta, osobito u Sjevernoj i Južnoj Americi (Carlowicz i Schollaert-Uz, 2017).

## *1.2 Atmosferski most*

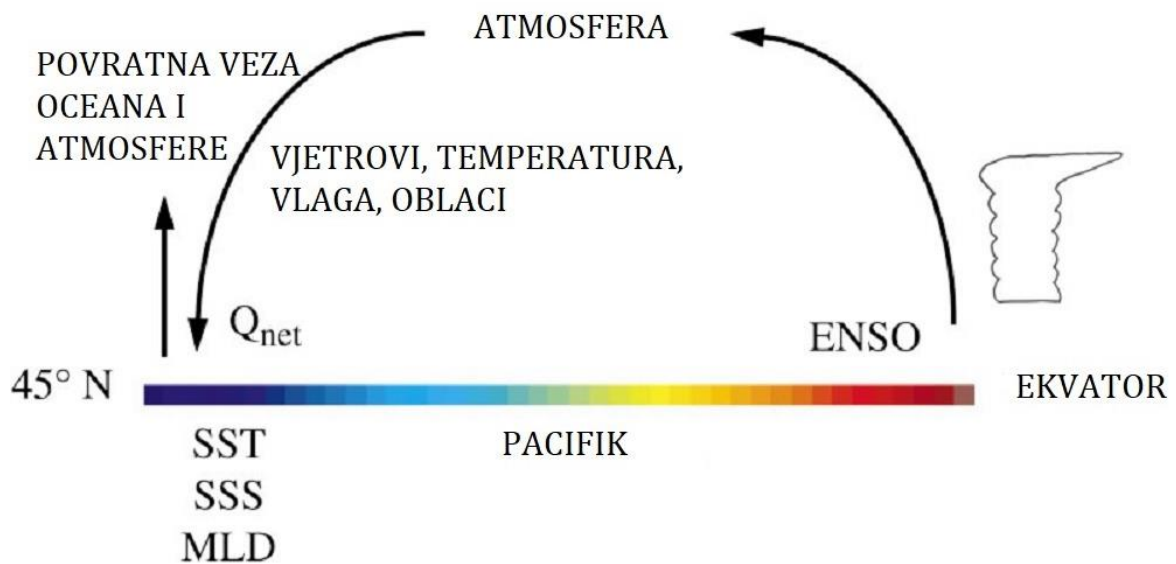
Odnosi između El Niño događaja i anomalija SST-a u tropskim oceanima i sjevernom Pacifiku su dobro poznati i često se povezuju s pojmom atmosferskog mosta. Atmosferski

most do sjevernog Pacifika razvija se zbog promjena u izvantropskoj grani Hadleyjeve cirkulacije, koja uključuje anomalnu konvergenciju i divergenciju u višim slojevima troposfere. El Niño može utjecati i na sjeverni atlantsko-europski sektor (engl. *North Atlantic-European*, NAE) kroz različite mehanizme, gdje ključnu ulogu imaju promjene u sjevernom Pacifiku, tropskom Atlantiku i stratosferi (Brönnimann, 2007).

Međudjelovanja atmosfere i oceana koja su odgovorna za ENSO odvijaju se u području ekvatorijalnog Pacifika, ali promjene tropske konvekcije povezane s ENSO-om utječu na globalnu atmosfersku cirkulaciju. Pod utjecajem ENSO-a pokreću se atmosferske daljinske veze na velikoj skali koje utječu na promjenu površinske temperature zraka, vlažnosti, vjetra i raspodjelu oblaka daleko od ekvatorijalnog Pacifika. Rezultantne varijacije u površinskoj toplini, količini gibanja i toku slatke vode mogu izazvati promjene SST-a, saliniteta, dubine sloja miješanja (engl. *Mixed Layer Depth*, MLD) i oceanskih struja. Stoga, atmosfera se ponaša kao most koji se proteže od ekvatorijalnog Pacifika do sjevernog Pacifika, južnog Pacifika, Atlantika ili Indijskog oceana, kao što je prikazano na slici 1.3. Anomalije SST-a vezane uz ENSO, koje se razvijaju u svjetskim oceanima, mogu podržavati izvorni odziv atmosfere na ENSO (Alexander i sur., 2002).

Na međugodišnjim skalama, utjecaj ENSO-a na Sjeverno-atlantsku oscilaciju (engl. *North Atlantic Oscillation*, NAO) opsežno je istražen, budući da je ENSO jedan od najvećih modova međugodišnje varijabilnosti. Uz to, ENSO utječe na globalnu klimu putem mehanizma atmosferskog mosta (Alexander i sur., 2002). Klimatski odziv na ENSO u sjevernom Pacifiku i području Sjeverne Amerike obilno je istraživani i poznata su njegova fizikalna i prostorna obilježja, dok je veza između ENSO-a i klimatske varijabilnosti nad područjem NAE i dalje nejasna. Pretpostavlja se da atmosfera nad sjevernim Pacifikom može poslužiti kao most koji povezuje dijabatičko grijanje vezano uz ENSO u tropskom Pacifiku s anomalijama cirkulacije nad sjevernim Atlantikom (Li i Lau, 2012). ENSO-forsirani sinoptički vrtlozi nad istočnim Pacifikom i Sjevernom Amerikom mogu upravljati meridionalnim širenjem sinoptičkih valnih paketa nad sjevernim Atlantikom, i tako dodatno podržati postojanje određene faze NAO-a.

## "ATMOSFERSKI MOST"



Slika 1.3 Shema atmosferskog mosta između tropa i sjevernog Pacifika.  $Q_{net}$  je neto tok topline na površini, SST je površinska temperatura mora, SSS površinski salinitet mora i MLD je dubina miješanog sloja. Izvor: Alexander i sur. (2002)

### 1.3 Dosadašnja istraživanja

Učinak ENSO-a na područje Pacifika i tropski pojas je temeljito istražen, dok se utjecaji na sjeverni Atlantik i Europu još uvijek istražuju. Istraživanja daljinskih veza ENSO-a tijekom 1980-ih često su pronalazila slab učinak nad Europom (van Loon i Madden, 1981; Ropelewski i Halpert, 1987). Međutim, kasnija istraživanja pronalaze dosljedan signal ENSO-a na europsku klimu koji je sezonalnog karaktera, nelinearan u odnosu na ENSO, pod utjecajem drugih faktora i nestacionaran u vremenu (Greatbatch i sur., 2004; Shaman, 2014; Martija-Díez i sur., 2021; Herceg-Bulić i sur., 2023). Brojna istraživanja pružaju dokaze za postojeći signal u polju temperature, tlaka na površini mora i oborine u kasnu zimu, te drugačiji signal u ranu zimu i proljeće (Brönnimann, 2007).

U istraživanju Herceg-Bulić i Kucharski (2011) analiziran je, na temelju osmotrenih i modeliranih podataka, utjecaj zimskih anomalija SST-a u tropskom Pacifiku na anomalije oborine u području NAE, tijekom razdoblja 1901. – 2002. Korelacijski uzorci ukazuju na to da je tropski Pacifik područje koje znatno utječe na varijabilnost proljetne oborine u području NAE. Varijabilnost SST-a u tropskom Pacifiku povezuju s fenomenom ENSO, stoga se utjecaj tropskog Pacifika na oborinu područja NAE može protumačiti daljinskim

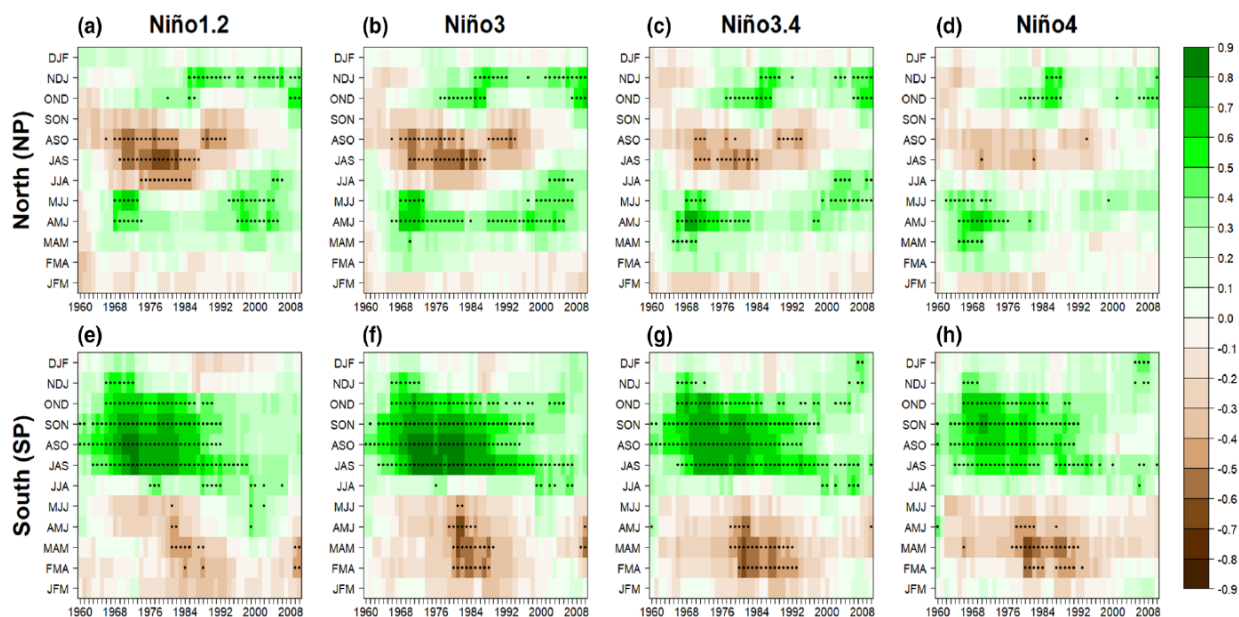
učinkom ENSO-a. Shaman (2014) otkriva da je utjecaj ENSO-a na europsku oborinu sezonalno i regionalno ovisan, te pronalazi sezonske daljinske veze tijekom proljeća i jeseni. Također, analizom osmotrenih podataka oborine ukazuje na to da ENSO utječe na oborinu zapadne Europe tijekom gotovo cijele godine. Ova veza sezonalno varira i u magnitudi anomalija oborine i u predznaku anomalija, te ukazuje na povezanost promjena oborine s promjenama u uvjetima gornje troposfere nad sjevernim Atlantikom i Europom. To je posebno vidljivo tijekom proljeća i jeseni, kada je ENSO povezan s dipolom anomalija vrtložnosti u izlaznoj regiji sjevernoatlantske mlazne struje duž europske obale. Te anomalije se projiciraju na površinu i utječu na kopnene vjetrove i tokove vlage, a sličan dipol suprotnog predznaka se javlja tijekom ljeta na sjevernoj hemisferi.

Na temelju simulacija oborine klimatskog modela, osmotrenih podataka i atmosferske reanalize, Herceg-Bulić i sur. (2017) istražuju vezu između zimskog utjecaja ENSO-a i europske klime u proljeće. Kroz cijelu dubinu troposfere pronađen je klimatski signal koji stiže do površine i ulazi u međudjelovanje s oceanom. Signal na taj način pomaže održati obrazac SST-a koji opstaje do sljedećeg proljeća i dovodi do promjena tlaka i vjetra nad sjevernim Atlantikom, što ima značajan utjecaj na oborinu. Nadalje, propagacija ENSO signala iz donje stratosfere u troposferu igra važnu ulogu u oblikovanju atmosferskog odziva nad sjevernim Atlantikom i Europom na forsiranje ENSO-om.

ENSO doseže svoj vrhunac u zimu na sjevernoj hemisferi i većina literature je usredotočena na to razdoblje, proljeće i jesen dobivaju malo pozornosti, a ljeto još i manje. Međutim, nedavno su se pojavila istraživanja koja pokazuju značajan utjecaj ENSO-a na ljetnu klimatsku varijabilnost. Nedavna istraživanja povezuju zimske anomalije SST-a u ekvatorijalnom Pacifiku s anomalijama oborine sljedećeg ljeta u Europi (Ionita i sur., 2012; Fuentes-Franco i Koenigk, 2020), dok su druga istraživanja usmjerena na međudjelovanje između ljetnih anomalija SST-a i odziva atmosfere u tom godišnjem dobu (Ding i sur., 2011; Martija-Díez i sur., 2021). Amplituda anomalija SST-a nad tropskim Pacifikom može utjecati na udaljena područja, a linearnost tog atmosferskog odgovora u odnosu na ENSO je i dalje upitna (King i sur., 2020).

Martija-Díez i sur. (2022) dobivaju visoke korelacije između podataka oborine i Niño indeksa za određena desetljeća, te sugeriraju da je veza između oborine u Europi i ENSO-a snažna tijekom ljeta. Izračunali su ukupne oborinske indekse za sjeverni i južni dio Europe, za tromjesečna razdoblja, počevši od JFM (engl. *January-February-March*) i završavajući s DJF (engl. *December-January-February*). Oborinske indekse su korelirali sa svim Niño indeksima koristeći 20-godišnji klizni srednjak (slika 1.4). Svrha njihovog izračuna bila je istražiti moguću sezonalnost i stacionarnost utjecaja ENSO-a na oborinu u Europi, a rezultati su pokazali značajne korelacije u proljeće i jesen. Međutim, ljeto, odnosno razdoblje JAS (engl. *July-August-September*), javlja se kao sezona s najviše utjecaja

ENSO-a, što je u slaganju s nedavnim istraživanjem koje je provedeno za temperaturu (Martija-Díez i sur., 2021).



Slika 1.4 Korelacije oborine 20-godišnjeg kliznog srednjaka u razdoblju 1950. – 2019. na (a-d) europskom sjeveru i (e-h) jugu, i Niño indeksa: (a, e) Niño 1.2, (b, f) Niño 3, (c, g) Niño 3.4 i (d, h) Niño 4. Izvor: Martija-Díez i sur. (2022)

Uz tropski Pacifik, i ostali oceani mogu utjecati na područje NAE. Utjecaji drugih oceanskih bazena mogu međudjelovati s utjecajem ENSO-a i utjecati na konačni učinak nad područjem NAE. Nedavno, Abid i sur. (2020) su pokazali da Indijski ocean ima značajan utjecaj na odgovor područja NAE na ENSO tijekom rane zime. Pored toga, Atlantik ima regionalan utjecaj na NAE, a može i aktivno doprinositi NAE-ENSO atmosferskom signalu. Anomalije SST-a koje su vezane uz ENSO stvaraju odgovor SST-a sjevernog Atlantika putem atmosferskog mosta, a taj obrazac SST-a pojačava atmosferski tok koji ga je prouzročio i time omogućuje mnogo stabilniji signal ENSO-a nad područjem NAE (Herceg-Bulić i sur., 2017).

ENSO također utječe na aktivnost ciklona u umjerenim geografskim širinama, jer su tijekom El Niña olujne staze sjevernog Pacifika pomaknute i istegnute istočno, gdje se spajaju s olujnim stazama sjevernog Atlantika (Li i Lau, 2012). Olujne staze igraju važnu ulogu u dinamici klime umjerenih geografskih širina. Sustavna promjena njihovog geografskog položaja ili razine olujne aktivnosti može dovesti do značajnih anomalija



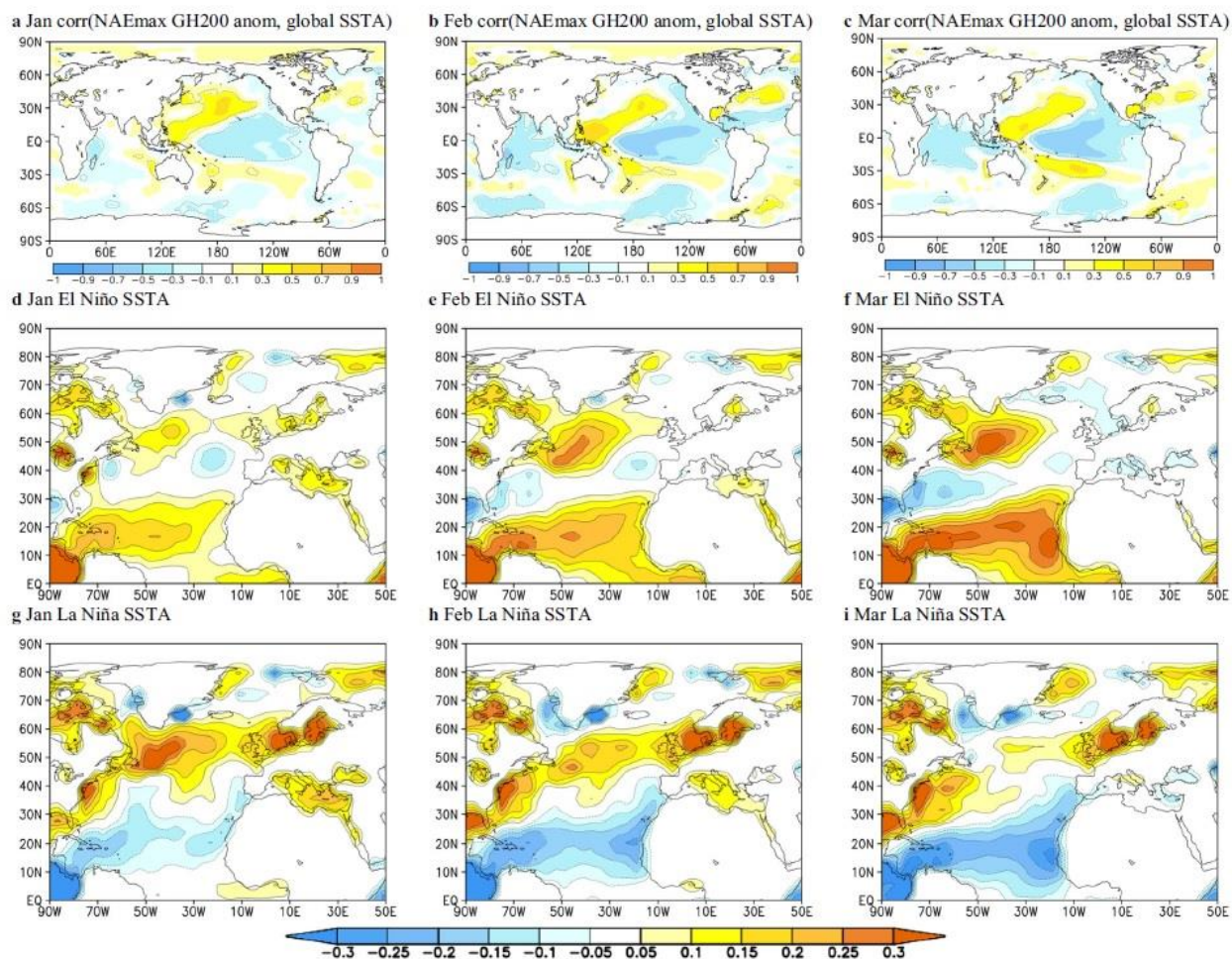
oborine, što će posljedično utjecati na regionalnu klimu (Chang i sur., 2002). Tijekom El Niño godina, anomalni južni vjetrovi prenose topli morski zrak preko sjeverozapadnog dijela Sjeverne Amerike, dok anomalni sjeverni vjetrovi donose hladniji kontinentalni zrak na jugoistok SAD-a. Pojačana olujna aktivnost duž promatrane staze donosi povećanu oborinu nad većim dijelom jugozapada SAD-a, ostavljajući sjeverozapadni dio anomalno suhim (Chapman i sur., 2021). Kroz interakciju s atmosferskom cirkulacijom velike skale, olujne staze znatno doprinose transportima količine gibanja, vlage i topline. Mnogi faktori utječu na intenzitet i položaj olujnih staza, a među njima je i raspodjela SST-a (Nakamura i sur., 2004).

Koristeći model opće cirkulacije atmosfere (engl. *Atmospheric General Circulation Model*, AGCM) srednje složenosti, Herceg-Bulić i sur. (2023) su osmislili skup eksperimenata s različito pridijeljenim anomalijama SST-a, koje predstavljaju izvor grijanja na donjoj granici. Rezultati eksperimenta u kojem su uključene globalne anomalije SST-a pokazuju da signal za područje NAE ima karakterističan centar djelovanja iznad sjevernog Atlantika. Maksimum u sjevernom Atlantiku raste jedino ako su u obzir uzete ENSO godine, međutim, signal s istim prostornim obrascem postoji i u ne-ENSO godinama, ali je slabije izražen. Štoviše, takav signal postoji i u eksperimentu bez ikakvog SST forsiranja i u eksperimentima bez dodanog SST forsiranja u tropskom Pacifiku, ali s puno slabijom amplitudom. Njihovi rezultati ukazuju na to da se atmosferski odziv područja NAE na forsiranje ENSO-om može promatrati slično kao što su Molteni i sur. (1993) predložili za odziv nad pacifičko-sjevernoameričkim područjem (engl. *Pacific-North American*, PNA) – kao manifestiranje kaotične izvantropske cirkulacije u obliku jednog od već postojećih vremenskih režima. Na taj se način signal ENSO-a nad područjem NAE projicira na istočnoatlantski (engl. *East Atlantic*, EA) obrazac, koji je u svojoj pozitivnoj fazi povezan s povećanom oborinom u sjevernoj Europi i smanjenom oborinom u južnoj Europi. Nadalje, promatrajući relativan omjer amplitude signala eksperimenata s različito dodijeljenim SST forsiranjima, Herceg-Bulić i sur. (2023) ukazuju na moguće postojanje procesa izvan tropskog Pacifika, koji amplificira signal. Dodatni AGCM eksperimenti u sjevernom Atlantiku ukazuju na to da izvantropski sjeverni Atlantik doprinosi tom procesu.

Iako je odziv atmosfere na SST forsiranje umjerenih geografskih širina slab, izvantropsko međudjelovanje zraka i mora može bitno utjecati na lokalnu varijabilnost atmosfere. Prethodna istraživanja (Herceg-Bulić i Kucharski, 2014; Herceg-Bulić i sur., 2017) pokazuju da izvantropski procesi koji povezuju atmosferu i more imaju ulogu na odgođeni utjecaj ENSO-a na područje NAE. Stoga, anomalije SST-a u sjevernom Atlantiku djeluju kao fizička veza između zimskog ENSO forsiranja i varijabilnosti atmosfere u sljedećem proljeću, te kao faktor koji doprinosi sezonalnoj perzistenciji NAO-a (Herceg-Bulić i Kucharski, 2014; Herceg-Bulić i sur., 2017). Osnovni fizikalni mehanizam ovdje

uključuje atmosferske anomalije koje služe kao atmosferski most putem kojeg se utjecaj anomalija SST-a, vezanih uz ENSO, prenosi sve do Atlantika umjerenih geografskih širina. Tamo stvaraju obrazac SST-a koji nastoji pojačati lokalnu cirkulaciju atmosfere, koja je prvotno pokrenula te anomalije (Kushnir i sur., 2002). Herceg-Bulić i sur. (2023) analizirali su tu dvosmjernu prirodu međudjelovanja atmosfere i oceana, te su pokazali da atmosferska cirkulacija vezana uz ENSO pobuđuje obrazac SST-a u sjevernom Atlantiku, a korelacije s geopotencijalnom visinom i kompoziti anomalija SST-a iz njihovog istraživanja prikazani su na slici 1.5. U izvantropskom sjevernom Atlantiku može se uočiti tripolno polje korelacija s najizraženijim pozitivnim anomalijama oko 40°N – 50°N. Također, iz kompozita anomalija jasno se vidi da odgovor SST-a na La Niña događaj nije simetričan u odnosu na El Niño. Iako u tropskom području imaju suprotne anomalije, izraženo područje pozitivnih anomalija južno od Grenlanda, koje se javlja tijekom El Niña, postoji i za vrijeme La Niñe. Pobuđeni obrazac SST-a u sjevernom Atlantiku dovodi do promjene meridionalnog gradijenta SST-a i lokalne površinske baroklinosti, koja u konačnici utječe na olujne staze (Nakamura i sur., 2004).

Martija-Díez i sur. (2022) ustanovili su da je utjecaj ENSO-a na Europu nestacionaran, a vodeći mod varijabilnosti europske oborine pokazuje dipolno ponašanje, odnosno ima suprotan utjecaj na sjevernu i južnu Europu. Rezultati njihovog istraživanja pokazuju jaku korelaciju oborine i Niño indeksa u razdoblju između 1960-ih i 1990-ih godina, a posebno je jaka korelacija s istočnim područjima tropskog Pacifika, odnosno za indekse Niño 1+2 i Niño 3.4. Prema korelacijskim predznacima, El Niño povezuju sa sušim (vlažnijim) uvjetima u sjevernoj (južnoj) Europi, dok za La Niñu vrijedi obratno. Jaču daljinsku vezu između El Niña i oborine u Europi tijekom spomenutog razdoblja objašnjavaju na dva načina. Prvi način je da topliji uvjeti u ekvatorijalnom Pacifiku pojačavaju dostupno dijabatičko grijanje za El Niño, a drugi način je prikladnija konfiguracija izvantropske mlazne struje koja podržava propagaciju anomalnih perturbacija povezanih s forsiranjem El Niñom i njegovim utjecajem na Europu. Dodatno, sugeriraju da ova nestacionarna veza između ENSO-a i ljetne oborine u Europi napreduje u fazi zajedno s Atlantskom multidekadskom oscilacijom (engl. *Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO), jer su značajan utjecaj ENSO-a na Europu uočili većinom tijekom negativne faze AMO-a. Tijekom desetljeća kada je AMO u negativnoj fazi, pojava ENSO-a povećava prognostičke sposobnosti za europsku i tropsku oborinu (Rodríguez-Fonseca i sur., 2016). S druge strane, tijekom razdoblja pozitivne faze AMO-a, utjecaj ENSO-a nad Atlantikom je gotovo zanemariv i ne može pridonijeti poboljšanju prognoze.



Slika 1.5: Korelacije globalnih NOAA anomalija SST-a i anomalija geopotencijalne visine na 200 hPa (GH200) koje su dobivene modelom SPEEDY za JFM, te su usrednjene nad područjem NAE za (a-c) sve ENSO godine; kompoziti anomalija SST-a za (d-f) El Niño godine i za (g-i) La Niña godine. Izvor: Herceg-Bulić i sur. (2023)

El Niño je povezan s poljem SST-a u izvantropskom sjevernom Atlantiku, koje izgladuje gradijent SST-a i tako smanjuje ciklonalnu aktivnost, te podržava pomak olujnih staza prema jugu. Iako relativno slab utjecaj izvantropskih SST-a nije od velike važnosti u usporedbi s jačim utjecajem tropskih SST-a, uočava se u mjerenjima i utječe na lokalne pojedinosti ENSO učinka na oborinu. Dodatno, odgovor SST-a sjevernog Atlantika na atmosfersko forsiranje, koje je vezano uz ENSO, nije simetričan za El Niño i La Niņu zbog različite amplifikacije, odnosno atenuacije signala. Stoga je moguće da sjeverni Atlantik doprinosi nelinearnosti atmosferskog odziva na događaje El Niño i La Niña (Herceg-Bulić i sur., 2023).

## *1.4 Motivacija i cilj istraživanja*

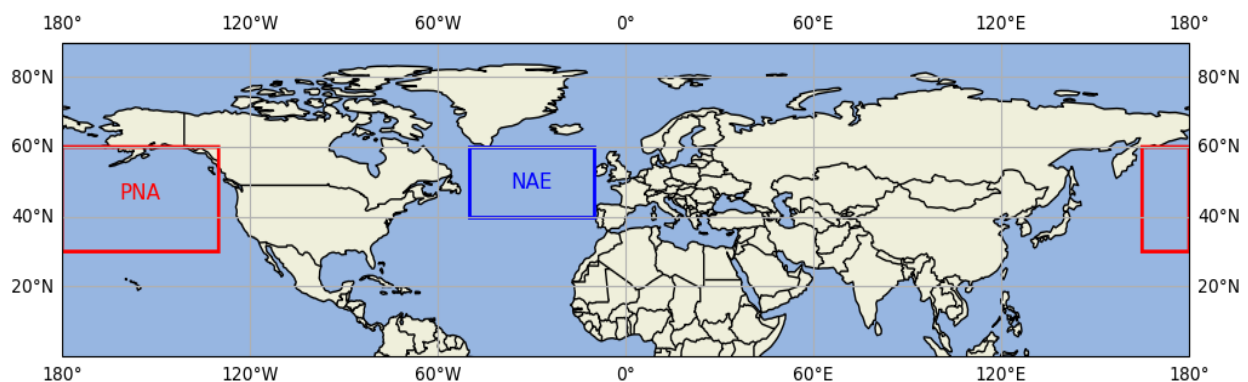
Istraživanje utjecaja ENSO-a na ljetne anomalije oborine u području NAE može biti korisno u smislu vremenske prediktabilnosti i primjene klimatskih modela. ENSO je jedan od najznačajnijih pokretača globalne klimatske varijabilnosti i njegovi utjecaji na oborinu su veoma složeni, te dopiru do raznih područja širom svijeta. Prošla istraživanja su pokazala da je utjecaj ENSO-a na europsku klimu nestacionaran i sezonski varijabilan, što znači da daljinske veze mogu varirati u jačini i načinu djelovanja ovisno o godišnjem dobu. Prema tome, svako istraživanje koje proučava sezonski utjecaj ENSO-a doprinosi razumijevanju ovih promjena, što je važno, jer se ta saznanja mogu dalje koristiti u svrhu preciznosti klimatskih modela i prognoza. Razumijevanje utjecaja ENSO-a na ljetne anomalije oborine u području NAE vrlo je bitno kako bi se proširilo dosadašnje znanje o ovoj daljinskoj vezi i vremenskim uvjetima nad sjevernim Atlantikom. Poznato je da ENSO utječe na pomak olujnih staza i uzrokuje promjene u njihovoj konfiguraciji, što dovodi do povećanja ili smanjenja oborine nad područjem NAE. U istraživanju Martija-Díez i sur. (2022) ispitana je stacionarnost daljinskih veza ENSO-a s ljetnom oborinom u Europi, te je otkriveno da se jačina i priroda ovih daljinskih veza mogu mijenjati s vremenom i na taj način utjecati na prediktabilnost. Dodatno, u istraživanju Herceg-Bulić i sur. (2023) naglašava se važnost utjecaja tropskih SST-a na klimatske signale iznad područja NAE tijekom kasne zime, čime se ukazuje na složeno međudjelovanje unutar klimatskog sustava između tropskih i izvan-tropskih područja koje se može širiti i na druga razdoblja.

Budući da utjecaj ENSO-a na Europu još uvijek nije dovoljno istražen, i s obzirom da je općenito vrlo malo istraživanja provedeno za ljetne mjesece, javlja se motivacija za istraživanjem ljetnog utjecaja kako bi se upotpunila slika djelovanja ENSO-a kroz sva godišnja doba. Cilj ovog rada je pomoću simuliranih podataka oborine analizirati i objasniti utjecaj ENSO-a na oborinu sjeverne hemisfere u ljetnim mjesecima, utjecaj ENSO-a na regionalnu klimatsku varijabilnost, te doprinijeti potpunijem razumijevanju ovih daljinskih veza.

## 2. Podaci i metode

### 2.1 Geografska domena

Analiza podataka u ovom radu posebno je usredotočena na dva oceanska područja, to su područja NAE (40°N – 60°N, 50°W – 10°W) i PNA (30°N – 60°N, 165°E – 130°W). Područje NAE obuhvaća sjeverni dio Atlantika te je područje od velike važnosti za vrijeme i klimu Europe zbog složenih međudjelovanja atmosfere i oceana. Jedan od glavnih meteoroloških fenomena koji se događa na ovom području je NAO, mod varijabilnosti atmosferskog tlaka između Islandske ciklone i Azorske anticiklone. Promjene u fazama NAO-a značajno utječu na olujne staze, obrasce oborine i anomalije temperature širom područja NAE (URL2). ENSO također može imati važan utjecaj na NAE jer međudjelovanje ENSO-a i NAO-a može utjecati na klimatske anomalije koje su primijećene u ovom području (Zhang i sur., 2019). Područje PNA obuhvaća središnji i istočni Pacifik, a značajan mod atmosferske varijabilnosti ovog područja je PNA obrazac, koji je povezan s aleujskom ciklogenezom i tako utječe na vremenske prilike širom SAD-a (URL3). ENSO i ovdje ima značajnu ulogu u upravljanju regionalnom atmosferskom cirkulacijom, jer je tijekom El Niña pojačana konvektivna aktivnost u središnjem i istočnom tropskom Pacifiku, što vodi do pobuđivanja Rossbyjevih valova koji se šire istočno i prema polu (Domeisen i sur., 2018; Lopez i Kirtman, 2018). Granice područja NAE i PNA označene su na slici 2.1.



Slika 2.1 Područja istraživanja na karti sjeverne hemisfere: NAE (plavo) i PNA (crveno)

## 2.2 Numerički model i simulacije

Numerički model korišten u ovom radu je AGCM Međunarodnog centra za teorijsku fiziku (ICTP; engl. *International Centre for Theoretical Physics*) naziva SPEEDY (engl. *Simplified Parametrizations primitive-Equation DYNamics*). SPEEDY je AGCM srednje složenosti koji je računski isplativ zbog svojih pojednostavljenja u parametrizacijama te relativno niske horizontalne i vertikalne rezolucije. Horizontalna rezolucija odgovara trokutastom odsijecanju spektralnih polja na valnom broju 30 (T30), a prema vrijednostima tlaka model razlikuje osam vertikalnih nivoa. Bez obzira na rezoluciju, kada se gleda izvanropski odziv velike skale na forsiranje SST-om, simulacije modelom SPEEDY usporedive su sa simulacijama mnogo složenijih modela. Model koristi  $\sigma$ -koordinatu, parametrizacijske sheme za konvekciju, kondenzaciju velike skale, kratkovalno i dugovalno zračenje, te površinske tokove topline, vlage i količine gibanja (Kucharski i sur. 2013). Brojna istraživanja potvrđuju sposobnost ovog AGCM-a da uspješno simulira glavne karakteristike daljinskih veza s izvanropskim područjem tijekom različitih sezona (Kucharski i sur., 2006; Herceg-Bulić i sur., 2017; Di Carlo i sur., 2022). Nedavno su Abid i sur. (2020) pokazali da bi se SPEEDY mogao koristiti za proučavanje vremenskih uvjeta unutar jedne sezone, a Di Carlo i sur. (2022) su ga već koristili za ispitivanje osjetljivosti daljinskih veza ENSO-a nad područjem PNA.

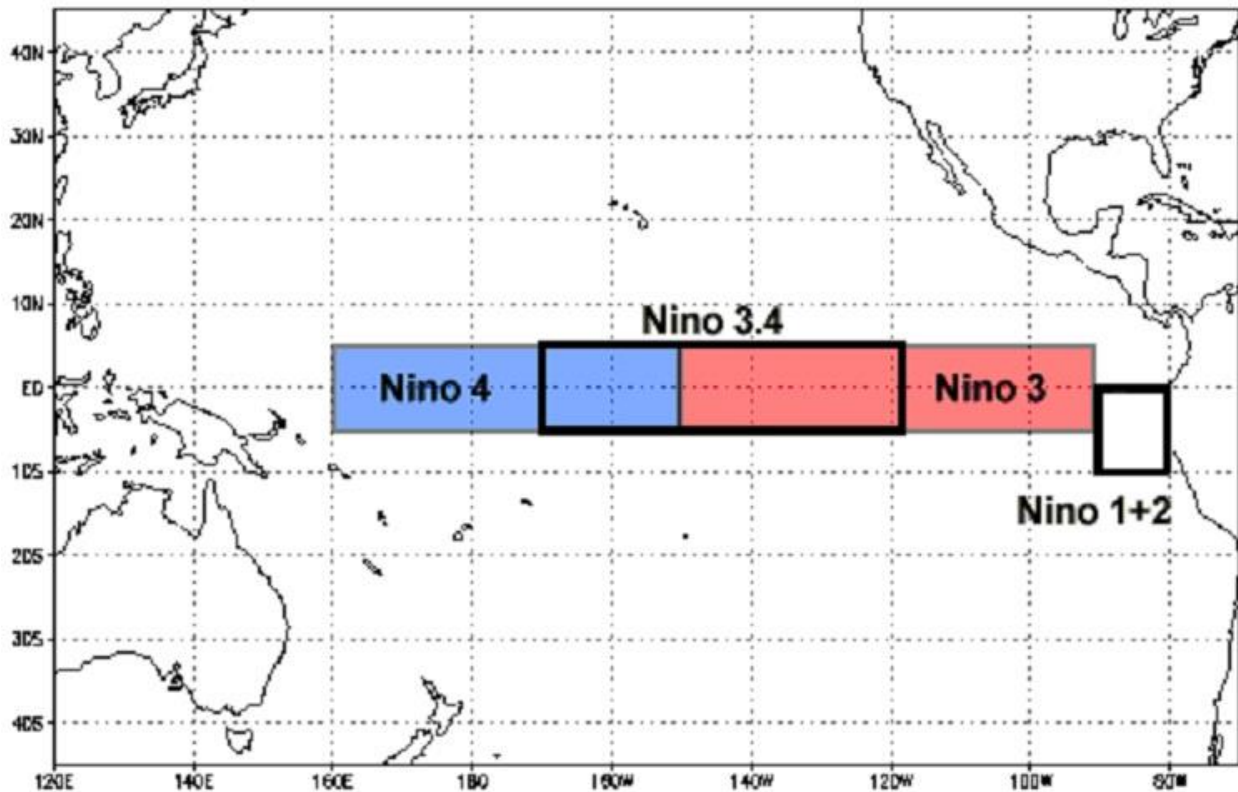
Za potrebe ovog rada korišteni su podaci simulacija konvektivne oborine i stratiformne oborine za osam različitih eksperimenata, koji se razlikuju samo u forsiranju SST-om na donjoj granici. Forsiranje SST-om je ograničeno na određena oceanska područja, dok ostali dijelovi oceana sadrže samo klimatološke vrijednosti SST-a. *Glob* je eksperiment forsiran anomalijama SST-a koje su primijenjene globalno ( $90^{\circ}\text{S} - 90^{\circ}\text{N}$ ,  $0^{\circ} - 360^{\circ}\text{E}$ ), dok eksperiment *Tropics* ima propisano forsiranje samo u tropskoj zoni ( $30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}$ ,  $0^{\circ} - 360^{\circ}\text{E}$ ). U eksperimentu *TroAtl* simulacije su forsirane anomalijama SST-a u tropskom Atlantiku ( $30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}$ ,  $100^{\circ}\text{W} - 20^{\circ}\text{E}$ ), eksperiment *TroInd* ima propisano forsiranje samo u tropskom Indijskom oceanu ( $30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}$ ,  $30^{\circ}\text{E} - 120^{\circ}\text{E}$ ), dok se u eksperimentu *TroPac* anomalije SST-a primjenjuju samo u tropskom Pacifiku ( $30^{\circ}\text{S} - 30^{\circ}\text{N}$ ,  $120^{\circ}\text{E} - 60^{\circ}\text{W}$ ). U eksperimentu *NAtl* forsiranje je ograničeno samo na područje sjevernog Atlantika ( $30^{\circ}\text{N} - 70^{\circ}\text{N}$ ,  $80^{\circ}\text{W} - 10^{\circ}\text{E}$ ), a njemu suprotan eksperiment *NoNAtl* ima forsiranje svugdje osim u sjevernom Atlantiku. Također je analiziran i eksperiment *Clim*, koji nema nikakvo forsiranje SST-om već sadrži samo klimatološke vrijednosti SST-a. Eksperimenti *NAtl* i *NoNAtl* su korišteni kako bi se mogao analizirati odvojeni utjecaj izvanropskog sjevernog Atlantika, a eksperiment *Clim* može se shvatiti kao numerički ostatak koji je povezan s unutarnjom varijabilnošću atmosfere. Ovakvim eksperimentalnim postavom je omogućeno da se utjecaji oceanskih bazena razdvoje i zasebno pogledaju, te da se procijeni koliko svaki od njih doprinosi ukupnom signalu (Herceg-Bulić i sur., 2023).



### 2.3 Određivanje Niño 3.4 indeksa

Zbog toga što je fenomen ENSO povezan s međudjelovanjem sustava ocean-atmosfera, logičan parametar za praćenje njegova ponašanja je praćenje površinske temperature mora, što je inicijalno prepoznao Bjerknes (1969) i što su kasnije potpuno istražili Rasmusson i Carpenter (1982). Četiri glavna oceanska indeksa na temelju anomalija SST-a korištena su u područjima duž ekvatora, a nazvani su prema brodskim rutama Niño 1, 2, 3 i 4. Nakon istraživanja varijabilnosti SST-a koja je povezana s ENSO događajima, Niño 1 i 2 su združeni u jedan indeks Niño 1+2 i dodan je indeks Niño 3.4 između područja Niño 3 i 4 (McGregor i Ebi, 2018). Pregled područja i indeksa koje označavaju nalazi se na slici 2.2.

Kako bi se godine mogle kategorizirati u one koje su imale izraženi ENSO događaj i one koje ga nisu imale, najčešće se koristi indeks Niño 3.4 koji pokriva središnje područje ekvatorijalnog Pacifika (5°N – 5°S, 170°W – 120°W). Prema Trenberth i Stepaniak (2001), u početku je indeks Niño 3 bio jako popularan za praćenje i prognozu El Niña, međutim shvatilo se da s obzirom na kritično ENSO međudjelovanje oceana i atmosfere, područje koje pokriva indeks Niño 3.4 ima veću dijagnostičku moć.



Slika 2.2 Područja oceanskih Niño indeksa u Pacifiku. Izvor: URL4

Za izračun indeksa Niño 3.4 korištene su NOAA ERSST V3 mjesečne anomalije SST-a u razdoblju od 1855. – 2010. godine, koje su usrednjene preko područja Niño 3.4 u sezoni JAS. Smith i sur. (2008) su potvrdili značajan napredak u ovoj verziji NOAA analize globalnih anomalija SST-a u svim segmentima, a najviše u podacima s kraja 19. stoljeća i nakon 1985. godine, zbog boljih analiza i uvođenja satelitskih podataka. Za određivanje ENSO i ne-ENSO godina koristio se standardizirani indeks Niño 3.4, odnosno sezonski indeks normiran s iznosom standardne devijacije. Po iznosu standardiziranog indeksa pojedine godine se razvrstavaju u kompozite: ENSO godine ( $|\text{Niño3.4}| > 1.0\sigma$ ) i ne-ENSO godine ( $-0.5\sigma < \text{Niño3.4} < 0.5\sigma$ ). Dodatno, ENSO godine imaju još jednu podjelu, ako je indeks Niño 3.4 pozitivan onda godina pripada El Niño godinama, a ako je indeks negativan onda godina pripada La Niña godinama. Prema vrijednostima indeksa Niño 3.4 u sezoni JAS, 94 godine pripadaju ENSO godinama, a 29 ne-ENSO godinama. Od svih ENSO godina, njih 16 pripada među El Niño godine, a 78 među La Niña godine. Dalje u ovome radu će se posebno analizirati samo kompoziti za El Niño godine, zato što su ta polja signala oborine puno jača u odnosu na La Niña kompozite, a prostorna raspodjela signala je približno jednaka. Uz kompozite za El Niño godine, analizom su još obuhvaćeni kompoziti za ne-ENSO godine i kompoziti za sve godine zajedno.

## 2.4 Analiza varijance signala

Prema članku Brankovića i Moltenija (2004), u ansamblu simulacija atmosferskog modela, često je korisno izračunati utjecaj zadanog forsiranja SST-a na razvoj stanja atmosfere (signal) u odnosu na nepredvidljive nelinearne efekte koje proizvodi unutarnja dinamika modela (šum). Signal je definiran kao srednja kvadratna anomalija svih srednjaka ansambla u odnosu na klimatološki srednjak. Analizirani signal u ovom radu je definiran kao razlika između srednjaka ansambla i klimatološkog srednjaka za razdoblje od 1961. – 1990. godine, a signal je izračunat za svaki AGCM eksperiment za razdoblje od 1855. – 2010. godine. Prema Brankoviću i Molteniju (2004) i Chapmanu i sur. (2021), definicija signala za bilo koju klimatološku varijablu  $x$  je:

$$\sigma_s^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (\bar{x}_j - \bar{x})^2 \quad (2.1)$$

gdje  $x_j$  označava ansambl za  $j$ -tu godinu,  $\bar{x}$  je prosjek ansambla kroz sve godine (tj. klimatološki srednjak srednjaka ansambla), a  $N$  je broj godina.

Izvođenje klimatskog signala za bilo koju varijablu radi se kao mjesečni srednjak anomalija srednjaka ansambla za pojedine mjesece u pojedinoj godini. Kada se ukloni forsirani signal, ono što ostaje u sustavu je unutarnja varijabilnost. Odmak od srednjaka



ansambla predstavlja varijabilnost atmosfere, koja je određena bilo kojom perturbacijom koja nema veze s donjim graničnim uvjetima i radijacijskim forsiranjem (Chapman i sur. 2021).

Prije računanja signala u ovome radu, svim podacima anomalija oborine uklonjen je linearni trend kako bi se otklonili dugoročni trendovi poput klimatskih promjena ili drugih faktora. Nakon toga su podaci filtrirani visokopropusnim filtrom, ostavljajući samo periode kraće od 11 godina, kako bi se zadržala međugodišnja varijabilnost i naglasile kratkoročne promjene u podacima.

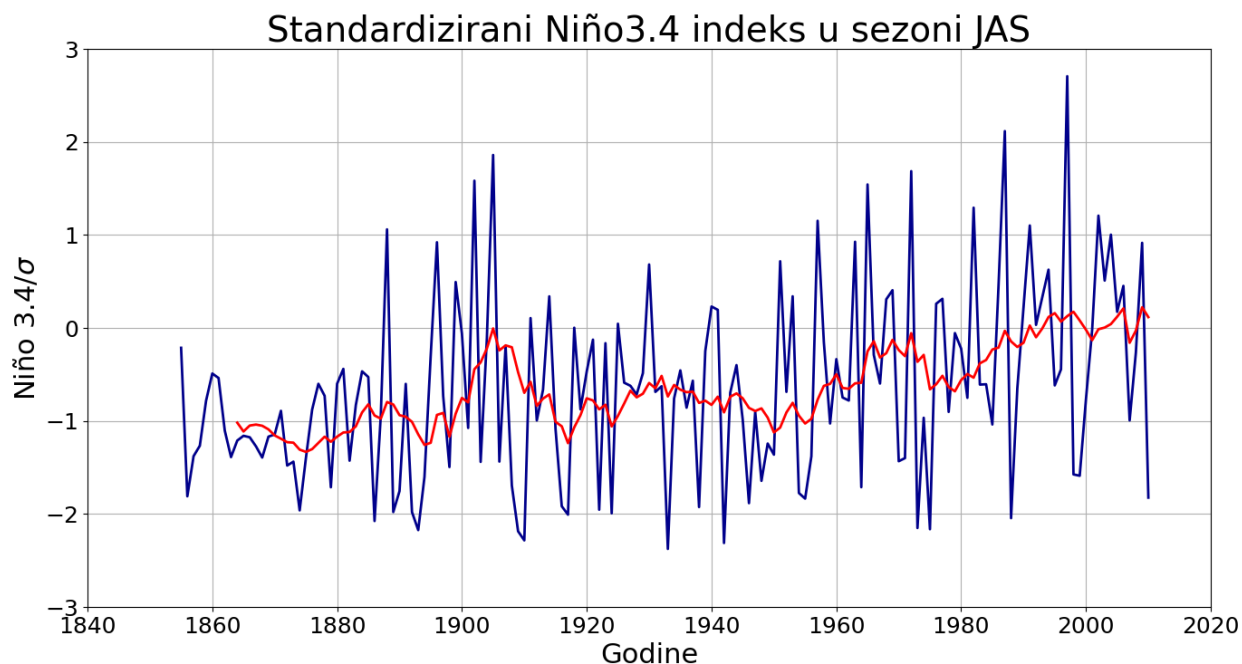
### 3. Rezultati i diskusija

U ovom poglavlju su prikazani i obrazloženi rezultati numeričkih simulacija modelom SPEEDY za eksperimente *Glob*, *Clim*, *NATl*, *NoNATl*, *TroAtl*, *TroInd*, *TroPac* i *Tropics* u sezoni JAS. Prvo je prikazan indeks Niño 3.4 u sezoni JAS, a zatim slijede prikazi anomalija oborine po eksperimentima. Izračunata polja signala oborine za područje sjeverne hemisfere od 40°N do 90°N prikazana su u polarnoj stereografskoj projekciji za sve eksperimente i kompozite. Na kraju, signal oborine je usrednjen preko područja NAE i PNA u ljetnim mjesecima, te je na histogramima prikazan utjecaj oceanskih bazena na oborinu za sva tri kompozita.

#### 3.1 Niño 3.4 indeks

Na slici 3.1 je prikazan standardizirani indeks Niño 3.4, odnosno sezonski indeks koji je normiran sa standardnom devijacijom. Vrijednosti standardiziranog indeksa veće su u odnosu na sezonski indeks i zbog toga su ekstremne vrijednosti na grafu lakše za uočiti. Indeksom je obuhvaćeno razdoblje od 1855. do 2010. godine te su korišteni podaci samo za srpanj, kolovoz i rujna (JAS).

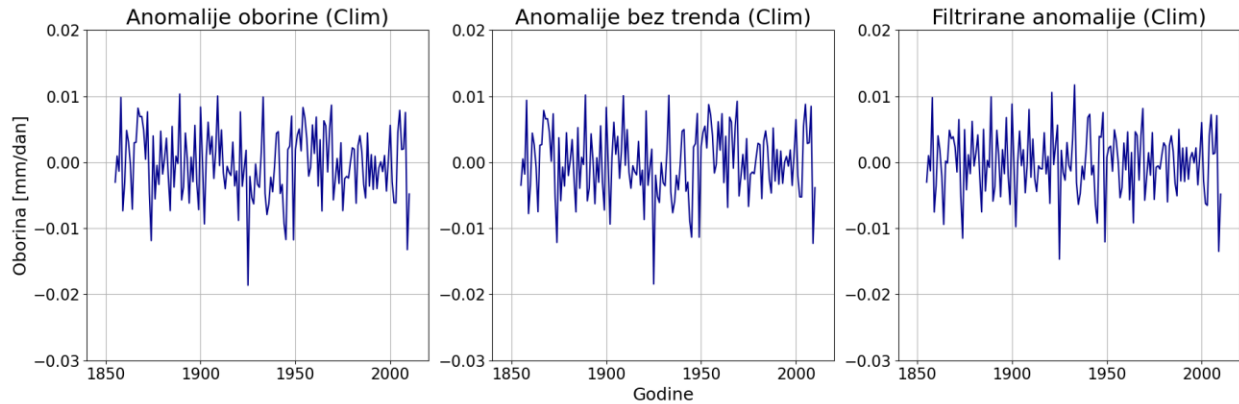
U prvih 100 godina promatranog razdoblja La Niña je puno češća i intenzivnija od El Niña, a u razdoblju od 1906. do 1950. godine nije zabilježen čak niti jedan El Niño. Tijekom tog razdoblja La Niña je bila najsnažnija te je La Niña iz 1933. godine zabilježena kao najmanja vrijednost indeksa Niño 3.4 u sezoni JAS u svim promatranim godinama. S druge strane, najveća vrijednost indeksa Niño 3.4 zabilježena je za El Niño iz 1997. godine. Gledajući samo razdoblje 1980. – 2010., koje je najpouzdanije što se tiče količine i kvalitete podataka, najizraženiji događaji na grafu su dva El Niña iz 1987. i 1997. godine, te La Niña iz 1988. godine. Promatranjem kliznog srednjaka indeksa Niño 3.4 (slika 3.1) može se uočiti pozitivan trend nakon 1950-ih godina. Tijekom većine promatranog razdoblja srednjak poprima isključivo negativne vrijednosti koje se kreću oko -1, no pri kraju druge polovice razdoblja on počinje rasti i približavati se nuli, a u zadnjih 20-ak godina čak i mijenja predznak.



Slika 3.1 Standardizirani JAS Niño 3.4 indeks (plavo) i 10-godišnji klizni srednjak (crveno) za razdoblje 1855. – 2010.

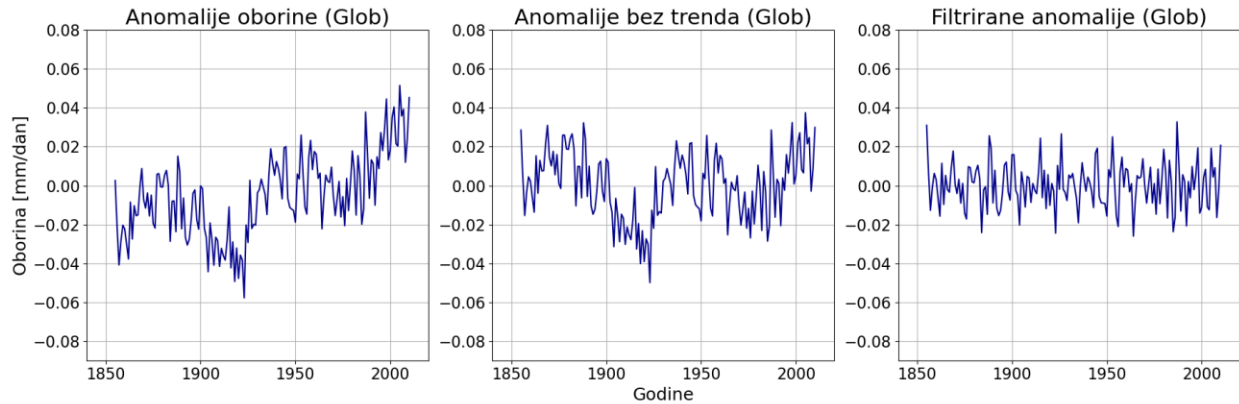
### 3.2 Anomalije ukupne oborine za sezonu JAS

Simulirani podaci anomalija oborine usrednjeni su za područje sjeverne hemisfere od 40°N do 90°N i analiziran je utjecaj različitih oceanskih bazena na oborinu. Na slici 3.2 su prikazane anomalije oborine, anomalije s uklonjenim trendom i filtrirane anomalije za eksperiment *Clim* u kojem nema dodanog SST forsiranja, već sadrži samo klimatološke vrijednosti SST-a. Budući da atmosferska polja dobivena eksperimentom *Clim* predstavljaju unutarnju varijabilnost atmosfere, sva tri grafa za oborinu su slična i nema veće razlike između filtriranih i nefiltriranih anomalija. Za čitavo razdoblje vrijednosti anomalija se uglavnom kreću između -0.01 i 0.01 mm/dan, no pred kraj 20. stoljeća postaju upola manje. Najveći ekstrem u vrijednostima anomalija je negativan pad sredinom prve polovice 20. stoljeća, no nakon filtriranja ni taj pad više nije toliko izražen. Eksperiment *Clim* može poslužiti kao prag značajnosti utjecaja SST forsiranja na signal u ostalim eksperimentima, pomoću kojega možemo uspoređivati utjecaje drugih eksperimenata, odnosno utjecaje različitih oceanskih bazena.



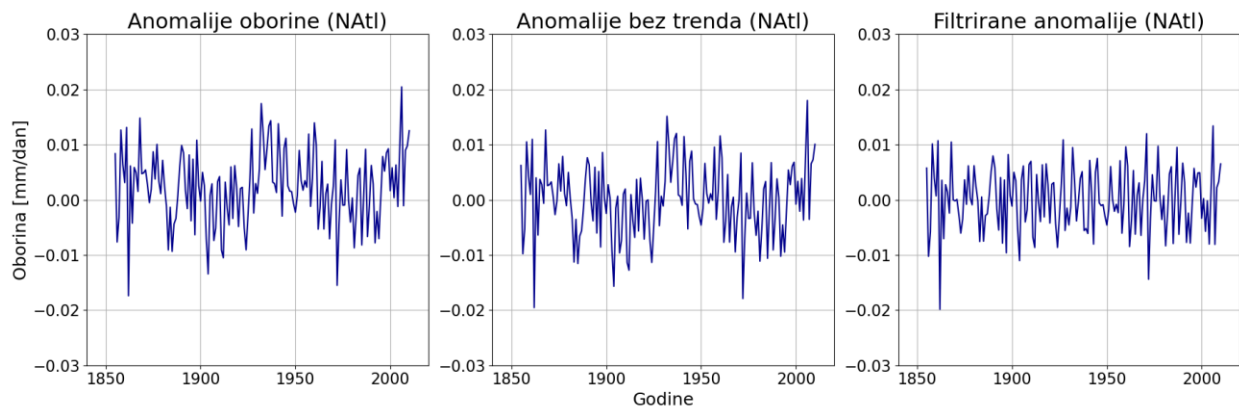
Slika 3.2 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *Clim* u razdoblju 1855. – 2010.

Na slici 3.3 su prikazani grafovi anomalija oborine za eksperiment *Glob*, u kojem je SST forsiranje primijenjeno globalno. Iz grafa anomalija oborine se može primijetiti da su u drugoj polovici 19. stoljeća anomalije češće poprimala negativne vrijednosti, dok su u 20. stoljeću te anomalije većinom pozitivne i imaju pozitivan trend. U usporedbi s eksperimentom *Clim* (slika 3.2) vidimo da SST forsiranje u globalnim oceanima doprinosi anomalijama oborine na sjevernoj hemisferi. Nakon uklanjanja trenda i filtriranja, anomalije oborine i dalje pokazuju nešto veće vrijednosti nego u eksperimentu *Clim*, iz čega se može zaključiti da svjetski oceani imaju trenutačan utjecaj na oborinu promatranog područja, međutim taj utjecaj nije osobito velik. Vrijednosti anomalija oborine u eksperimentu *Glob* se kreću između  $-0.06$  i  $0.06$  mm/dan, i to su najveće vrijednosti u usporedbi sa svim eksperimentima, što je i očekivano jer je ovdje dostupno SST grijanje najveće, dok su vrijednosti filtriranih anomalija uglavnom između  $-0.02$  i  $0.03$  mm/dan. Negativan ekstrem koji se javlja sredinom prve polovice 20. stoljeća, a kojeg vidimo na grafovima anomalija oborine i anomalija bez trenda, je očekivan jer smo ga vidjeli u rezultatima eksperimenta *Clim*. Međutim, njegova vrijednost je mnogo veća od praga značajnosti i to je najveća vrijednost anomalija koju nalazimo u svim eksperimentima. U eksperimentu *Clim* taj ekstrem je ostao izražen i nakon filtriranja, dok je u eksperimentu *Glob* filtriranje značajno smanjilo njegovu vrijednost.



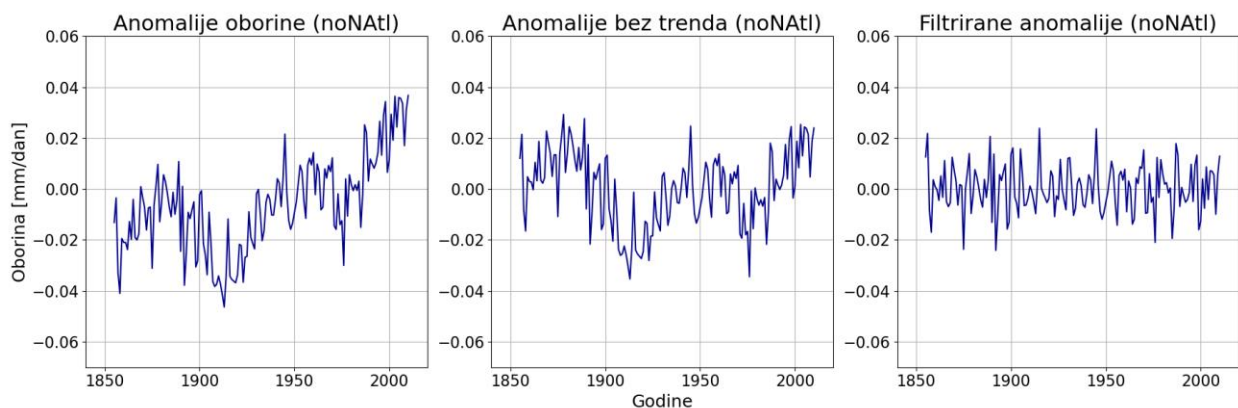
Slika 3.3 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *Glob* u razdoblju 1855. – 2010.

Grafovi oborine za eksperiment koji ima dodano forsiranje SST-om samo u sjevernom Atlantiku prikazani su na slici 3.4. Iako u anomalijama oborine postoji slab utjecaj, nakon što se ukloni linearni trend i pogledaju kratkoročne promjene, vidimo da sjeverni Atlantik vrlo malo doprinosi ljetnoj oborini sjeverne hemisfere. Anomalije se uglavnom kreću između  $-0.01$  i  $0.01$  mm/dan, baš kao i u eksperimentu *Clim* (slika 3.2), ali su ipak ponekad veće i nemaju pad u vrijednostima pred kraj 20. stoljeća. Dakle, kada se izdvoji utjecaj sjevernog Atlantika na oborinu na sjevernoj hemisferi, utjecaj je marginalan, osim pri kraju promatranog razdoblja.



Slika 3.4 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *NAtl* u razdoblju 1855. – 2010.

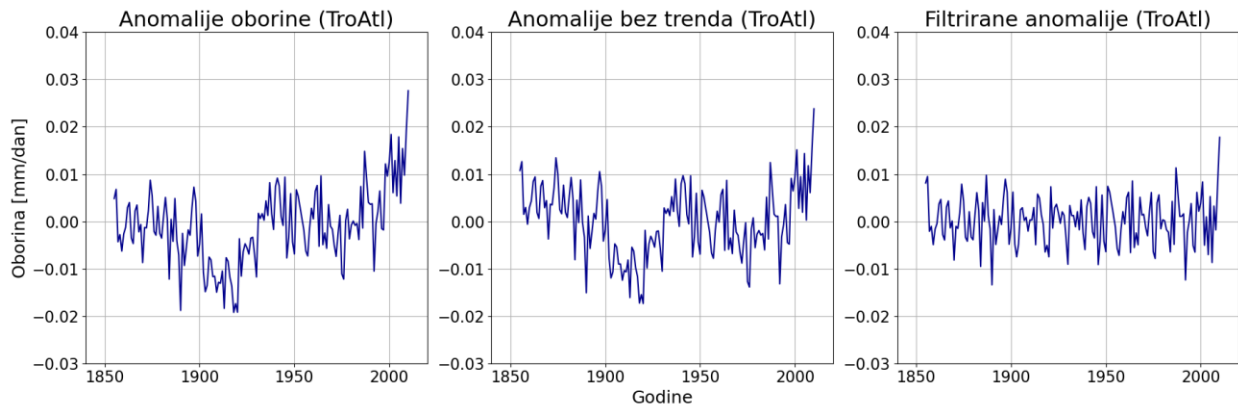
Grafovi oborine za eksperiment u kojem je forsiranje SST-om prisutno svugdje osim u sjevernom Atlantiku prikazani su na slici 3.5. Kao što je i očekivano, rezultati ovog eksperimenta su vrlo slični rezultatima eksperimenta *Glob* (slika 3.3), uz nešto manje vrijednosti anomalija oborine koje se kreću između  $-0.04$  i  $0.04$  mm/dan. Ovdje također vidimo pozitivan trend anomalija oborine na kraju promatranog razdoblja i vrijednosti filtriranih anomalija između  $-0.02$  i  $0.02$  mm/dan. Dakle, kada se pogleda utjecaj oceanskih bazena bez sjevernog Atlantika, rezultati su vrlo slični onima kada se gledao utjecaj svih oceanskih bazena. Iako su prošli rezultati pokazali da utjecaj sjevernog Atlantika nije od velike važnosti (slika 3.4), ovdje vidimo da se anomalije oborine smanjuju za trećinu svoje vrijednosti kada se od svih oceana isključi samo utjecaj sjevernog Atlantika. Iz ovih rezultata možemo zaključiti da sjeverni Atlantik sam po sebi neće bitno doprinositi oborini na sjevernoj hemisferi, ali u međudjelovanju s drugim oceanskim bazenima njegov utjecaj može se amplificirati i biti uočljiv.



Slika 3.5 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *NoNAtl* u razdoblju 1855. – 2010.

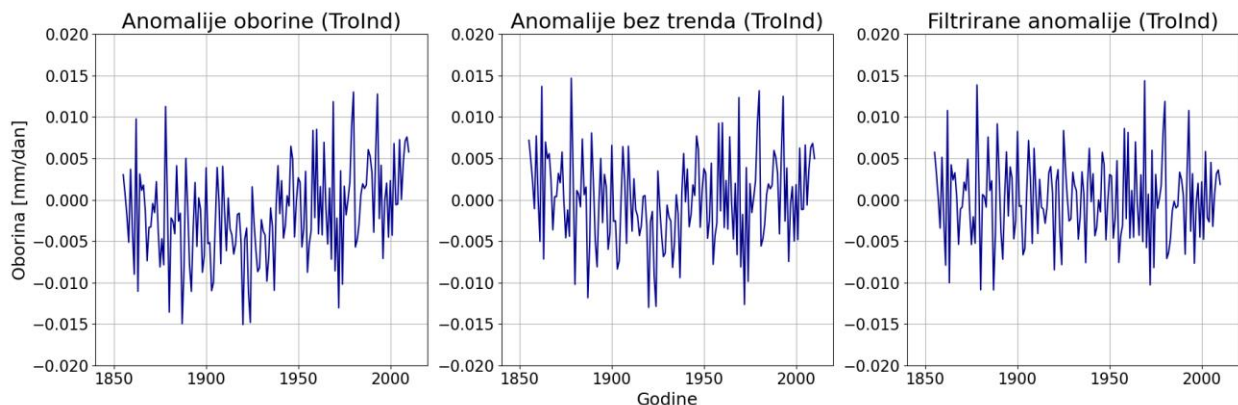
Na slici 3.6 prikazani su grafovi anomalija oborine za eksperiment koji ima dodano forsiranje SST-om samo u tropskom Atlantiku. Početkom 20. stoljeća mogu se primijetiti negativne anomalije oborine i do  $-0.02$  mm/dan, a početkom 21. stoljeća anomalije oborine postaju veće i od  $0.02$  mm/dan. Međutim, kada se pogledaju filtrirane anomalije, vidimo da tijekom većine razdoblja nema značajnog utjecaja, odnosno vrijednosti filtriranih anomalija su slične onima u eksperimentu *Clim* (slika 3.2). Jedina razlika se uočava u zadnjih 30-ak godina promatranog razdoblja, kada anomalije postaju najveće, dok su kod eksperimenta *Clim* anomalije u tom razdoblju najslabije. Iz priloženog se može zaključiti kako tropski

Atlantik tijekom čitavog razdoblja pokazuje vrlo slab utjecaj na oborinu na sjevernoj hemisferi.



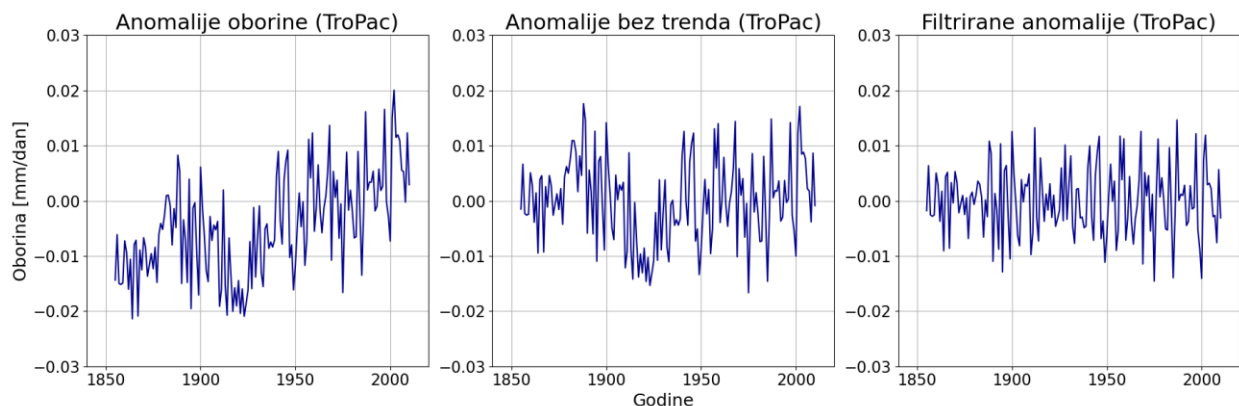
Slika 3.6 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *TroAtl* u razdoblju 1855. – 2010.

Na slici 3.7 su prikazani grafovi anomalija oborine za eksperiment koji ima dodano forsiranje SST-om samo u tropskom Indijskom oceanu. Ovaj eksperiment pokazuje najslabije vrijednosti anomalija od svih eksperimenata. Vrijednosti anomalija oborine su uglavnom između  $-0.01$  i  $0.01$  mm/dan, kao i vrijednosti filtriranih anomalija. Usporedbom ovih rezultata s rezultatima eksperimenta *Clim* (slika 3.2), vidimo da tropski Indijski ocean gotovo ne utječe na ljetnu oborinu u promatranom području na sjevernoj hemisferi.



Slika 3.7 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *TroInd* u razdoblju 1855. – 2010.

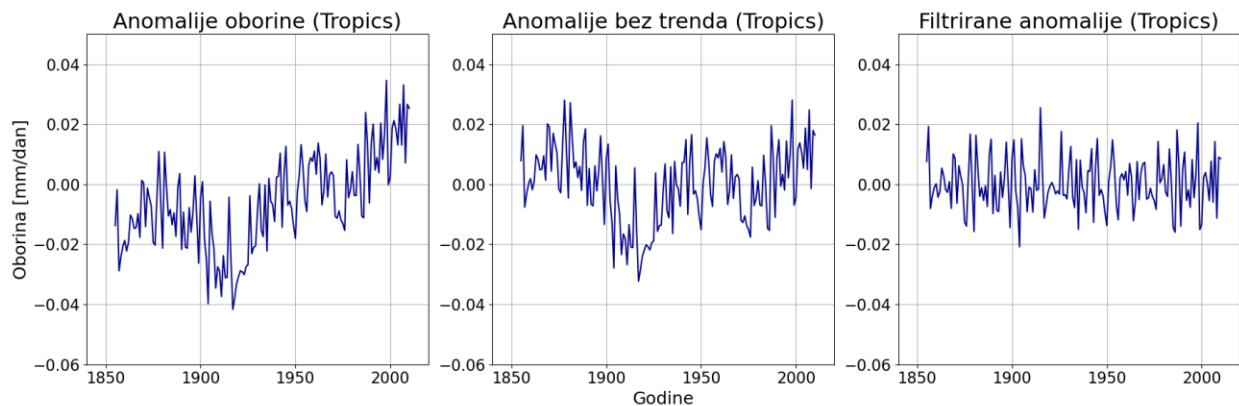
Grafovi oborine za eksperiment u kojem je forsiranje SST-om dodano samo u tropskom Pacifiku prikazani su na slici 3.8. Anomalije oborine u ovom eksperimentu su veoma slične rezultatima za eksperiment *TroAtl* (slika 3.6). Ovdje se također mogu primijetiti značajne negativne anomalije do  $-0.02$  mm/dan početkom 20. stoljeća i značajne pozitivne anomalije do  $0.02$  mm/dan u zadnjih 30-ak godina promatranog razdoblja. Međutim, za razliku od rezultata za tropski Atlantik, u ovom eksperimentu filtrirane anomalije poprimaju značajne vrijednosti, odnosno najveće vrijednosti od svih tropskih oceanskih bazena. Iz ovih rezultata možemo zaključiti da je utjecaj tropskog Pacifika na oborinu promatranog područja prevladavajući, budući da su i tropski Atlantik i tropski Indijski ocean pokazali vrlo slab utjecaj.



Slika 3.8 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *TroPac* u razdoblju 1855. – 2010.

Konačno, na slici 3.9 prikazani su grafovi anomalija oborine za eksperiment u kojemu je forsiranje SST-om dodano u cijelom tropskom području. Rezultati ovog eksperimenta slični su rezultatima eksperimenta *NoNAtl* (slika 3.5) iz čega se može zaključiti da tropski oceani imaju znatno veći izravni utjecaj na anomalije oborine sjeverne hemisfere u sezoni JAS od sjevernog Atlantika. Nakon uklanjanja trenda i filtriranja, vrijednosti anomalija poprimaju vrijednosti između  $-0.02$  i  $0.02$  mm/dan. Također, usporedbom s prošlim rezultatima za tropske oceane, može se primijetiti kako *TroPac* najviše doprinosi signalu *Tropics*, drugi po redu doprinosi *TroAtl*, dok *TroInd* doprinosi najmanje.



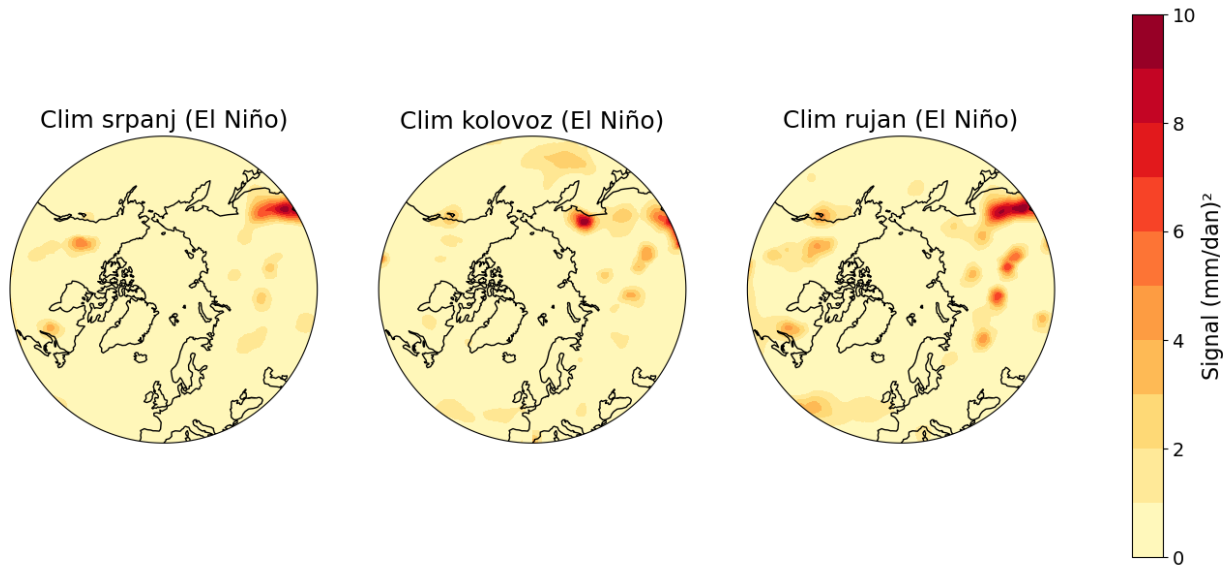


Slika 3.9 Grafovi anomalija oborine [mm/dan] za eksperiment *Tropics* u razdoblju 1855. – 2010.

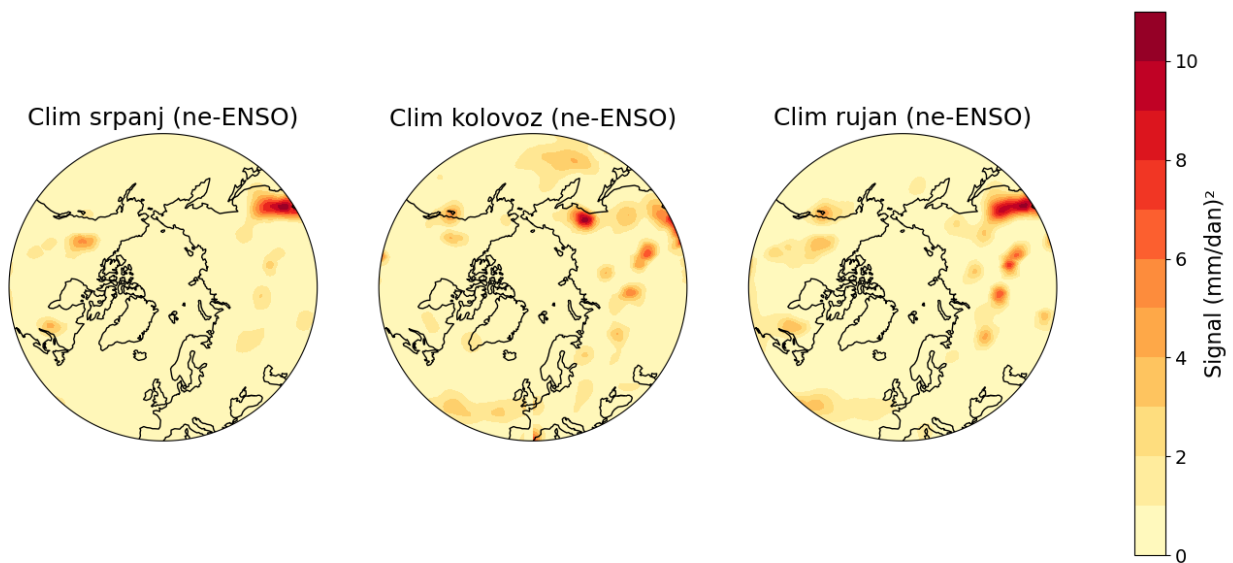
### 3.3 Polja signala oborine za sjevernu hemisferu

Polja signala oborine su izračunata prema formuli 2.1 za signal klimatološke varijable, za ljetne mjeseci u vremenskom nizu od 156 godina. Polja signala su prikazana za svaki eksperiment i kompozit posebno, pomoću polarnih stereografskih projekcija u granicama od 40°N do 90°N za srpanj, kolovoz i rujan.

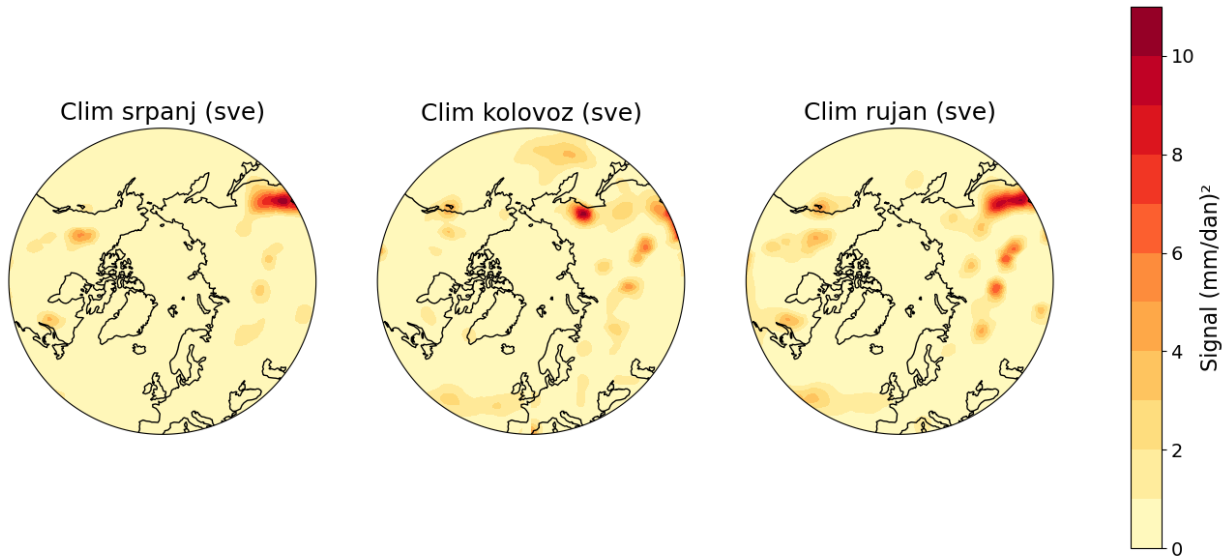
Na slici 3.10 prikazana su dobivena polja signala oborine za eksperiment *Clim* u El Niño godinama, na slici 3.11 su prikazana polja za ne-ENSO godine, a na slici 3.12 su prikazani rezultati za sve godine. U svim kompozitima najizraženiji centar akcije nalazi se na istoku Azije u srpnju i rujnu, te na sjeveroistoku Azije u kolovozu. Značajan signal još se može primijetiti širom središnje Azije, posebice u rujnu, te uz obale Kanade u srpnju i rujnu, dok je tijekom kolovoza taj signal osjetno slabiji. Što se tiče utjecaja na moru, u kolovozu i rujnu postoji signal u južnom dijelu područja NAE u El Niño godinama, ali ga se može primijetiti i u ne-ENSO godinama i u svim godinama zajedno. Polje signala u Atlantiku tijekom kolovoza je jače za ne-ENSO godine nego za El Niño godine, te je tada čak primijećen i vrlo slab signal na južnoj obali Grenlanda. Najznačajniji signal nad područjem PNA je također pronađen u kolovozu, u dijelu Pacifika blizu azijskog kontinenta, a još se može uočiti i nešto slabiji utjecaj uz zapadnu obalu Kanade koji se proteže i na rujnu. Signali oborine nad oceanima su približno isti za sve kompozite, ali su ipak najveći tijekom El Niño godina, te jedino tijekom srpnja nije primijećen signal nad morskim područjima. Eksperiment *Clim* će se dalje koristiti za usporedbu sa svim ostalim eksperimentima. Ako su vrijednosti signala drugih eksperimenata veće od signala u eksperimentu *Clim*, onda se može reći da njihov signal premašuje prag unutarnje varijabilnosti atmosfere te je statistički značajan.



Slika 3.10 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *Clim* u El Niño godinama.



Slika 3.11 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *Clim* u ne-ENSO godinama.

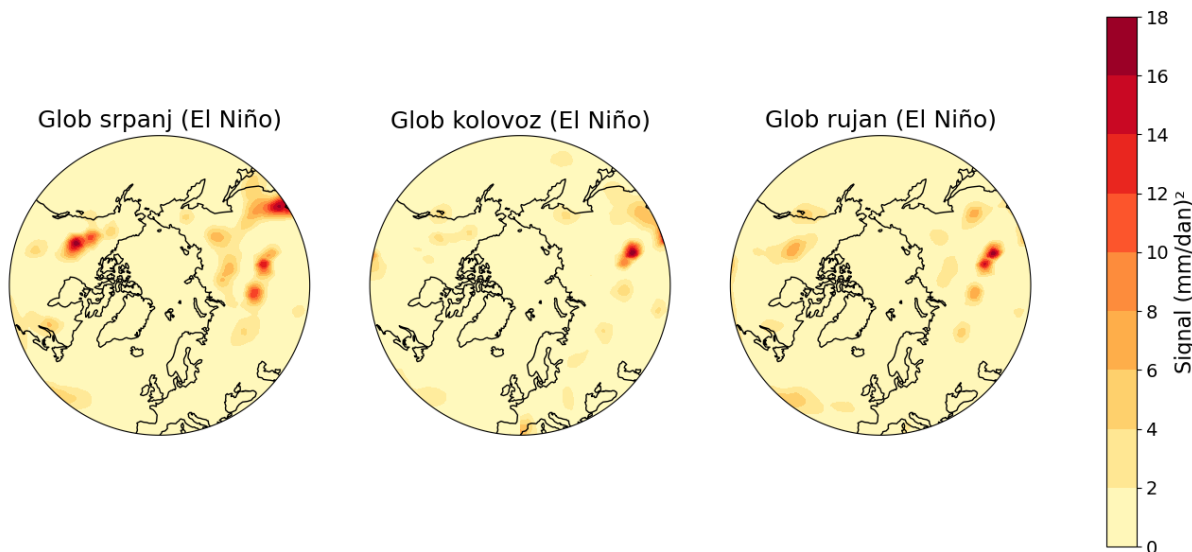


Slika 3.12 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *Clim* u svim godinama.

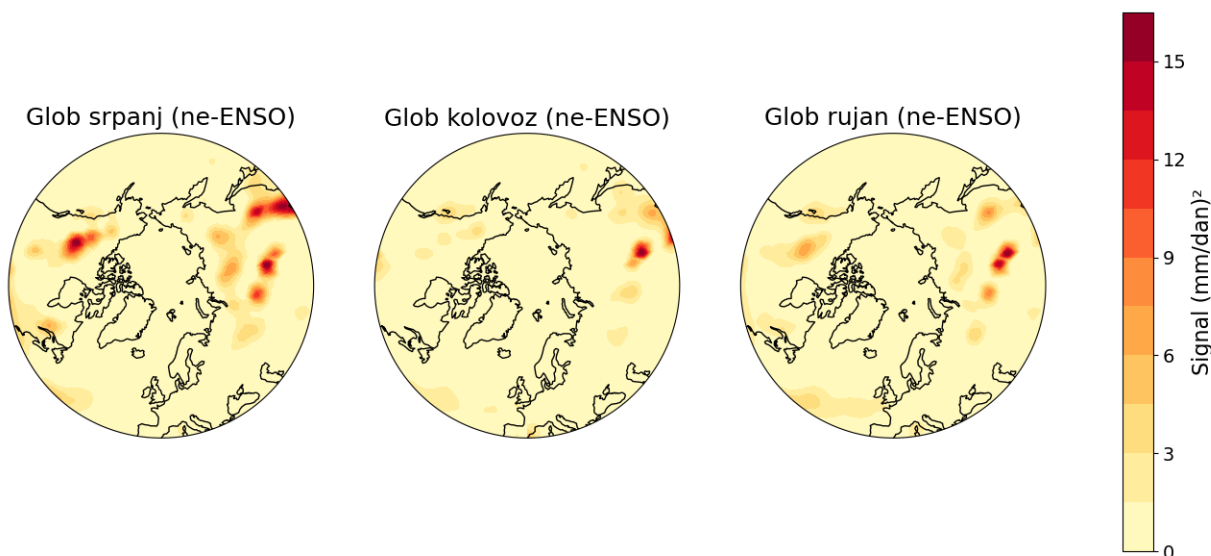
Na slici 3.13 prikazana su polja signala eksperimenta *Glob* za El Niño godine, zatim slijede polja signala za ne-ENSO godine na slici 3.14 i polja signala za sve godine na slici 3.15. Prvo što se može primijetiti je to da uz očekivani centar akcije na istoku Azije, ovdje pronalazimo jednako izraženi centar akcije u zapadnom dijelu Kanade, ali samo tijekom mjeseca srpnja. Tijekom kolovoza i rujna, oba ova polja signala skoro su u potpunosti prigušena u svim kompozitima. Također, izraženo polje signala u kolovozu na sjeveroistoku Azije nije prisutno ni u jednom od kompozita, ali su zato polja signala u središnjoj Aziji prisutna u svim skupinama i to ne samo za rujan, već za sve mjesece. Iz ovog eksperimenta vidimo kako globalni oceani mogu značajno utjecati na signal oborine diljem svijeta. Međutim, signal nad oceanskim područjima je znatno slabiji, nad područjem PNA primjećuje se jedino vrlo slab signal uz obalu američkog kontinenta u kolovozu i rujnu, dok je nad područjem NAE signal ipak nešto izraženiji. Tijekom sva tri mjeseca je prisutan barem slab signal u južnom dijelu područja NAE, ali je on ipak najjači u rujnu, i to u El Niño godinama.

Sve u svemu, ovaj eksperiment pokazuje da je najveći utjecaj na signal oborine ostvaren u srpnju u unutrašnjosti sjeverozapadnog dijela američkog kontinenta, dok je utjecaj nad morskim područjima kroz sva tri mjeseca vrlo slab ili čak zanemariv. Dodatno, iz priloženog se vidi da su jaka polja signala oborine na istoku Azije u kolovozu i rujnu prigušena kada se uključe anomalije SST-a svih oceanskih bazena. Dakle, čini se da zajednički utjecaj svih oceana prigušuje signal u kolovozu i rujnu koji bi prema

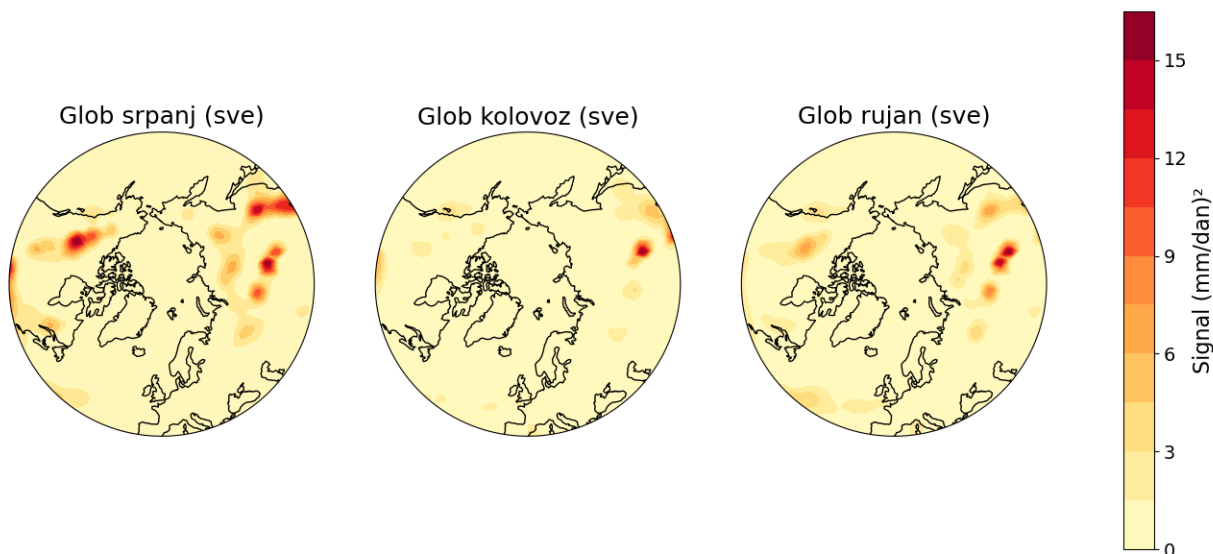
eksperimentu *Clim* trebao biti uočljiv, dok s druge strane amplificira signal u srpnju koji ne postoji u uvjetima bez uključene međugodišnje varijabilnosti SST-a.



Slika 3.13 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *Glob* u El Niño godinama.

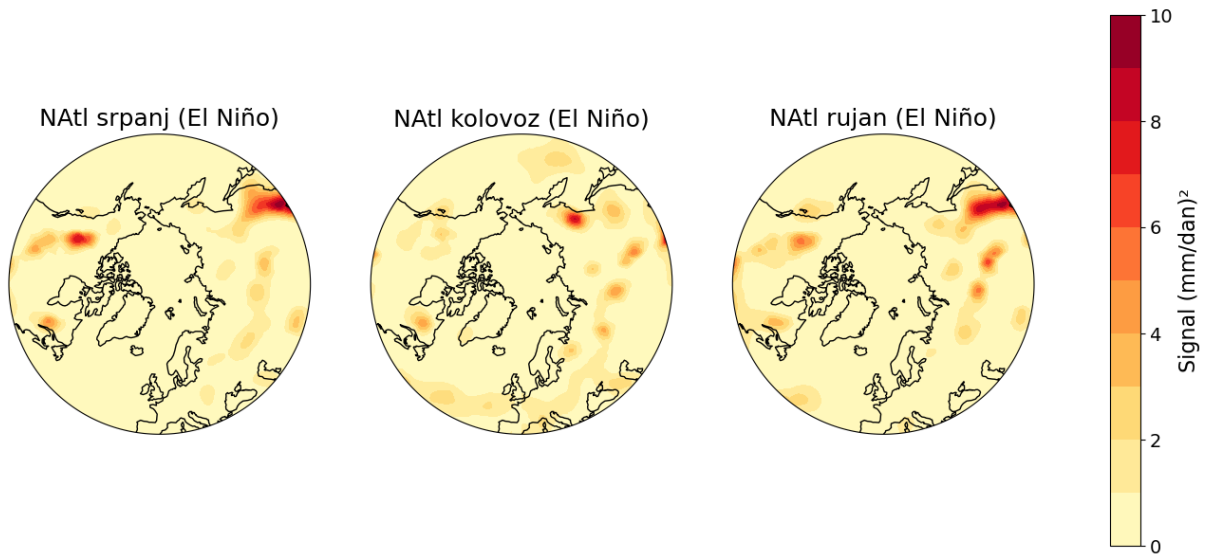


Slika 3.14 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *Glob* u ne-ENSO godinama.

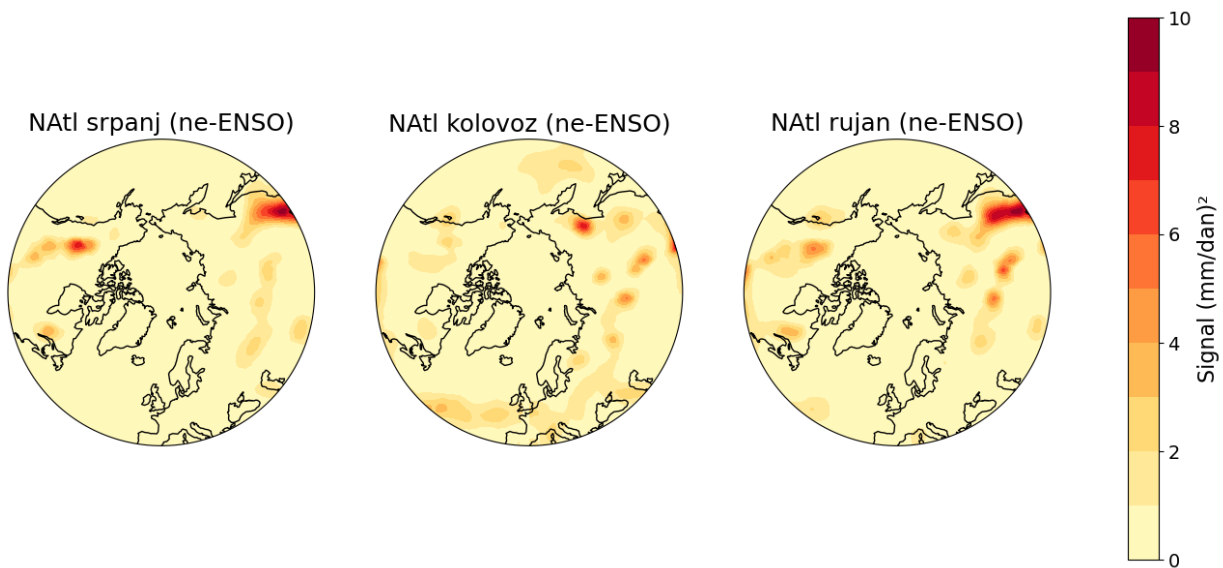


Slika 3.15 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *Glob* u svim godinama.

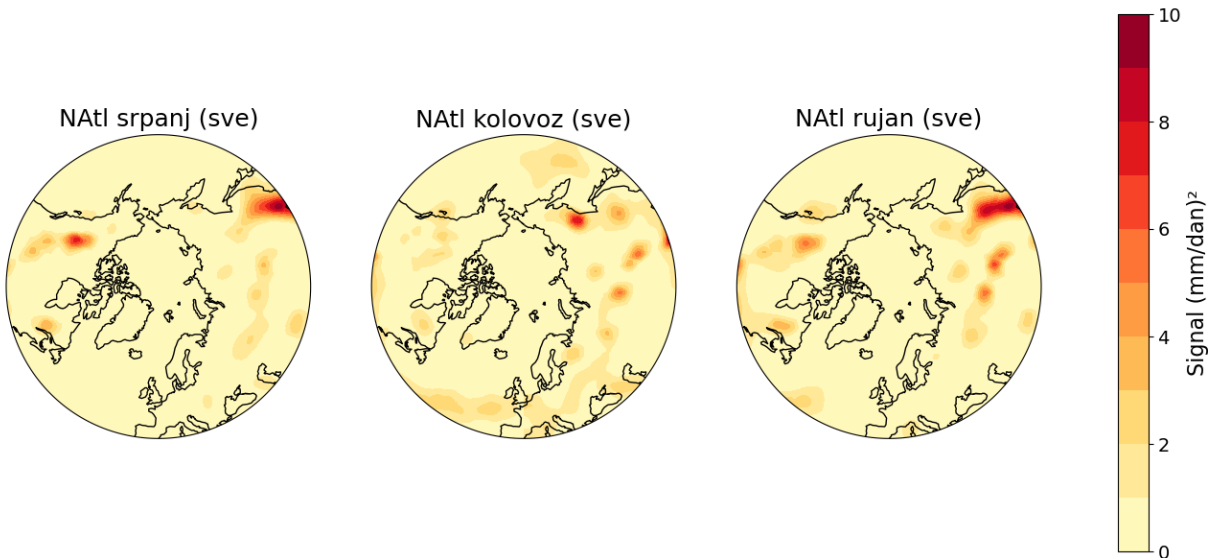
Idući rezultati koji su analizirani su polja signala oborine za eksperiment *NAtl*. Rezultati za El Niño godine su prikazani na slici 3.16, slika 3.17 prikazuje polja signala za ne-ENSO godine, a slika 3.18 prikazuje polja signala oborine za sve godine. Kao i u slučaju za eksperiment *Glob*, i ovdje se uočava pojačano polje signala u unutrašnjosti sjeverozapadnog dijela američkog kontinenta tijekom srpnja. Taj signal se javlja u svim godinama, a osim toga nema većih promjena signala u odnosu na eksperiment *Clim*. Jaka polja signala javljaju se na istoku Azije u srpnju i rujnu, dok u središnjoj Aziji nema značajnijih utjecaja. Bitna razlika u odnosu na eksperiment *Glob* je to što je ovdje jako polje signala na istoku Azije očuvano i u rujnu, što znači da sjeverni Atlantik podržava to polje signala u oba mjeseca. Sjeverni Atlantik podržava još jedno polje signala, a to je ono u kolovozu na sjeveroistoku Azije, koje je ovdje prisutno u svim skupinama. Iz ovih rezultata možemo zaključiti kako sjeverni Atlantik slabo doprinosi signalu oborine nad zapadom Kanade tijekom srpnja, uz očekivano podržavanje signala na istoku Azije u srpnju i rujnu. Utjecaji nad morskim područjima su također vrlo skromni, ali u kolovozu postoji širenje signala duž južne granice područja NAE prema europskom kontinentu. Utjecaj je primijećen u svim kompozitima za kolovoz, a najjači signal se javlja u središtu Atlantika, odakle se preko britanskog otočja širi u unutrašnjost Europe. Taj signal je malo jači u ne-ENSO godinama, ali zato u El Niño godinama u kolovozu postoji značajno polje signala na sjeveroistoku Sjeverne Amerike i vrlo slab signal na južnoj obali Grenlanda. Iz idućeg eksperimenta će se saznati održava li sjeverni Atlantik to polje signala.



Slika 3.16 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *NATl* u El Niño godinama.



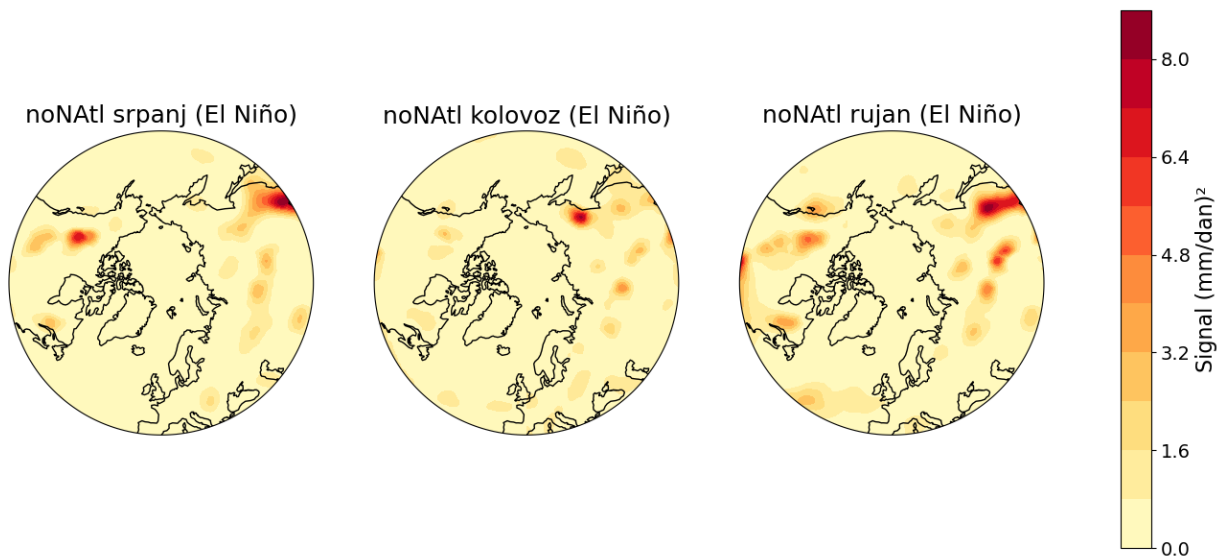
Slika 3.17 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *NATl* u ne-ENSO godinama.



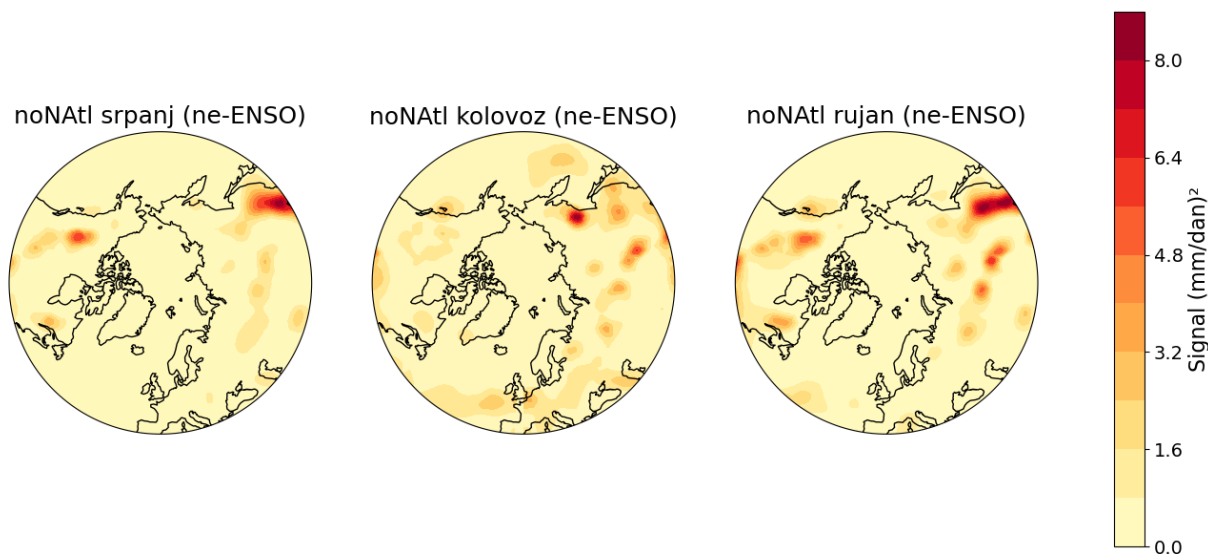
Slika 3.18 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *NAtl* u svim godinama.

Kako bi u potpunosti istražili utjecaj sjevernog Atlantika na signal oborine na sjevernoj hemisferi, iduća razmatranja se odnose na eksperiment *NoNAtl*. Polja signala oborine za El Niño godine prikazana su na slici 3.19, na slici 3.20 su prikazana polja signala za ne-ENSO godine i na slici 3.21 su prikazana polja signala za sve godine. Kao i u prethodna dva eksperimenta, u srpnju se javlja izraženo polje signala nad sjeverozapadnim dijelom Sjeverne Amerike. Za razliku od eksperimenta *Glob*, ovdje je jako polje signala na istoku Azije prisutno i u srpnju i u rujnu, kao u eksperimentu *NAtl*. Još jedna poveznica s eksperimentom *NAtl* je izostanak značajnog signala u središnjoj Aziji kroz sve mjesece. Slaganje ova dva eksperimenta samo potvrđuje da sjeverni Atlantik nije taj koji utječe na slabljenje tog dijela signala u eksperimentu *Glob*. Druga razlika u odnosu na *Glob* je što ovdje postoji jako polje signala u kolovozu na sjeveroistoku Azije, iako je utjecaj sjevernog Atlantika isključen. To znači da sjeverni Atlantik nije jedini koji održava to polje signala u kolovozu, već samo doprinosi ukupnom signalu. Utjecaj na oceanska područja vidljiv je samo u kolovozu, ali ne za El Niño godine, već samo za ne-ENSO i sve godine. U tim godinama se u području NAE javlja sličan obrazac kao u eksperimentu *NAtl*, od središta Atlantika signal se preko britanskog otočja širi u unutrašnjost Europe. Pored toga, u ne-ENSO kompozitu i polju signala za sve godine se javlja i značajan signal u unutrašnjosti Sjeverne Amerike, te vrlo slab signal na Grenlandu, ali nema signala na istočnoj obali Kanade u kolovozu za El Niño godine. Najveći utjecaj na signal područja PNA je u rujnu za El Niño godine, kada je polje signala uz sjeveroistočnu obalu Sjeverne Amerike nešto snažnije.



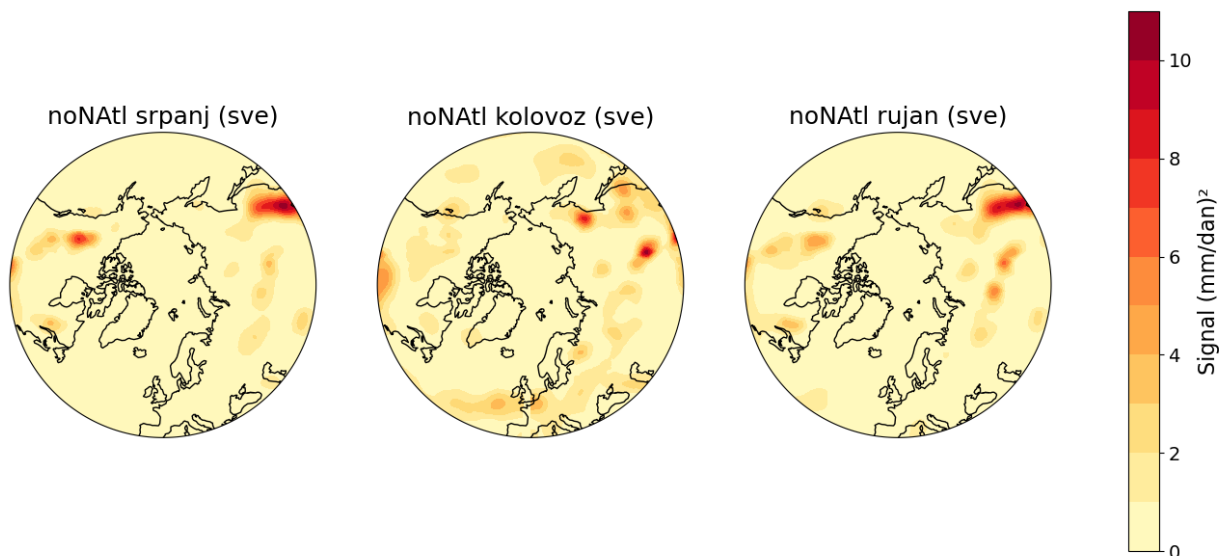


Slika 3.19 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *NoNatl* u El Niño godinama.



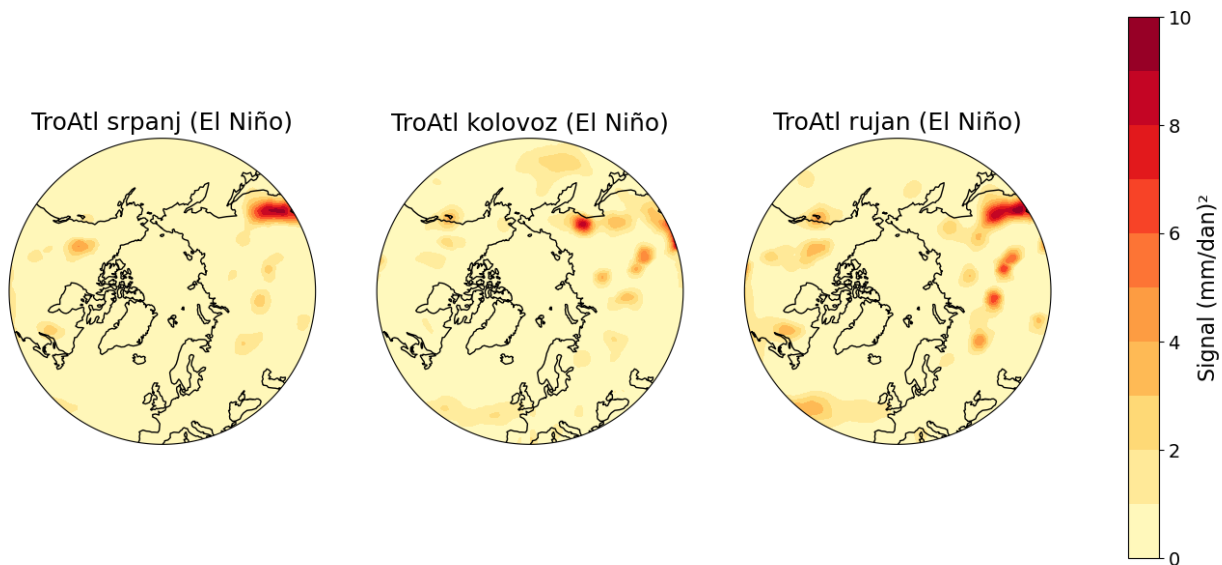
Slika 3.20 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *NoNatl* u ne-ENSO godinama.



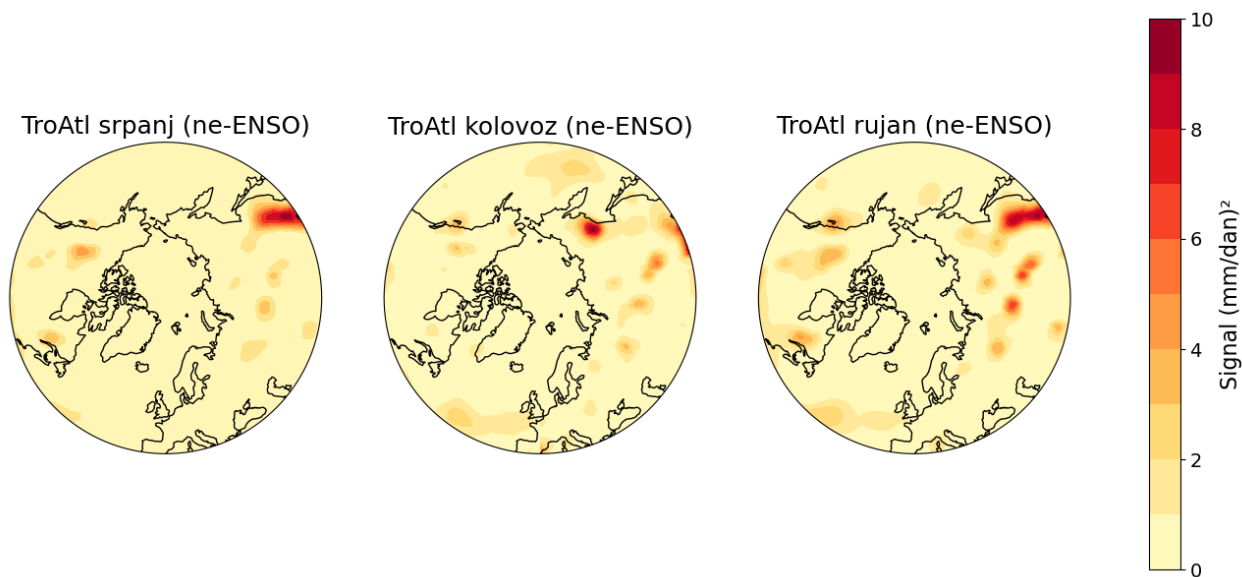


Slika 3.21 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *NoNAtl* u svim godinama.

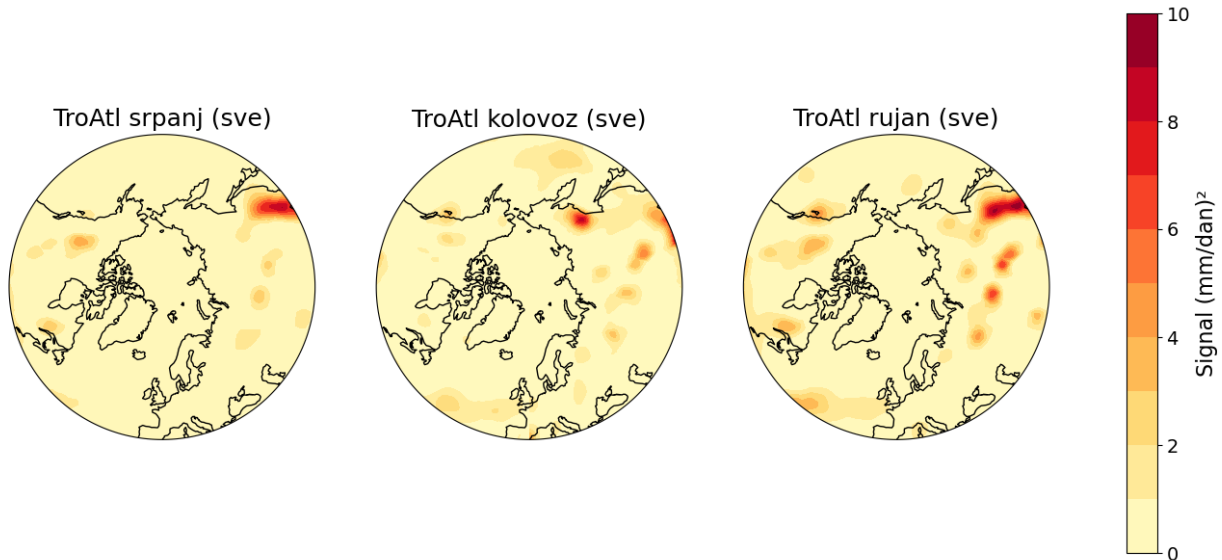
Na slici 3.22 prikazana su polja signala eksperimenta *TroAtl* za El Niño godine, zatim slijede polja signala za ne-ENSO godine na slici 3.23 i polja signala za sve godine na slici 3.24. Kada se pogledaju samo El Niño godine, tropski Atlantik nema značajnijeg utjecaja na signal oborine na sjevernoj hemisferi. Rezultati se gotovo u potpunosti slažu s kontrolnim eksperimentom *Clim*. Najjače polje signala se nalazi na istoku Azije u srpnju i rujnu, središnja Azija i unutrašnjost Sjeverne Amerike ne pokazuju značajan utjecaj, a nad morskim područjima značajna polja signala se javljaju samo za područje PNA u kolovozu i za područje NAE u rujnu. Pri tome je najveći utjecaj nad područjem NAE uočen tijekom El Niño godina, iako se projekcije za ne-ENSO i sve godine ne razlikuju mnogo od njih. Za razliku od sjevernog Atlantika, tropski Atlantik u El Niño godinama ne doprinosi signalu na istočnoj obali Kanade i na južnoj obali Grenlanda u kolovozu. Dakle, tropski Atlantik se pokazao kao oceanski bazen s vrlo ograničenim utjecajem na signal oborine na sjevernoj hemisferi.



Slika 3.22 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroAtl* u El Niño godinama.

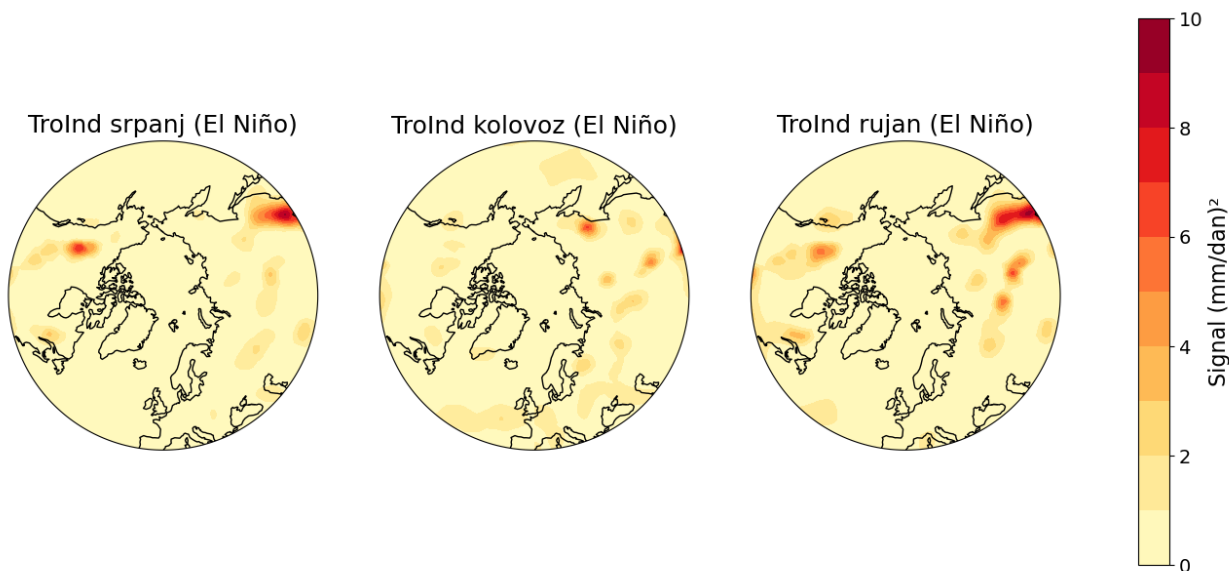


Slika 3.23 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroAtl* u ne-ENSO godinama.

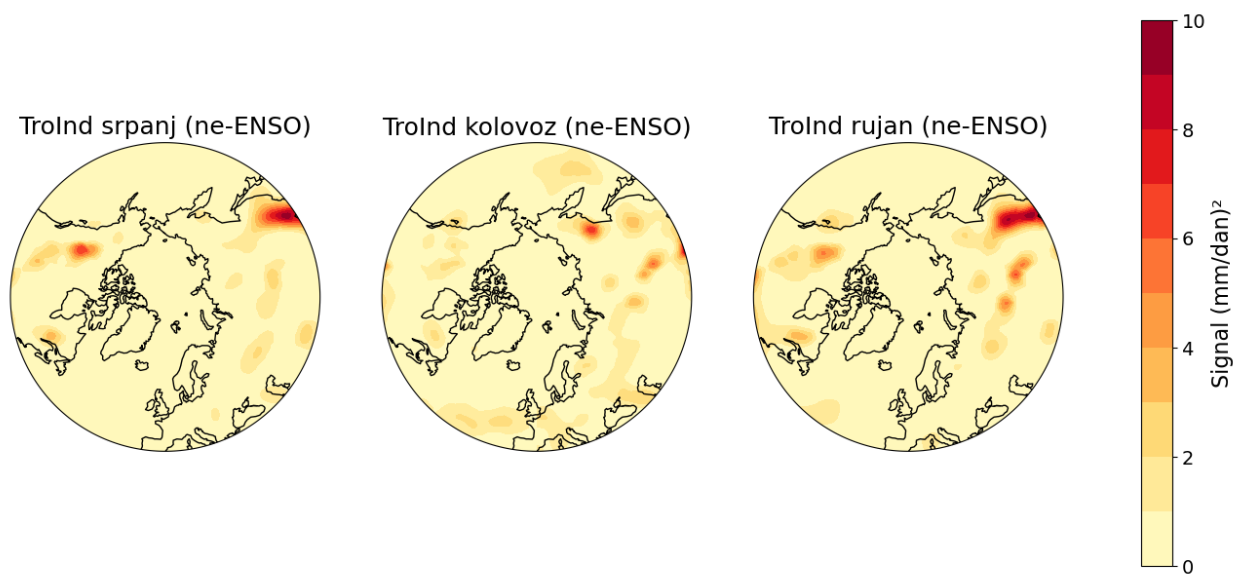


Slika 3.24 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *TroAtl* u svim godinama.

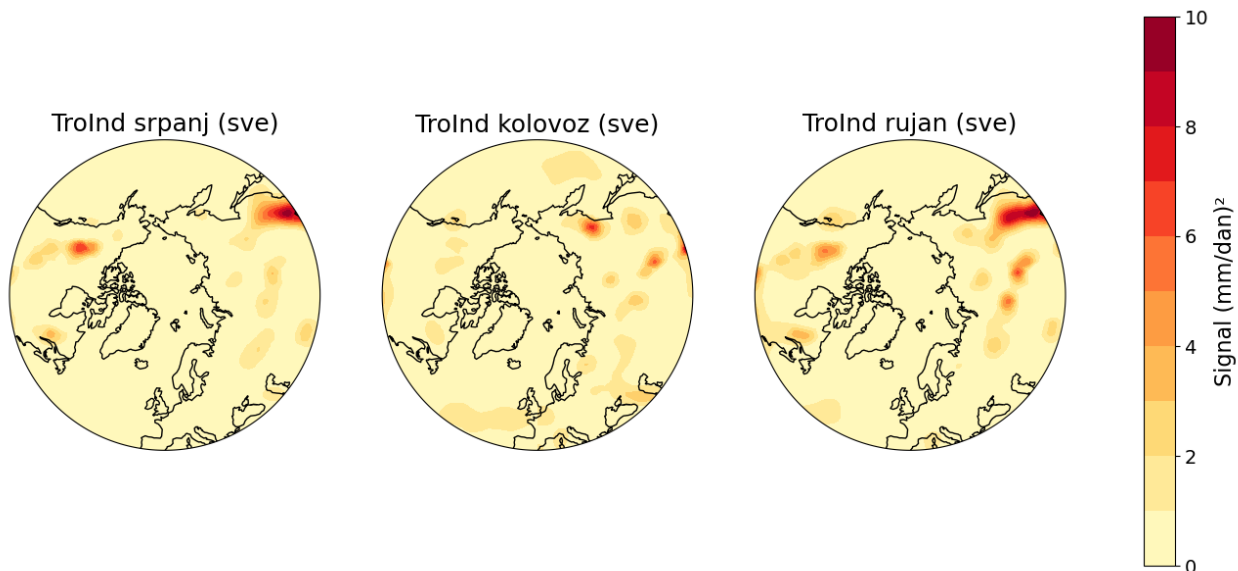
Na slici 3.25 prikazana su polja signala eksperimenta *TroInd* za El Niño godine, zatim slijede polja signala za ne-ENSO godine na slici 3.26 i polja signala za sve godine na slici 3.27. Rezultati za tropski Indijski ocean slični su rezultatima za tropski Atlantik, ali ipak ima razlika. Jaka polja signala na istoku Azije se javljaju u srpnju i rujnu, ali polje signala u kolovozu je prigušeno, te također nema značajnog utjecaja u središnjoj Aziji. Međutim, u srpnju se javlja polje signala na zapadu Kanade koje je pronađeno u eksperimentu *Glob*, a tijekom kolovoza postoji slabo širenje signala duž južne granice područja NAE koje je pronađeno u eksperimentima *NAtl* i *NoNAtl*. Možemo zaključiti kako tropski Indijski ocean amplificira te signale u međudjelovanju s ostalim oceanskim bazenima. Kada se gleda po kompozitima, ovi utjecaji su najizraženiji u ne-ENSO godinama, no razlike su minimalne. S druge strane, polja signala nad područjem PNA u kolovozu i rujnu su slabija za sve kompozite u usporedbi s eksperimentom *Clim*, što znači da bi tropski Indijski ocean mogao sudjelovati u gušenju tog signala.



Slika 3.25 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroInd* u El Niño godinama.

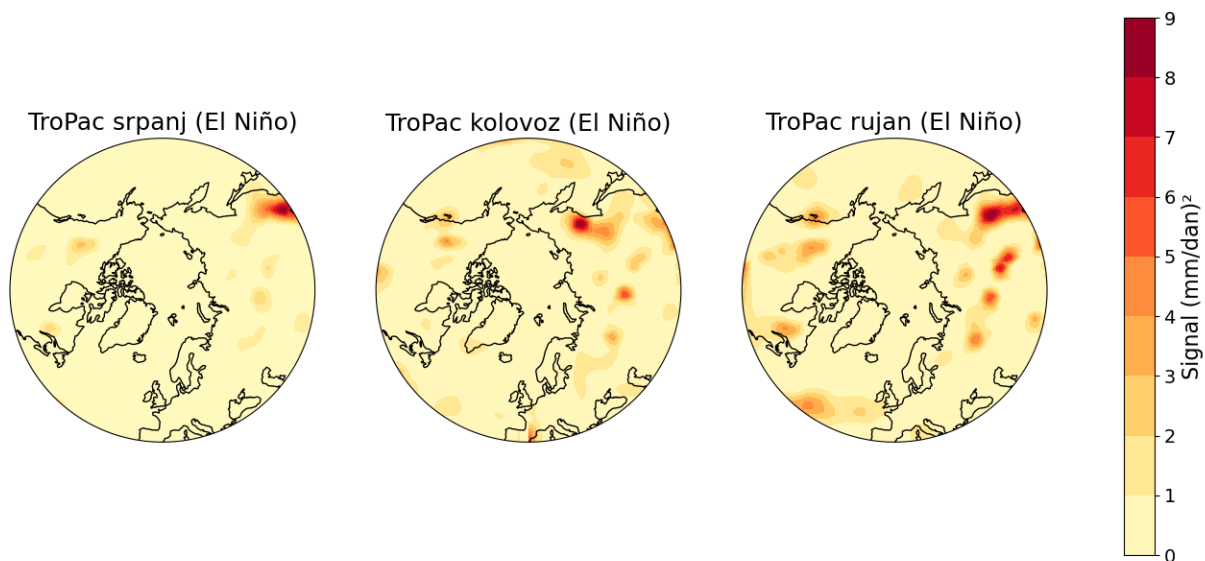


Slika 3.26 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroInd* u ne-ENSO godinama.

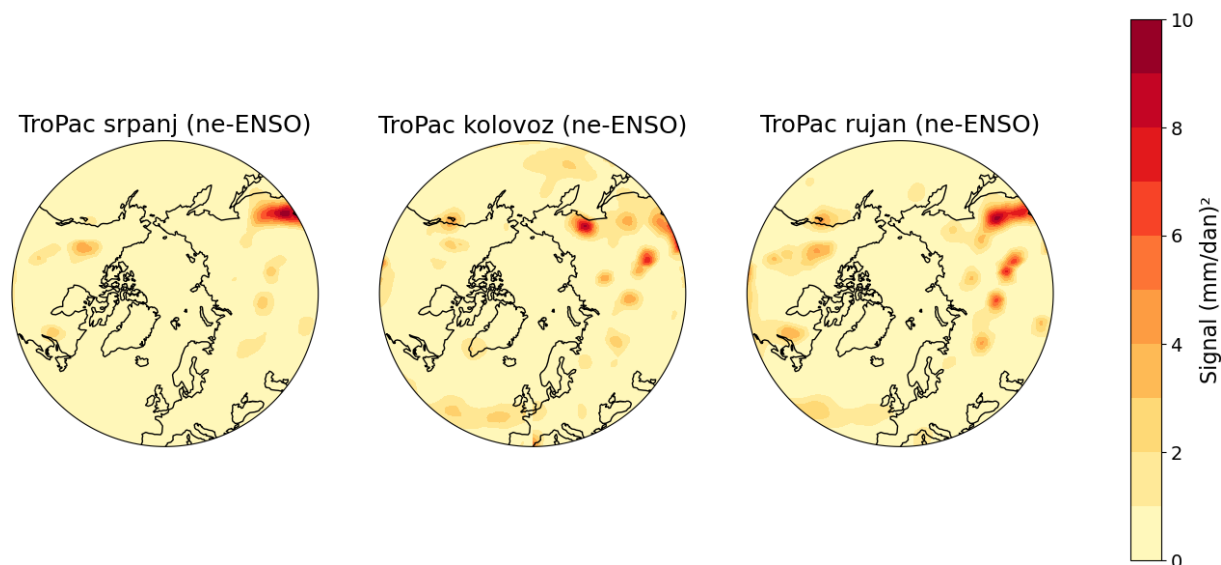


Slika 3.27 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *TroInd* u svim godinama.

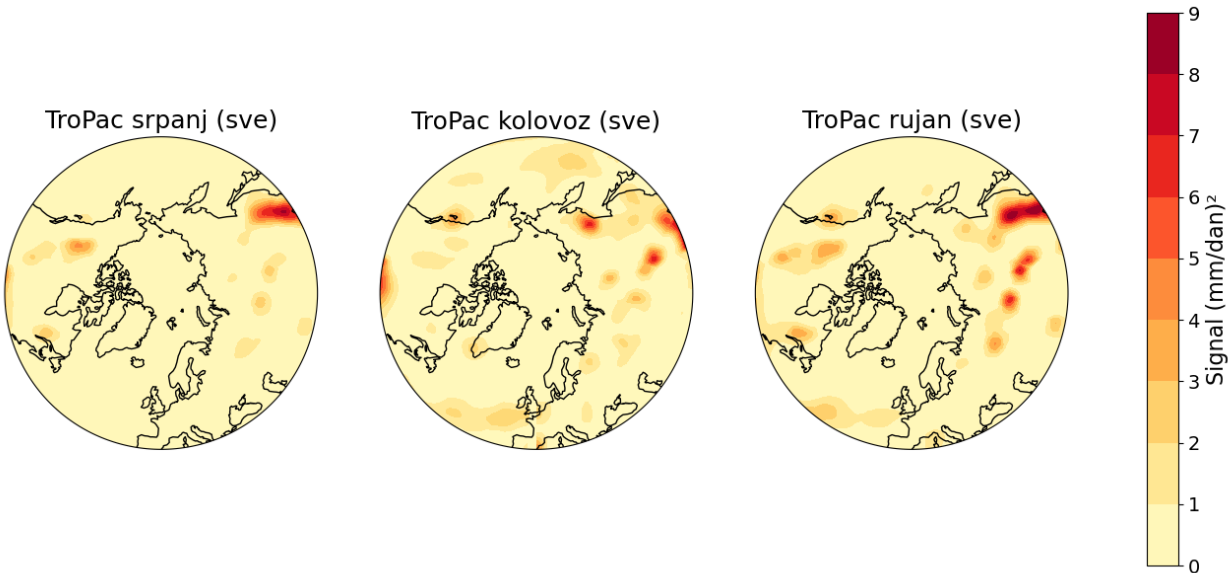
Posljednji dio tropskih oceanskih bazena koji je potrebno analizirati je tropski Pacifik. Na slici 3.28 prikazana su polja signala eksperimenta *TroPac* za El Niño godine, zatim slijede polja signala za ne-ENSO godine na slici 3.29 i polja signala za sve godine na slici 3.30. Ovi rezultati su sličniji rezultatima za eksperiment *TroAtl* nego za *TroInd*, ponajviše zbog toga što polje signala u kolovozu na sjeveroistoku Azije nije prigušeno, dok polja signala u srpnju i rujnu postoje u sva tri eksperimenta. Još jedna razlika u odnosu na *TroInd* je to što u kompozitima za *TroPac* nema gušenja signala u području PNA u kolovozu i rujnu. Rezultati su uglavnom vrlo slični eksperimentu *Clim*, no kao najveća razlika se ističe polje signala u području NAE za rujan u El Niño godinama. To polje signala u južnom dijelu područja NAE je jače čak i od signala za eksperiment u tropskom Atlantiku, dok je u eksperimentu *TroInd* ono bilo prigušeno. Također, signal na zapadu Kanade koji je bio izražen za tropski Indijski ocean, ovdje je prigušen kao i za eksperiment *TroAtl*. Kada se pogledaju kompoziti za ne-ENSO i sve godine, polje signala nad područjem NAE u rujnu je znatno slabije nego u El Niño godinama, dok je kod tropskog Atlantika razlika u jačini signala između kompozita manja. Možemo zaključiti kako tropski Atlantik i tropski Pacifik međudjeluju na način da jačaju, odnosno guše, signal oborine na istim područjima sjeverne hemisfere.



Slika 3.28 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroPac* u El Niño godinama.

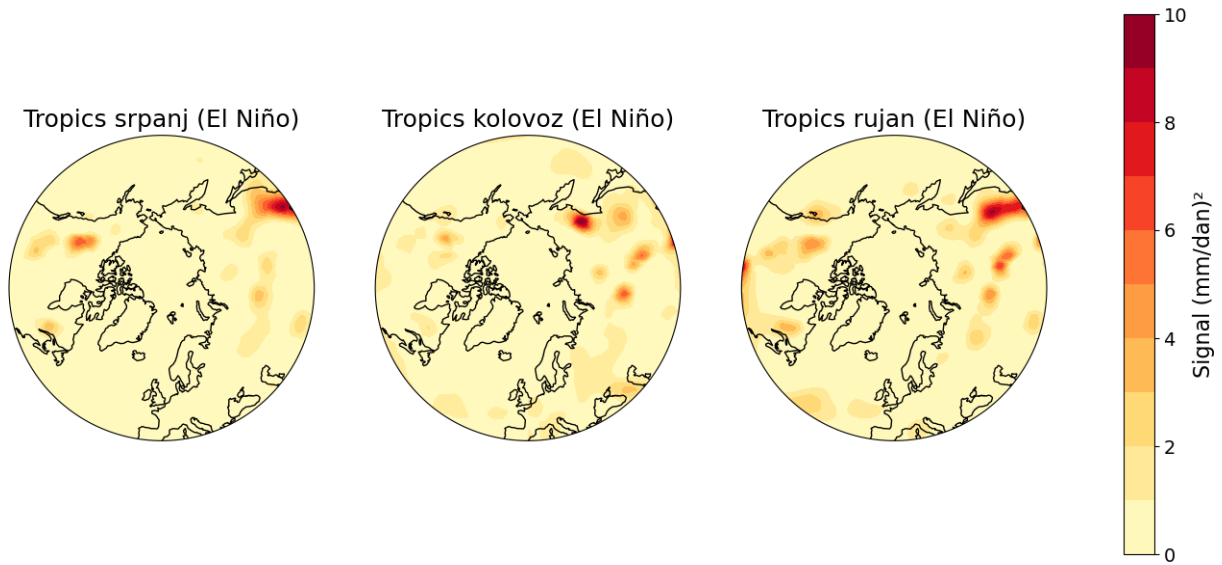


Slika 3.29 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *TroPac* u ne-ENSO godinama.

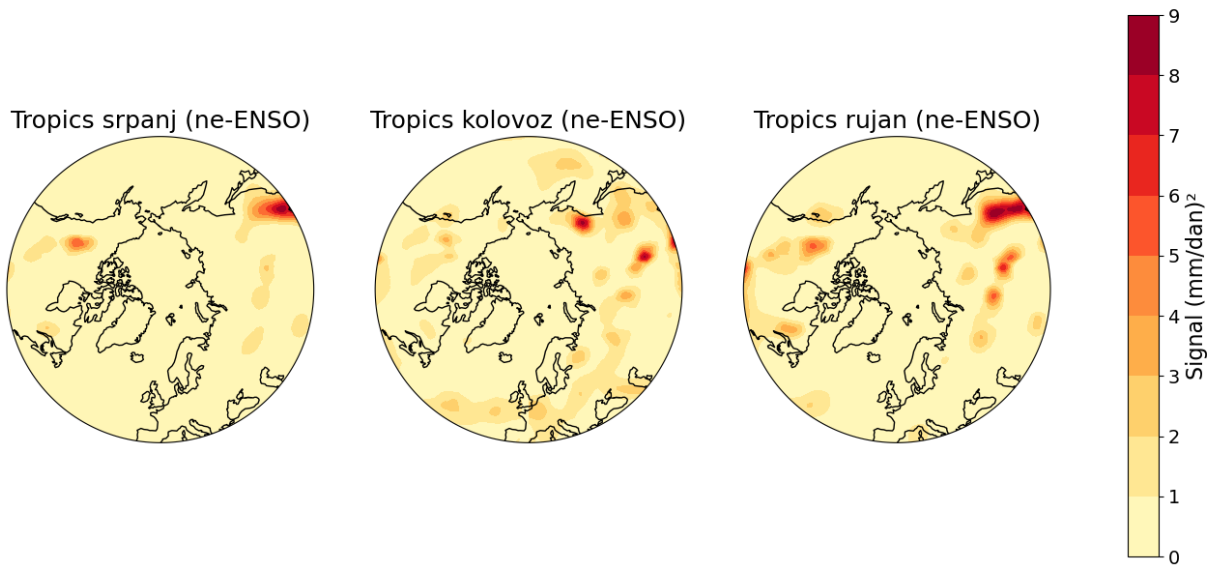


Slika 3.30 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *TroPac* u svim godinama.

Konačno, u posljednjem eksperimentu je razmatran utjecaj tropskih oceana kao cjeline. Na slici 3.31 su prikazana polja signala eksperimenta *Tropics* za El Niño godine, zatim slijede polja signala za ne-ENSO godine na slici 3.32 i polja signala za sve godine na slici 3.33. U svim kompozitima eksperimenta *Tropics* javljaju se uobičajeni obrasci signala na istoku Azije koje smo vidjeli u prošlim projekcijama za tropske oceane. Kada se pogledaju El Niño godine, vidimo da je u rujnu polje signala na južnom dijelu područja NAE puno slabije od polja signala iz eksperimenta *TroPac*. To znači da tropski Pacifik ima značajan utjecaj na NAE tijekom El Niño godina u rujnu, ali je taj utjecaj u međudjelovanju s ostalim tropskim oceanima poprilično oslabljen. Ovaj rezultat je i očekivan budući da se u rezultatima za eksperiment *TroInd* pokazalo da tropski Indijski ocean ima prigušujući učinak na taj signal u svim kompozitima. Iako tropski Indijski ocean ne podržava to polje signala, kod rezultata za tropski Atlantik je uočen signal umjerene jakosti, a u eksperimentu *TroPac* signal je još jači. Valja istaknuti kako za ne-ENSO i sve godine u kolovozu postoji širenje signala od Atlantika prema europskom kontinentu, dok u El Niño godinama takvog signala nema. Također, signal nad područjem PNA vrlo je slab u kolovozu i rujnu za sve kompozite, a najslabiji je baš u El Niño godinama. Dakle, kada se pogleda utjecaj tropskih oceana kao cjeline, signal oborine nad oceanskim područjima sjeverne hemisfere se nalazi ispod praga unutarnje varijabilnosti atmosfere, a najveći utjecaj je uočen u kompozitima za ne-ENSO godine u kolovozu.

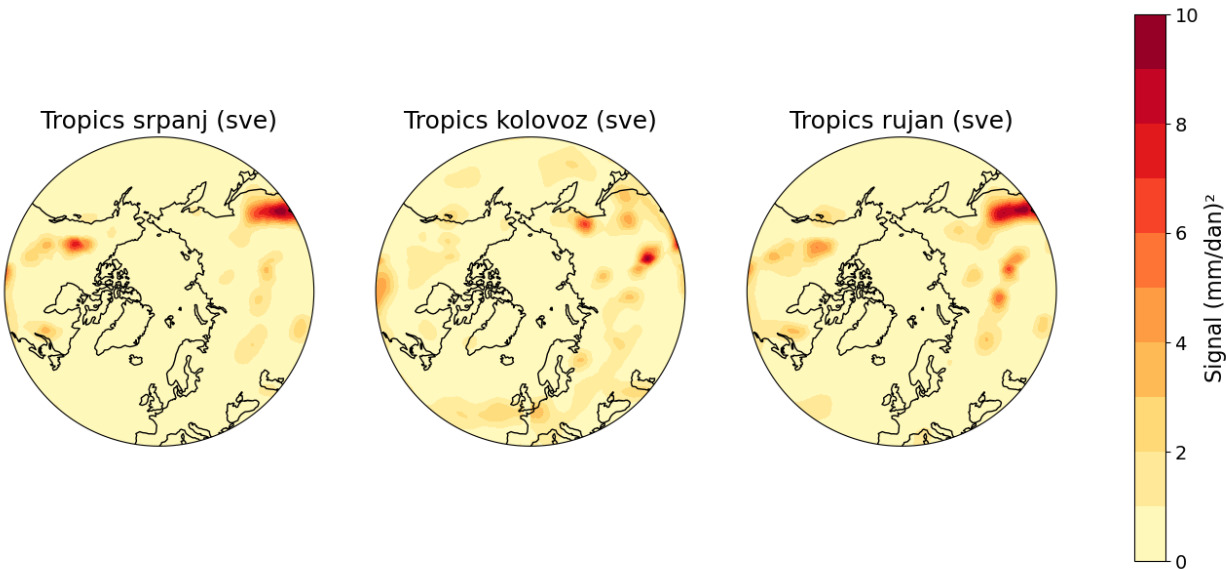


Slika 3.31 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *Tropics* u El Niño godinama.



Slika 3.32 Polja signala oborine [mm/dan]<sup>2</sup> dobivena eksperimentom *Tropics* u ne-ENSO godinama.





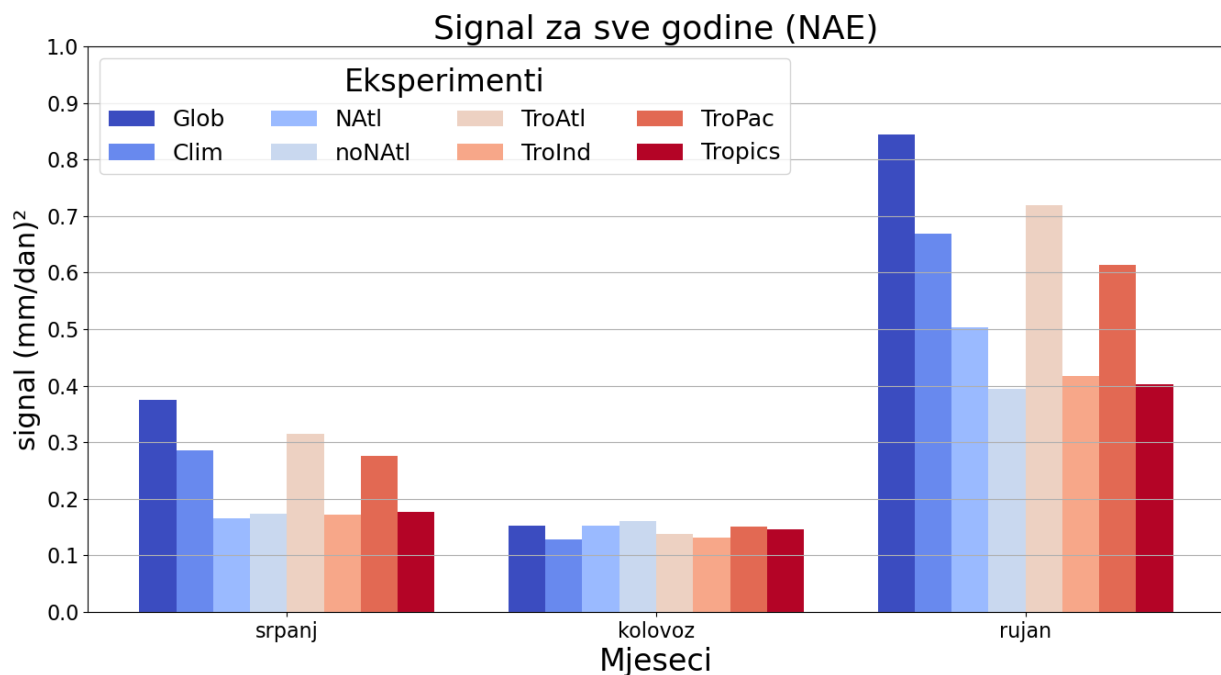
Slika 3.33 Polja signala oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  dobivena eksperimentom *Tropics* u svim godinama.

### 3.4 Histogrami signala oborine usrednjenog preko područja NAE i PNA

Na kraju, signal oborine u ljetnim mjesecima je usrednjen preko područja NAE i PNA za sve eksperimente, i po svim kompozitima. Rezultati su zasebno prikazani pomoću histograma mjesečnih vrijednosti. Na histogramima za El Niño i ne-ENSO godine je iznad svakog stupca napisan omjer El Niño (ne-ENSO) signala i signala za sve godine, a podebljane su one vrijednosti koje su veće od jedan. Dakle, prema podebljanim vrijednostima možemo lako uočiti koji od oceanskih bazena je imao veći utjecaj unutar određenog kompozita, u odnosu na utjecaj u svim godinama zajedno.

Rezultati usrednjavanja signala u području NAE u svim godinama prikazani su na slici 3.34, a s obzirom na rezultate prikazane na stereografskim projekcijama iz prethodnog potpoglavlja, veoma su očekivani. Najjači signal u svim eksperimentima je pronađen u mjesecu rujnu za eksperiment *Glob*, a kada se gledaju pojedini oceanski bazeni najveći utjecaj na oborinu područja NAE ima tropski Atlantik. To su ujedno i jedina dva signala koja premašuju signal eksperimenta *Clim* u srpnju i rujnu, dok svi ostali signali pokazuju manje vrijednosti. Signal u srpnju je općenito mnogo slabiji za sve eksperimente, ali ponovo je najveći utjecaj uočen za tropski Atlantik. Tijekom kolovoza signal je jako slab i poprilično ujednačen za sve eksperimente, odnosno u tom mjesecu nema značajnih utjecaja. Kada se gleda utjecaj oceanskih bazena bez sjevernog Atlantika u srpnju i rujnu, signal oborine je

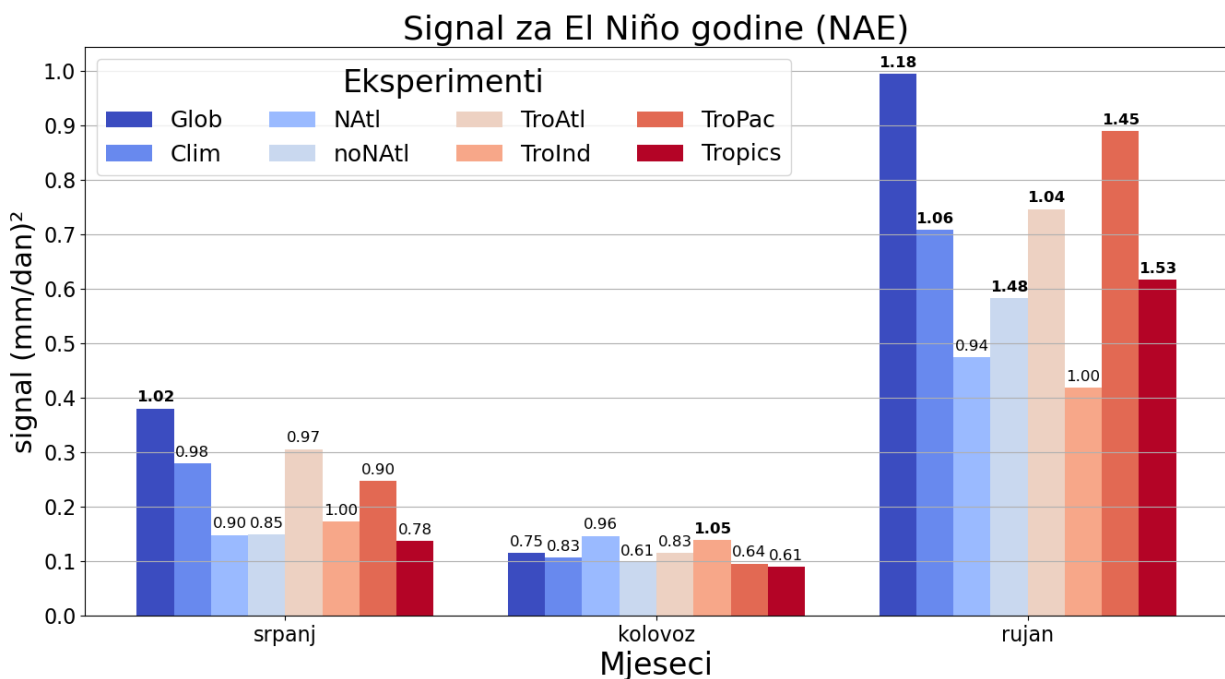
osjetno umanjen u odnosu na signal eksperimenta *Glob*, što znači da sjeverni Atlantik značajno doprinosi signalu oborine područja NAE. Nadalje, kada se u istim mjesecima pogledaju rezultati eksperimenta *Tropics*, vidimo da je taj utjecaj značajno manji od utjecaja tropskog Pacifika, ali i tropskog Atlantika, što potvrđuje da su utjecaji ta dva oceanska bazena prigušeni u međudjelovanju s ostatkom tropskih oceana.



Slika 3.34 Signal oborine [mm/dan]<sup>2</sup> u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja NAE za sve godine.

Histogrami signala oborine za El Niño godine prikazani su na slici 3.35 i prema podebljanim omjerima iznad stupaca histograma se može vidjeti da je najveći porast signala ostvaren u rujnu. Vrijednosti signala u svim eksperimentima su blago smanjene ili su ostale iste tijekom srpnja, dok tijekom kolovoza signali nisu smanjeni jedino u eksperimentu *TroInd*. Najveću vrijednost signala u rujnu ponovo nalazimo za signal eksperimenta *Glob*, no u ovim kompozitima tropski Pacifik ima najveći utjecaj na oborinu područja NAE od svih oceanskih bazena. Međutim, kada se gleda omjer El Niño signala i signala za sve godine, najviše se povećao signal eksperimenta *Tropics*. Za razliku od signala za rujnu u svim godinama, ovdje i tropski Pacifik i tropski Atlantik imaju veći signal od eksperimenta *Clim*. Dakle, tijekom El Niño godina nema značajnih promjena u srpnju, u kolovozu je signal oborine oceanskih bazena i manji nego signal za sve godine, ali je zato u

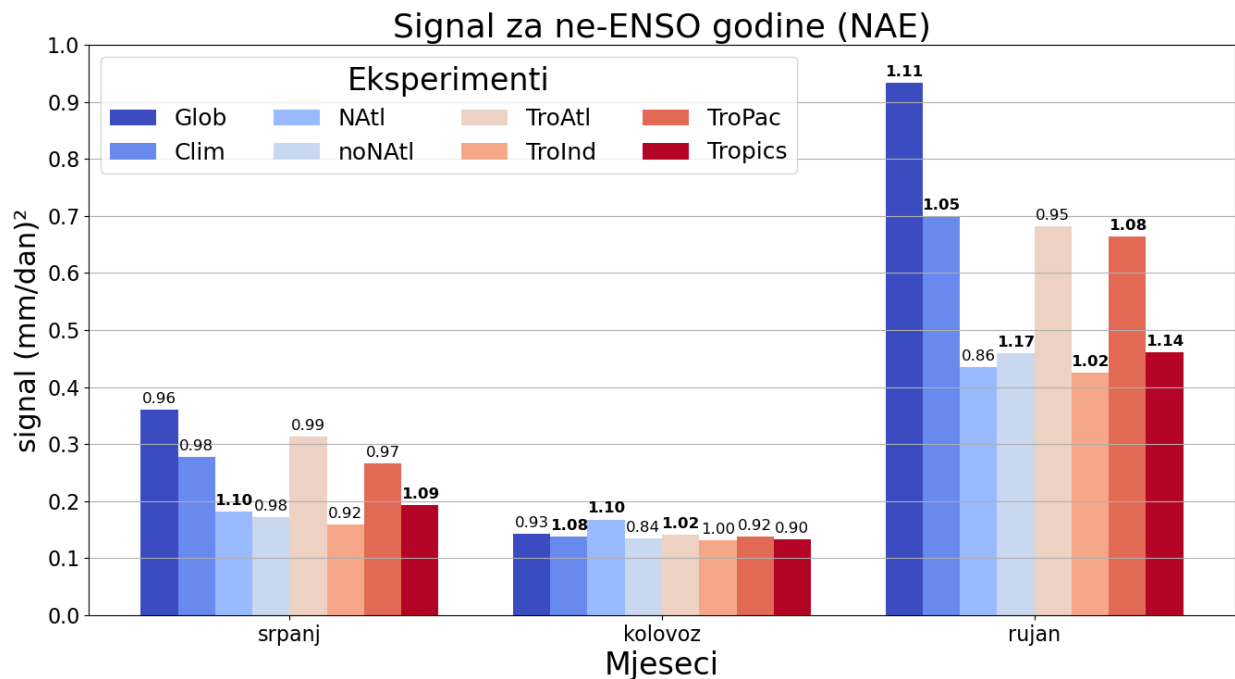
rujnu uočen značajan porast signala za eksperimente *Glob*, *NoNAtl*, *TroPac* i *Tropics*. Signal za eksperiment bez sjevernog Atlantika se znatno povećao, ali ipak nedovoljno da postane veći od signala za eksperiment *Clim*. Kao i u kompozitima za sve godine, signal za tropski Pacifik je i u ovom slučaju veći po vrijednosti od signala za sve tropske oceane, a ta razlika je još i izraženija kada se u obzir uzme da su signali za rujan općenito jači.



Slika 3.35 Signal oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja NAE za El Niño godine.

Na slici 3.36 su prikazani histogrami signala oborine za ne-ENSO godine i prvo što se primjećuje je to da su omjeri iznad stupaca puno manji nego u slučaju za El Niño godine. U srpnju jedino eksperimenti *NATl* i *Tropics* imaju povećanje u odnosu na signal u svim godinama, a međusobni odnosi između oceanskih bazena su ostali isti. Tijekom kolovoza se također nije puno toga promijenilo, signali eksperimenata *Clim* i *NATl* su se povećali, ali su to i dalje vrlo male vrijednosti. Najveći porast signala u odnosu na signal u svim godinama je imao eksperiment *NoNAtl* u rujnu, a tada su se još značajno povećali i eksperimenti *Glob* i *Tropics*. Međutim, samo signal eksperimenta *Glob* je veći od signala *Clim*, odnosno nijedan oceanski bazen nema utjecaj koji prelazi prag značajnosti. Budući da se vrijednosti signala u ne-ENSO godinama nisu puno promijenile u odnosu na signal u svim godinama, i budući da nema značajnih utjecaja tropskih oceanskih bazena na oborinu u rujnu, možemo zaključiti da se tijekom El Niño godina u atmosferi odvijaju procesi koji prenose utjecaje

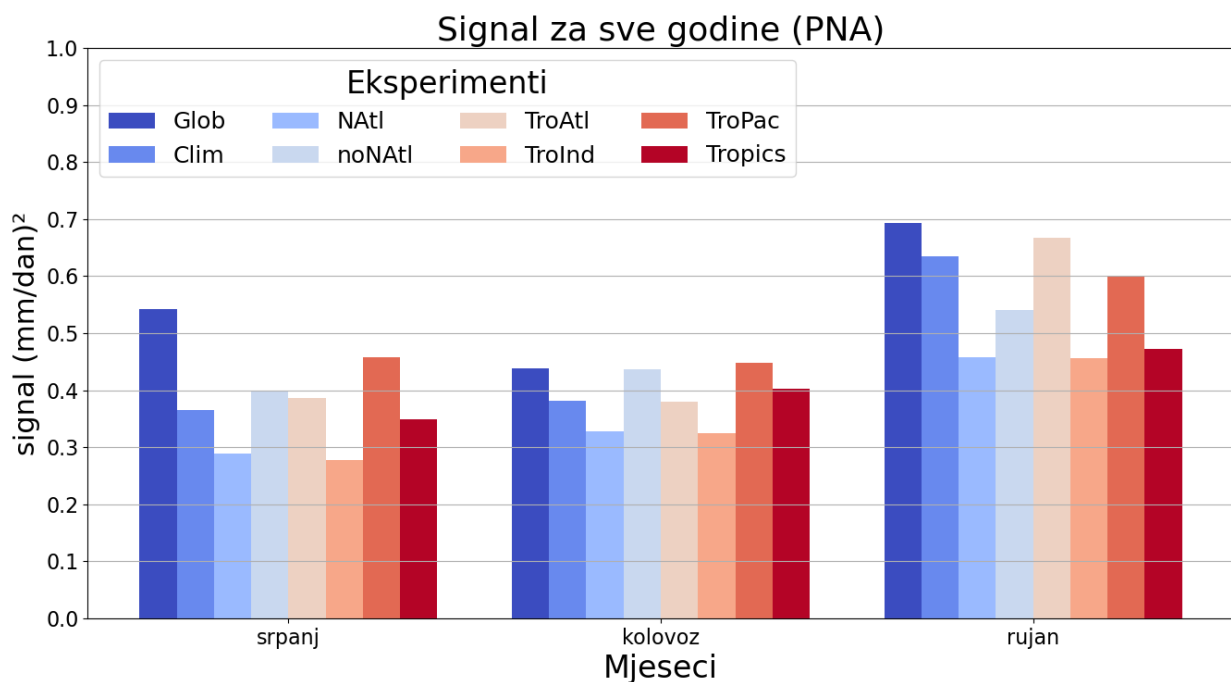
tropskog Atlantika i tropskog Pacifika do područja NAE, i tamo ostvaruju mjerljiv učinak na oborinu u rujnu.



Slika 3.36 Signal oborine  $[\text{mm/dan}]^2$  u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja NAE za ne-ENSO godine.

Rezultati usrednjavanja signala u području PNA u svim godinama prikazani su na slici 3.37. Pri usporedbi sa signalima svih godina u području NAE (slika 3.34), ovi signali pokazuju veće vrijednosti u srpnju i kolovozu, ali je zato signal u rujnu nešto slabiji. Eksperimenti *Glob*, *NoNATl*, *TroAtl* i *TroPac* prelaze prag značajnosti u srpnju, a isto vrijedi i za signale u kolovozu. Najveći utjecaj na oborinu od svih oceanskih bazena u ta dva mjeseca ima tropski Pacifik, a tijekom kolovoza je signal *TroPac* veći čak i od signala za eksperiment *Glob*. U rujnu samo eksperimenti *Glob* i *TroAtl* imaju vrijednosti veće od signala *Clim*, a najveći signal među oceanskim bazenima u tom mjesecu ima tropski Atlantik. Dakle, kada se gleda pojedinačni utjecaj oceanskih bazena na oborinu u rujnu, najveći utjecaj nad oba oceanska područja NAE i PNA ima tropski Atlantik. Kada se pogleda signal eksperimenta *NoNATl* u kolovozu, vidimo da je vrijednost tog signala otprilike jednaka vrijednosti signala *Glob*. Stoga, možemo zaključiti kako izuzimanje utjecaja sjevernog Atlantika iz globalnog utjecaja svih oceana neće imati nikakvog učinka na signal oborine područja PNA u kolovozu, dok je u srpnju i rujnu taj utjecaj uočljiv. Nadalje, u svim mjesecima je uočeno da je signal eksperimenta *Tropics* manji od signala za tropski Pacifik, baš kao i u području NAE,

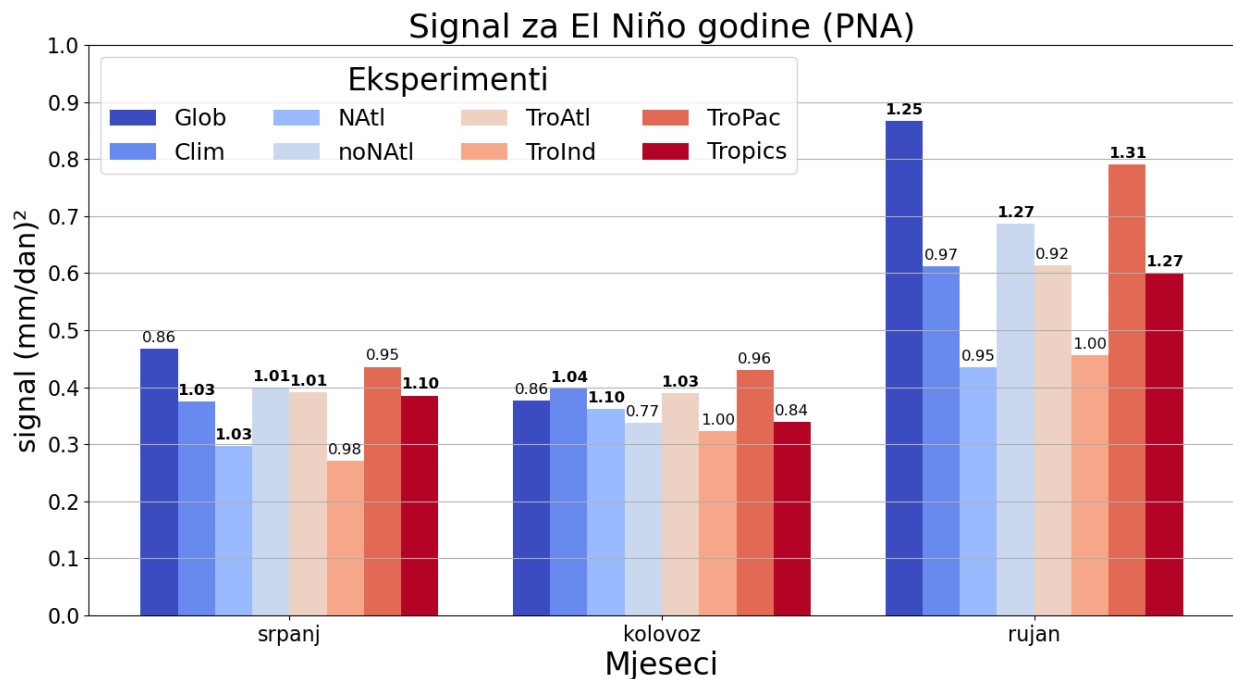
što znači da i u ovom oceanskom području dolazi do gušenja signala prilikom međudjelovanja tropskih oceana.



Slika 3.37 Signal oborine [mm/dan]² u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja PNA za sve godine.

Histogrami signala oborine za El Niño godine prikazani su na slici 3.38 i opet vidimo da su najveći omjeri iznad stupaca histograma ostvareni u rujnu. Situacija u srpnju se nije previše promijenila u odnosu na signale za sve godine, jedine značajne razlike su smanjenje signala eksperimenta *Glob* i povećanje signala u eksperimentu *Tropics*. Iako je uvećan u srpnju i rujnu, signal *Tropics* i dalje ne premašuje ni signal tropskog Atlantika ni signal tropskog Pacifika, ali je u srpnju postao veći od signala eksperimenta *Clim*. U kolovozu se značajno povećao samo signal eksperimenta *NATl*, dok su signali eksperimenata *Glob*, *NoNATl* i *Tropics* toliko prigušeni da više ne prelaze ni prag značajnosti. Dakle, u kolovozu je jedino signal tropskog Pacifika ostao veći od signala *Clim*, dok je najveća promjena u srpnju to što je signal *Tropics* premašio unutarnju varijabilnost i pokazao značajan utjecaj. Kada se pogledaju signali područja PNA za rujnu, vidimo da je signal *Glob* povećan nešto više u usporedbi sa signalom za područje NAE, ali su zato signali eksperimenata *NoNATl*, *TroPac* i *Tropics* znatno manje povećani, a signal *TroAtl* je čak i umanjen. Uz ove promjene u signalima za El Niño godine, signal tropskog Atlantika više ne prelazi prag značajnosti, ali ga sada uz signal *Glob* prelaze i signali eksperimenata *NoNATl* i *TroPac*. Signal tropskog

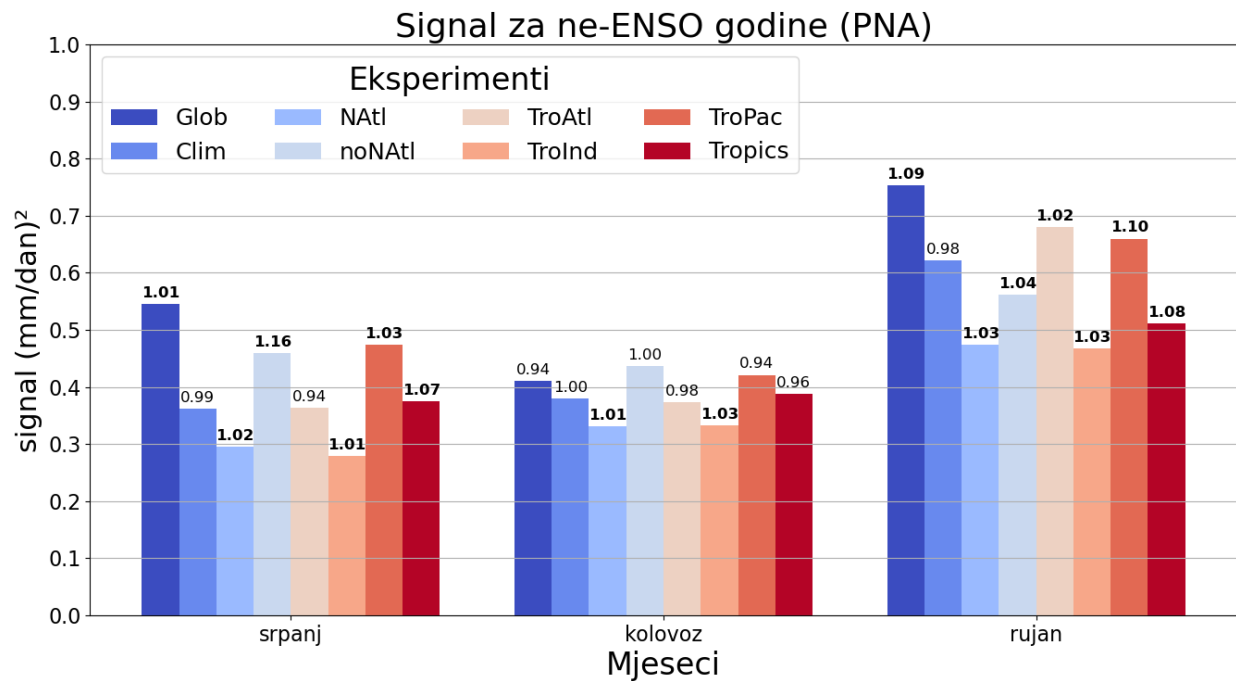
Pacifika u rujnu je najveći u usporedbi s drugim oceanskim bazenima i njegov porast u odnosu na signal za sve godine je također najveći.



Slika 3.38 Signal oborine [mm/dan]<sup>2</sup> u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja PNA za El Niño godine.

Konačno, na slici 3.39 prikazani su histogrami signala oborine za ne-ENSO godine. Kao ni kod signala u području NAE (slika 3.36), ni ovdje nema previše promjena u odnosu na signal za sve godine. Povećanja signala nisu toliko jaka kao u El Niño godinama, a najveći porast signala ima eksperiment *NoNATl* u srpnju. Uz značajan porast tog signala, u srpnju je povećan i signal eksperimenta *Tropics* koji premašuje prag značajnosti, dok ga umanjeni signal tropskog Atlantika više ne prelazi. U kolovozu ima najmanje promjena, svi signali su ostali vrlo slični signalima za sve godine i nema značajnih omjera signala niti za jedan eksperiment. Budući da su signali za El Niño godine u kolovozu pokazali razne promjene u vrijednostima, a u ne-ENSO godinama nema skoro nikakvih promjena, možemo zaključiti da promjene u oceanima vezane uz El Niño utječu na oborinu područja PNA u kolovozu. Svi signali u rujnu, osim signala *Clim*, su barem malo povećani u odnosu na signal u svim godinama, ali ta povećanja su mala u usporedbi s povećanjima signala u El Niño godinama. Signal tropskog Pacifika najviše je pojačan u rujnu te uz signale eksperimenata *Glob* i *TroAtl* prelazi prag značajnosti, ali najveći utjecaj od svih oceanskih bazena i dalje ima tropski

Atlantik. Kao i u svim dosadašnjim rezultatima, signal eksperimenta *Tropics* je manji od signala tropskog Pacifika u svim mjesecima, što još jednom potvrđuje konkurentsko djelovanje tropskih oceanskih bazena.



Slika 3.39 Signal oborine [mm/dan]<sup>2</sup> u ljetnim mjesecima usrednjen preko područja PNA za ne-ENSO godine

## 4. Zaključak

ENSO je mod klimatske varijabilnosti za kojeg se u dosadašnjim istraživanjima pokazalo da uglavnom ima slab utjecaj na klimatsku varijabilnost Europe u ljetnim mjesecima, a u ovom radu je pokazano da je taj utjecaj statistički značajan. Kako bi se tijekom godina aktivnosti ENSO-a ispitao utjecaj različitih oceanskih bazena na područja NAE i PNA u sezoni JAS, u ovom radu su korišteni podaci oborine koji su dobiveni numeričkim simulacijama modelom SPEEDY. Analizirani su rezultati simulacija osam eksperimenata, za razdoblje od 1855. – 2010. godine, koji se razlikuju samo po drugačije postavljenom donjem rubnom uvjetu, odnosno po vrijednostima anomalija SST-a u određenim oceanskim bazenima. Kako bi se godine iz ovog razdoblja mogle svrstati u ENSO godine i ne-ENSO godine, korišten je indeks Niño 3.4 koji je dobiven usrednjavanjem anomalija SST-a preko područja Niño 3.4 u središnjem ekvatorijalnom Pacifiku. Na temelju vrijednosti indeksa Niño 3.4 je određeno koje su godine imale El Niño događaj i polja signala oborine su prema tom kriteriju podijeljena u različite kompozite. Promatrano je područje sjeverne hemisfere od 40°N do 90°N, a poseban naglasak je stavljen na oceanska područja NAE i PNA.

Cilj ovog rada bio je analizirati utjecaj različitih oceanskih bazena na oborinu sjeverne hemisfere u sezoni JAS i saznati kako se taj utjecaj mijenja tijekom El Niño godina. U analizi anomalija oborine po eksperimentima je uočeno da svjetski oceani kao cjelina ostvaruju najveći utjecaj na oborinu, ali je taj utjecaj sam po sebi vrlo slab. Nadalje, utvrđeno je da model ne simulira značajan utjecaj Atlantika na ENSO signal oborine sjeverne hemisfere, ali se njegov utjecaj može amplificirati u međudjelovanju s drugim oceanskim bazenima. Također, ustanovljeno je da je utjecaj tropskog Pacifika prevladavajuć u odnosu na ostatak tropskih oceana te da je utjecaj tropskih oceana kao cjeline značajniji od utjecaja sjevernog Atlantika.

Polja signala oborine na sjevernoj hemisferi pokazuju da tropski Atlantik ima najveći utjecaj na oborinu područja NAE kada se promatraju sve godine. Međutim, kada se promatraju samo El Niño godine, tada tropski Pacifik ima najviše utjecaja na oborinu. Sjeverni Atlantik nije pokazao značajne utjecaje na oborinu, ali je primijećeno da u međudjelovanju s drugim oceanskim bazenima značajno doprinosi signalu oborine na sjevernoj hemisferi. Vrijednosti signala oborine dobivenih u ovom radu su vrlo male, ali su u skladu s istraživanjem Shamana (2014), u kojem je utvrđeno da je tijekom sezone JAS utjecaj El Niña na područje NAE marginalan. Analizom histograma usrednjenog signala preko područja NAE i PNA otkriveni su relativni odnosi oceanskih bazena između kompozita. Signali oborine su u oba područja pokazali značajan porast tijekom El Niño godina u rujnu, na temelju čega je zaključeno da se tijekom El Niño godina utjecaji tropskih oceana daljinskim vezama prenose do područja NAE i PNA, gdje ostvaruju zamjetan učinak



na oborinu. U srpnju i kolovozu uglavnom nema značajnih povećanja signala oborine tijekom El Niño godina, a u nekim eksperimentima su čak primijećena i velika gušenja signala.

Rezultati ovog rada su pokazali da je statistički značajan utjecaj ENSO-a na oborinu oceanskih područja sjeverne hemisfere uočljiv u rujnu, iako je po vrijednosti signal relativno slab. Dodatno, otkriveno je da za vrijeme El Niño događaja tropski Pacifik postaje oceanski bazen s prevladavajućim utjecajem na oborinu područja NAE i PNA u rujnu. Kako bi se zaključci dobiveni u ovom radu potvrdili, potrebno je primijeniti prikazanu analizu na neki drugi skup podataka SST-a ili koristiti numeričke simulacije modelom veće složenosti.

# Literatura

- Abid, M. A., Kucharski, F., Molteni, F., Kang, I. S., Tompkins, A. M., Almazroui, M. (2020): Separating the Indian and Pacific Ocean impacts on the Euro-Atlantic response to ENSO and its transition from early to late winter. *Journal of Climate* 34(4), 1531-1548
- Alexander, M. A., Blade, I., Newman, M., Lanzante, J. R., Lau, N. C., Scott, J. D. (2002): The atmospheric bridge: The influence of ENSO teleconnections on air-sea interaction over the global oceans. *Journal of Climate* 15 (16), 2205-2231
- Berlage, H. P. (1957): Fluctuations in the general atmospheric circulation of more than one year, their nature and prognostic value. *Mededelingen ev verhandelingen* 69, 1-152
- Berlage, H. P. (1966): The Southern Oscillation and world weather. *Mededelingen ev verhandelingen* 88, 1-152
- Bjerknes, J. (1966): A possible response of the atmospheric Hadley circulation to equatorial anomalies of ocean temperature. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 18(4), 820-829
- Bjerknes, J. (1969): Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific. *Monthly Weather Review* 97(3), 163-172
- Branković, Č., Molteni, F. (2004): Seasonal climate variability of the ECMWF ERA-40 model. *Climate Dynamics* 22(2-3), 139-155
- Brönnimann, S. (2007): Impact of El Niño-Southern Oscillation on European climate. *Reviews of Geophysics* 45(3), 1-28
- Carlowicz, M., Schollaert-Uz, S. (2017): *El Niño*. NASA Earth Observatory. Dostupno na: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/ElNino> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- Chang, E. K. M., Lee, S., Swanson, K. L. (2002): Storm track dynamics. *Journal of Climate* 15(16), 2163-2183
- Chapman, W. E., Subramanian, A. C., Xie, S. P., Sierks, M. D., Ralph, F. M., Kamae, Y. (2021): Monthly modulations of ENSO teleconnections: Implications for potential predictability in North America. *Journal of Climate* 34(14), 5899-5921
- Di Carlo, E., Ruggieri, P., Davini, P., Tibaldi, S., Corti, S. (2022): ENSO teleconnections and atmospheric mean state in idealised simulations. *Climate Dynamics* 59(11-12), 3287-3304

- Ding, Q., Wang, B., Wallace, J. M., Branstator, G. (2011): Tropical-extratropical teleconnections in boreal summer: Observed interannual variability. *Journal of Climate* 24(7), 1878-1896
- Domeisen, D. I. V., Garfinkel, C. I., Butler, A. H. (2018): The teleconnection of El Niño Southern Oscillation to the stratosphere. *Reviews of Geophysics* 57(1), 5-47
- Fuentes-Franco, R., Koenigk, T. (2020): Identifying remote sources of interannual variability for summer precipitation over Nordic European countries tied to global teleconnection wave patterns. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 72(1), 1-15
- Greatbatch, R. J., Lu, J., Peterson, K. A. (2004): Nonstationary impact of ENSO on Euro-Atlantic winter climate. *Geophysical Research Letters* 31(2), 2208-2211
- Herceg-Bulić, I., Kucharski, F. (2011): Delayed ENSO impact on spring precipitation over North/Atlantic European region. *Climate Dynamics* 38(11-12), 2593-2612
- Herceg-Bulić, I., Kucharski, F. (2014): North Atlantic SSTs as a link between the wintertime NAO and the following spring climate. *Journal of Climate* 27(1), 186-201
- Herceg-Bulić, I., Mezzina, B., Kucharski, F., Ruggieri, P., King, M. P. (2017): Wintertime ENSO influence on late spring European climate: The stratospheric response and the role of North Atlantic SST. *International Journal of Climatology* 37(1), 87-108
- Herceg-Bulić, I., Ivasić, S., Popović, M. (2023): Impact of tropical SSTs on the late-winter signal over the North Atlantic-European region and contribution of midlatitude Atlantic. *npj Climate and Atmospheric Science* 6(1), 1-15
- Ionita, M., Lohmann, G., Rimbu, N., Chelcea, S., Dima, M. (2012): Interannual to decadal summer drought variability over Europe and its relationship to global sea surface temperature. *Climate Dynamics* 38(1), 363-377
- King, M. P., Yu, E., Sillmann J. (2020): Impact of strong and extreme El Niños on European hydroclimate. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 72(1), 1-10
- Kucharski, F., Molteni, F., Bracco, A. (2006): Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Climate Dynamics* 26(1), 79-91
- 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. *Bulletin of the American Meteorological Society* 94(1), 25-30
- Kushnir, Y., Robinson, W. A., Bladé, I., Hall, N. M. J., Peng, S., Sutton, R. (2002): Atmospheric GCM response to extratropical SST anomalies: Synthesis and evaluation. *Journal of Climate* 15(16), 2233-2256

- Li, Y., Lau, N. C. (2012): Contributions of downstream eddy development to the teleconnection between ENSO and the atmospheric circulation over the North Atlantic. *Journal of Climate* 25(14), 4993-5010
- Lopez, H., Kirtman, B. P. (2018): ENSO influence over the Pacific North American sector: Uncertainty due to atmospheric internal variability. *Climate Dynamics* 52(9), 6149-6172
- Marshall, J., Plumb, R. A. (2008): El Niño and the Southern Oscillation. *Atmosphere, ocean, and climate dynamics: An introductory text*. Amsterdam; Boston; Heidelberg: Elsevier Academic Press, str. 264-273.
- Martija-Díez, M., Rodríguez-Fonseca, B., López-Parages, J. (2021): ENSO influence on western European summer and fall temperatures. *Journal of Climate* 34(19), 8013-8031
- Martija-Díez, M., López-Parages, J., Rodríguez-Fonseca, B., Losada, T. (2022): The stationarity of the ENSO teleconnection in European summer rainfall. *Climate Dynamics* 61(21), 489-506
- McGregor, G. R., Ebi, K. (2018): El Niño Southern Oscillation (ENSO) and health: An overview for climate and health researchers. *Atmosphere* 9(7), 1-32
- Molteni, F., Ferranti, L., Palmer, T. N., Viterbo, P. A. (1993): A dynamical interpretation of the global response to equatorial Pacific SST anomalies. *Journal of Climate* 6(5), 777-795
- Nakamura, H., Sampe, T., Tanimoto, Y., Shimpo, A. (2004): Observed associations among storm tracks, jet streams and midlatitude oceanic fronts. *Geophysical Monograph Series* 147, 329-345
- Philander, S. G. (1998): A review of tropical ocean-atmosphere interactions. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography* 51(1), 71-90
- Rasmusson, E. M., Carpenter, T. H. (1982): Variations in tropical sea surface temperature and surface wind fields associated with the Southern Oscillation/El Niño. *Monthly Weather Review* 110(5), 354-384
- Rodríguez-Fonseca, B., Suárez-Moreno, R., Ayarzagüena, B., López-Parages, J., Gómara, I., Villamayor, J., Mohino, E., Losada, T., Castaño-Tierno, A. (2016): A review of ENSO influence on the North Atlantic. A non-stationary signal. *Atmosphere* 7(7), 1-19
- Ropelewski, C. F., Halpert, M. S. (1987): Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115(8), 1606-1626
- Shaman, J. (2014): The seasonal effects of ENSO on European precipitation: Observational analysis. *Journal of Climate* 27(17), 6423-6438

- Smith, T. M., Reynolds, R. W., Peterson, T. C., Lawrimore, J. (2008): Improvements to NOAA's historical merged land-ocean surface temperature analysis (1880-2006). *Journal of Climate* 21(10), 2283-2296
- Trenberth, K. E., Stepaniak, D. P. (2001): Indices of El Niño evolution. *Journal of Climate* 14(8), 1697-1701
- Trenberth, K. E. (2016): *The Climate Data Guide: Nino SST indices (Nino 1+2, 3, 3.4, 4, ONI and TNI)*. Boulder, Colorado. National Centre for Atmospheric Research. Dostupno na: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/nino-sst-indices-nino-12-3-34-4-oni-and-tni> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- URL1: EarthHow - El Niño vs. La Niña: What's the Difference?, <https://earthhow.com/el-nino-la-nina/> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- URL2: NOAA - Climate Prediction Center: North Atlantic Oscillation (NAO), <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/nao.shtml> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- URL3: NOAA - Climate Prediction Center: Pacific/North American (PNA), <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- URL4: NOAA - National Centres for Environmental Information: El Niño/Southern Oscillation, <https://www.ncei.noaa.gov/access/monitoring/enso/sst> [Posljednji put pristupljeno 12. rujna 2024.]
- van Loon, H., Madden, R. A. (1981): The Southern Oscillation. Part I: Global associations with pressure and temperature in northern winter. *Monthly Weather Review* 109(6), 1150-1162
- Walker, G. T., Bliss, E. (1932): World Weather V. *Memoirs of the Royal Meteorological Society* 4(36), 53-84.
- Wang, C., Fiedler, P. C. (2006): ENSO variability and the eastern tropical Pacific: A review. *Progress in Oceanography* 69(2-4), 239-266
- Zhang, W., Mei, X., Geng, X., Turner, A. G., Jin, F. F. (2019): A nonstationary ENSO-NAO relationship due to AMO modulation. *Journal of Climate* 32(1), 33-43