Analiza utjecaja Sjeverno-atlanske oscilacije i El Nino-Južne oscilacije na klimatska obilježja Europe

Muić, Ines

Master's thesis / Diplomski rad

2018

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

Permanent link / Trajna poveznica: https://urn.nsk.hr/urn:nbn:hr:217:082680

Rights / Prava: In copyright / Zaštićeno autorskim pravom.

Download date / Datum preuzimanja: **2024-03-29**

Repository / Repozitorij:

Repository of the Faculty of Science - University of Zagreb

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ines Muić

UTJECAJ SJEVERNO-ATLANTSKE OSCILACIJE I EL NIÑO-JUŽNE OSCILACIJE NA KLIMATSKU VARIJABILNOST EUROPE

Diplomski rad

Zagreb, 2018.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Ines Muić

Diplomski rad

UTJECAJ SJEVERNO-ATLANTSKE OSCILACIJE I EL NIÑO-JUŽNE OSCILACIJE NA KLIMATSKU VARIJABILNOST EUROPE

Voditeljica: doc. dr. sc. Ivana Herceg Bulić

Zagreb, 2018.

Zahvaljujem se mentorici doc. dr. sc. Ivani Herceg Bulić na svim savjetima, pomoći i razumijevanju pri izradi ovog diplomskig rada. Htjela bi se ovim putem zahvaliti svim svojim profesoricama i profesorima na geofizičkom odsjeku na susretljivosti i svom znanju koje su mi prenjeli.

Želim se zahvaliti svojim kolegama Branimiru, Sari, Ivani C., Agnezi, Josipi i Ivani M. na prijateljstvu, podršci i pomoći tijekom studiranja te svojim prijateljima Anji, Ani, Vlacu, Željki i Maji što su bili uz mene u teškim i dobrim trenutcima.

Na kraju, želim reći hvala Goranu i svojoj obitelji što su stajali iza mene i financijski i kao moralna podrška u baš svakom trenutku.

Sažetak

NAO je najintenzivniji mod klimatske varijabilnosti na sjevernoj hemisferi s izrazitim utjecajem na klimatsku varijabilnost Europe, dok se za utjecaj ENSO-a pokazalo da ima slab, ali statistički značajan utjecaj na to područje. Utjecaj tih pojava na klimatska polja geopotencijalne visine izobarne plohe od 200 hPa (GH200), ukupne oborine, temperature na izobarnim plohama od 925 hPa (T925) i 30 hPa (T30) ispitivan je analizom ansambla numeričkih simulacija modelom SPEEDY za razdoblje 1854.-2010. godine. Napravljena je analiza po skupovima događaja na temelju vrijednosti NAO indeksa i NINO3.4 indeksa pri čemu su sve godine iz razmatranog razdoblja kategorizirane u skupove neutralnih, umjerenih i jakih pojava. Uočeno je da se pozitivna faza NAO događaja događa češće u kasnoj zimi uz prisutnu La Niña, a negativna se faza NAO događaja češće javlja uz El Niño događaj. Utjecaj pozitivnog NAO-a na polja GH200 i T30 pojačan je signalom negativnog ENSO-a, a oslabljen signalom pozitivnog ENSO-a. Polje anomalija oborine je u skladu s poljem anomalija GH200. Utjecaj ENSO-a na polje oborine nije uočeno za umjereno/jako pozitivan ili negativan NAO nad područjem NAE. Uočen je i utjecaj ENSO-a na polje T925. Polja parametara za kategoriju kada je jedna pojava neutralna uspoređene su s poljima dobivenim reanalizom NCEP - NCAR i pokazano je dobro slaganje sa signalom NAO-a, dok je za ENSO signal uočeno određeno nepodudaranje.

Popis kratica

ECMWF - Europski centar za srednjoročne prognoze (eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts*)

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

(ENSO-) - Umjerena negativna El Niño - južna oscilacija

(ENSO--) - Jaka negativna El Niño - južna oscilacija

(ENSO0) - Neutralna El Niño - južna oscilacija

(ENSO+) - Umjerena pozitivna El Niño - južna oscilacija

(ENSO++) - Jaka pozitivna El Niño - južna oscilacija

EOF - Empirijska ortogonalna funkcija (eng. *Empirical Ortogonal Function*)

ERA - Europska reanaliza Europskog centra za srednjoročne prognoze (eng. *European Reanalysis*)

GH200 - Geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa

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

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

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

(NAO-) - Umjerena negativna Sjeverno - Atlantska oscilacija

(NAO--) - Jaka negativna Sjeverno - Atlantska oscilacija

(NAO0) - Neutralna Sjeverno - Atlantska oscilacija

(NAO+) - Umjerena pozitivna Sjeverno - Atlantska oscilacija

(NAO++) - Jaka pozitivna Sjeverno - Atlantska oscilacija

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

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

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

PC - Glavna (vremenska) komponenta (eng. *Principal Component*, PC)

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

SAD - Sjedinjene Američke Države

SPEEDY - eng. Simplified Parametrizations primitivE-Equation DYnamics

SO - Južna oscilacija (eng. *Southern Oscillation*)

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

SST - Površinska temperatura mora (eng. *Sea Surface Temperature*)

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

T925 - Temperatura na izobarnoj plohi 925 hPa

T30 - Temperatura na izobarnoj plohi 30 hPa

Sadržaj

1 Uvod 1

1.1 Sjeverno-Atlantska oscilacija (NAO) 1

1.1.1 Atmosferski odziv na NAO 2

1.2 El Niño - Južna oscilacija (ENSO) 3

1.2.1 Atmosferski odziv na ENSO 5

1.3 Mehanizmi daljinskih veza 7

1.4 Cilj rada 8

2 Podaci i metode 9

2.1 Numerički model SPEEDY 9

2.1.1 Fizikalne parametrizacije modela 10

2.1.2 Ansambl numeričkih simulacija 11

2.2 Određivanje NAO indeksa 12

2.2.1 Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija 12

2.2.2 NAO indeks 13

2.3 Određivanje NINO3.4 indeksa 14

2.4 Analiza po skupovima događaja 14

2.5 NCEP-NCAR reanaliza 17

3 Rezultati i rasprava 18

3.1 Geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa 18

3.2 Oborina 29

3.3 Temperatura na izobarnoj plohi od 925 hPa 37

3.4 Temperatura na izobarnoj plohi od 30 hPa 46

4 Zaključak 55

Literatura 57

1 Uvod

1.1 *Sjeverno-Atlantska oscilacija (NAO)*

Sjeverno - Atlantska oscilacija (eng. *North Atlantic Oscillation*, NAO) je najznačajniji mod klimatske varijabilnosti na sjevernoj hemisferi, a najizraženiji je zimi. NAO je jedino polje odziva na sjevernoj hemisferi prisutno tijekom cijele godine iako se njegova prostorna raspodjela mijenja (Barnston i Liverzey, 1987.). NAO predstavlja sinkronizirano kolebanje prizemnog tlaka zraka (veći/manji od uobičajenog) na području iznad Islanda i Azora. Promjena iz pozitivne u negativnu fazu NAO-a uzrokuje promjene u brzini i smjeru vjetra nad Atlantikom, transportu vlažnosti i topline između Atlantika i susjednih kontinenata te promjene u broju, intenzitetu i putanjama oluja i vremena koje ih prati (Hurrell i sur., 2003.). Iako su obilježja Sjeverno - Atlantske oscilacije dobro opisana i dokumentirana, još uvijek ne poznajemo detaljno sve mehanizme koji ju uzrokuju (Stephenson i sur., 2003.). Postoje mnogi dokazi da je NAO primarno posljedica internih nelinearnih atmosferskih procesa zbog čega se faza i amplituda NAO-a ne mogu prognozirati, no postoje i dokazi da vanjski faktori kao što su vulkanski aerosol, antropogeni utjecaj na sastav atmosfere i promjene u sunčevoj aktivnosti mogu utjecati na amplitudu i fazu (Gillett i sur., 2003.). Mehanizmi poput interakcije između atmosfere i podloge, troposfere i stratosfere te međudjelovanje oceana i atmosfere mogu pridonijeti komponenti varijabilnosti niske frekvencije NAO-a tako da je ipak moguća ograničena prognoza. Bolje razumijevanje mehanizama koji kontroliraju i utječu na NAO je ključno za trenutnu debatu o klimatskoj varijabilnosti i klimatskim promjenama (Gillett i sur., 2003.).

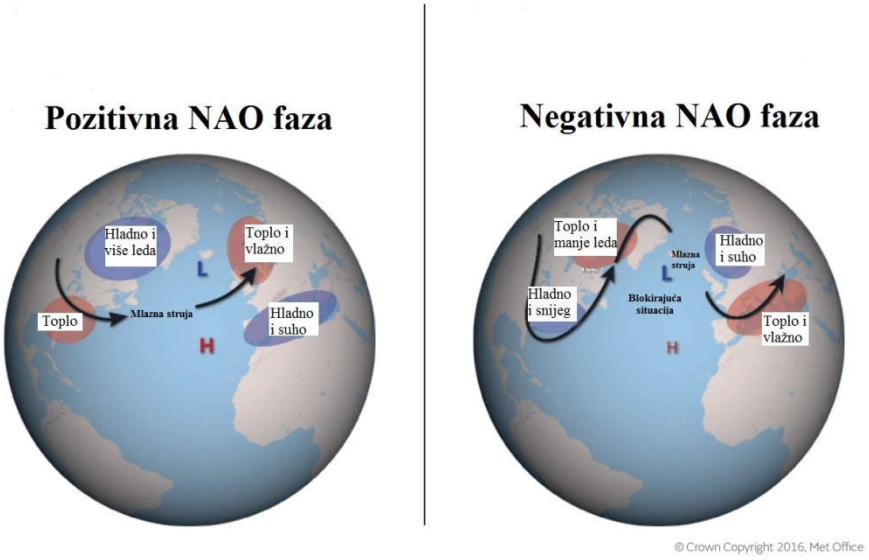
Varijabilnost NAO-a u vremenu možemo predočiti prikazom NAO indeksa. Postoji mnogo različitih NAO indeksa koji se danas koriste u istraživanjima. Jedna skupina indeksa računa se kao razlika između normaliziranih zimskih anomalija tlaka zraka na dvjema postajama reprezentativnim za Islandski minimum i Azorski maksimum (Rogers, 1984.; Hurrell, 1995.). Prednost ovakvih indeksa je dugačak niz dostupnih podataka (od sredine 19. st.), a nedostaci su to što indeksi ne prate sezonske pomake centara tlaka jer su postaje fiksne i podaci mogu sadržavati šum zbog meteoroloških pojava male skale i tranzijentnih poremećaja koji nisu povezani s NAO-om. Druga skupina indeksa određena je kao vremenski niz glavne komponente PC (eng. *Principal Components*) vodećeg EOF moda (eng. *Empirical Orthogonal Functions analysis*) izračunatog za anomalije tlaka na srednjoj razini mora iznad Atlantika (vidi poglavlje 2.2.1). Prednost ove metode je to što tako izračunati indeksi bolje

obuhvaćaju prostorno polje NAO-a. Nedostatak je to što su podaci dostupni za kraće vremensko razdoblje jer su interpolirani na određenu mrežu, ovisno o izvoru podataka (Hurrell, 2003.).

1.1.1 Atmosferski odziv na NAO

Pozitivna faza NAO-a očituje se u višem prizemnom tlaku zraka od uobičajenog nad područjem iznad Azora i nižem prizemnom tlaku od uobičajenog nad područjem iznad Islanda. Pozitivna faza povezana je s jačom (od uobičajene) zapadnom strujom iznad srednjih geografskih širina Atlantika koja prema sjeverozapadnoj Europi nosi relativno topliji i vlažniji morski zrak. Pojačani sjeverni vjetar iznad sjeveroistočne Kanade i Grenlanda nosi hladniji i suhi zrak smanjujući temperaturu nad kopnom i površinsku temperaturu mora (eng. *Sea Surface Temperature*, SST) iznad Atlantika. Uočeno je i zagrijavanje iznad jugoistočne Sjeverne Amerike te suši uvjeti i zahlađenje nad Mediteranom, sjevernom Afrikom i Bliskim Istokom povezano s jačom anticiklonalnom cirkulacijom polja visokog tlaka iznad suptropskog Atlantika. Pozitivni NAO također utječe na pomicanje staze oluja iznad Atlantika prema sjeveroistoku te pojačava učestalost i jačinu zimskih oluja (Hurrell, 2003.).

Na slici 1.1 prikazan je utjecaj pozitivne i negativne faze NAO-a na stanje atmosfere u zimskom dijelu godine.



Slika 1.1 Odziv atmosfere na pozitivnu i negativnu fazu NAO-a zimi. Izvor: https://www.metoffice.gov.uk.

Negativna faza NAO-a očituje se u slabije izraženim Azorskim maksimumom i Islandskim minimumom prizemnog tlaka zraka. Slabljenjem gradijenta tlaka oslabljena je i zapadna struja te su zimske oluje nad Atlantikom slabijeg intenziteta i rjeđe. Negativni NAO utječe na polje prizemne temperature zraka i oborine na suprotan način od pozitivnog. Nad sjeverozapadnom Europom zime su hladnije i suše od uobičajenog, a nad južnom Europom, Mediteranom i sjevernom Afrikom zime su toplije i vlažnije od uobičajenog. Nad područjem Grenlanda i sjeveroistočne Kanade zime su blaže, a nad jugoistočnom Sjevernom Amerikom zime su hladnije i s više snijega.

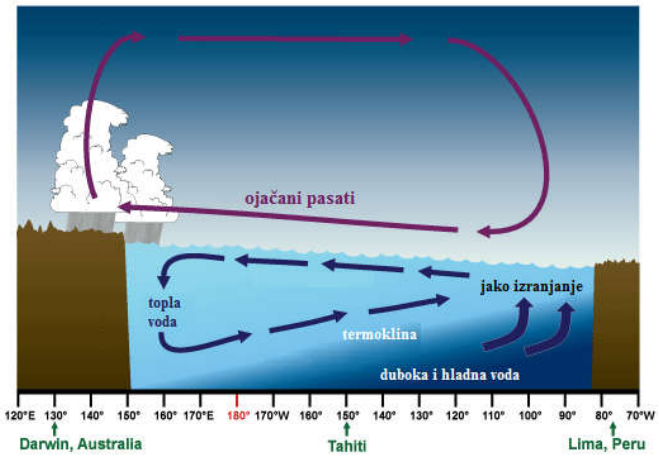
1.2 *El Niño - Južna oscilacija (ENSO)*

El Niño - Južna oscilacija (eng. *El Niño - Southern Oscillation*, ENSO) je dominantni mod međugodišnje klimatske varijabilnosti na globalnoj razini. Fenomen ENSO je posljedica združenog djelovanja atmosfere i oceana u tropskom Pacifiku. Južna oscilacija je atmosferska komponenta ENSO-a i predstavlja izmjenu visokog i niskog prizemnog tlaka zraka iznad maritimnog dijela Azijskog kontinenta i Indije te iznad tropskog Pacifika u blizini obala Južne Amerike (Walker, 1923.). Oceanska komponenta ima toplu fazu (El Niño) koja je karakterizirana porastom površinske temperature mora tropskog Pacifika od obala Ekvadora i Perua prema zapadu, i hladnu fazu (La Niña) koja je karakterizirana anomalno niskim SST. Bjerknes (1969.) je prvi uočio da su El Niño i Južna oscilacija manifestacija istog fenomena u tropskom Pacifiku. ENSO je kvaziperiodička pojava, događa se svakih 2 - 5 godina i traje oko godinu dana, no ponekad i dulje. La Niña fazu ne slijedi nužno El Niño i obrnuto.

Uobičajeno stanje u atmosferi nad Pacifikom predstavlja visoki prizemni tlak zraka nad istočnim Pacifikom, a nad zapadnim nizak. Zbog takvog gradijenta tlaka javljaju se pasati, istočno strujanje zraka usmjereno prema ekvatoru koje gura površinsku toplu vodu prema obalama zapadnog Pacifika. Nizak prizemni tlak zraka, pojačane SST uzrokuju uzdizanje toplog i vlažnog zraka te konvektivnu naoblaku i oborinu nad zapadnim Pacifikom. U gornjoj grani cirkulacije u višoj troposferi stvara se kompenzirajuće strujanje prema istoku koje se spušta nad istočnim Pacifikom. Nad istočnim Pacifikom prevladava stabilno i suho vrijeme. Opisanu zonalnu cirkulaciju je Bjerknes (1969.) nazvao Walkerova cirkulacija. U slučaju pozitivne Južne oscilacije koja predstavlja intenzivirano normalno stanje, odnosno Walkerovu cirkulaciju, pasati su dodatno ojačani (slika 1.2). Zbog stalnog strujanja pasata, topla površinska morska voda je gurana prema obalama zapadnog Pacifika zbog čega se stvara nagib morske površine (viša razina kod obala Australije nego kod obala Južne

Amerike). Topla voda zbog nailaska na prepreku zaranja te se vraća kroz sloj duboke i hladne vode prema obalama Južne Amerike gdje je pojačano izranjanje hladne vode na površinu. Izranjanjem se formira prostrano područje hladne površine morske vode, a takvu hladnu fazu ENSO-a nazivamo La Niña (Brönnimann, 2007.). Posljedica izranjanja je i odgovarajući nagib termokline koja je uz obale Južne Amerike najviše do dubine od 50 m.

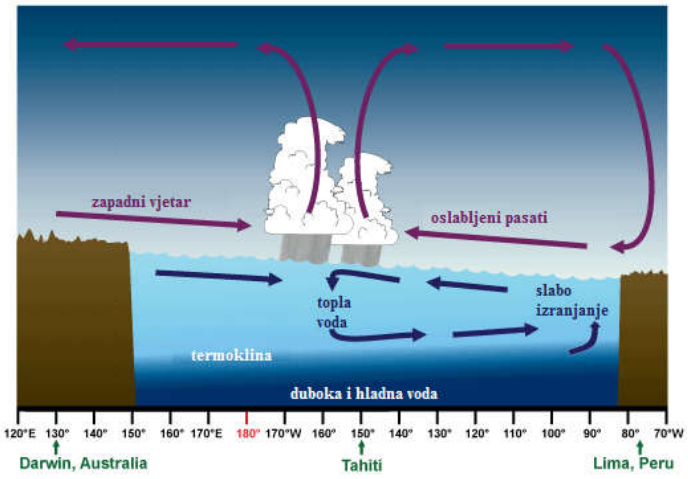
Kada su SST anomalno visoke u istočnom tropskom Pacifiku, manji je zonalni gradijent SST-a što oslabljuje Walkerovu cirkulaciju, a time i pasate. Slabljenje Walkerove cirkulacije predstavlja negativnu fazu Južne oscilacije. Oslabljeni pasati ne guraju toliko morsku vodu prema obalama zapadnog Pacifika kao za uobičajenih uvjeta pa oslabljuje zaranjanje morske vode. To rezultira u smanjenju nagiba termokline i oslabljenom izranjanju hladne morske vode uz obale istočnog Pacifika te doprinosi održavanju tople vode na površini. Zrak iznad tople morske površine se zagrijava što uzrokuje konvektivnu naoblaku i oborinu i daljnje slabljenje Walkerove cirkulacije (Brönnimann, 2007.). Opisani slučaj predstavlja toplu fazu ENSO-a (El Niño) koja je prikazana je na slici 1.3. Pozitivnom uzajamno - povratnom vezom fenomen se razvija do maksimuma u zimi (na sjevernoj hemisferi) nakon čega slabi (Neelin i sur., 1998.).



Slika 1.2 Ojačana Walkerova cirkulacija u atmosferi i La Niña faza u tropskom Pacifiku. Izvor: NOAA, https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns.

Intenzitet, faza i razvoj ENSO-a mjere se raznim indeksima. Oceanska komponenta ENSO-a mjeri se usrednjavanjem anomalija površinske temperature mora (eng. *Sea Surface Temperature Anomaly*, SSTA) na određenom dijelu prostora tropskog Pacifika pa se ovisno o području interesa istraživanja koriste NINO1+2, NINO3, NINO4 i NINO3.4 indeksi.

Atmosferska komponenta mjeri se određivanjem indeksa južne oscilacije SOI (eng. *Southern Oscillation Index*). SOI se temelji na standardiziranoj razlici prizemnog tlaka zraka između Tahitija i Darwina (Brönnimann, 2007.).

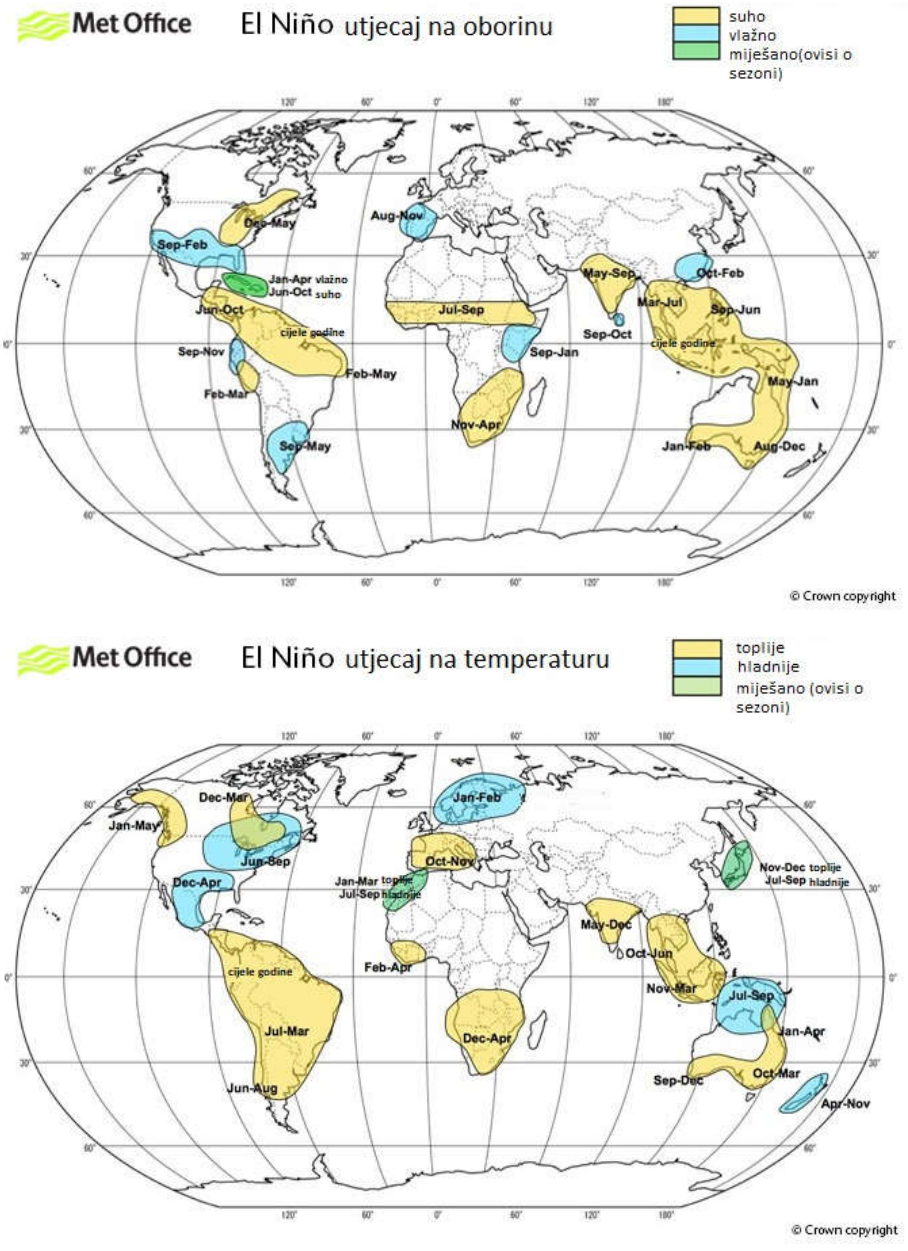


Slika 1.3 Oslabljena Walkerova cirkulacija u atmosferi i El Niño faza u tropskom Pacifiku. Izvor: NOAA, https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns.

1.2.1 Atmosferski odziv na ENSO

Odziv atmosfere na ENSO nije primijećen samo u području tropskog Pacifika, već i u području Pacifik - Sjeverna Amerika (eng. *Pacific - North American*, PNA) i području Sjeverni Atlantik - Europa (eng. *North Atlantic - European*, NAE) (slika 1.4). Utjecaj El Niña na područje PNA u sezoni siječanj, veljača, ožujak (eng. *January, February, March*; JFM) uočava se u polju povišene prizemne temperature zraka nad zapadnom Kanadom i Aljaskom koje se ponekad prostire preko cijelog kontinenta. Te anomalije temperature povezane su s jačanjem Aleutskog minimuma. Nad jugozapadnim dijelom SAD-a javlja se polje negativnih anomalija temperatura. Uočene su i niske SST u središnjem sjevernom Pacifiku uz jačanje suptropske mlazne struje. El Niño modificira oborinu tako da se javljaju pozitivne anomalije nad Aljaskom, sjeverozapadnim i južnim SAD-om uz negativne anomalije nad istočnim dijelom SAD-a. Unatoč velikoj udaljenosti područja NAE od tropskog Pacifika, primijećen je slab, ali statistički značajan odziv atmosfere na ENSO. U sezoni JFM uočena su polja negativne anomalije temperature i pozitivne anomalije prizemnog tlaka zraka nad sjevernom Europom te negativne anomalije oborine nad Skandinavijom koje su povezane s utjecajem El Niñoa. Nad srednjom i zapadnom Europom prizemni tlak je viši od uobičajenog, nad Mediteranom je povećana oborina, a nad dijelovima Mediterana toplije je od uobičajenog.

Odziv atmosfere na događaje La Niñae je gotovo simetričan odzivu na El Niño. Ne postoji jedinstven odziv polja na ENSO u Europi, no slična polja odziva pronađena su u analizama zasebnih ENSO događaja, modeliranim podacima i analizama rekonstruiranih klimatskih polja u prošlosti (Brönnimann, 2007.). Signal ENSO-a u klimatskim poljima nad Europom je robustan u kasnoj zimi i nalikuje negativnoj fazi NAO-a za El Niño (Brönnimann i sur., 2007.) te pozitivnoj fazi NAO-a za La Niñu (Pozo-Vázquez i sur., 2001.).

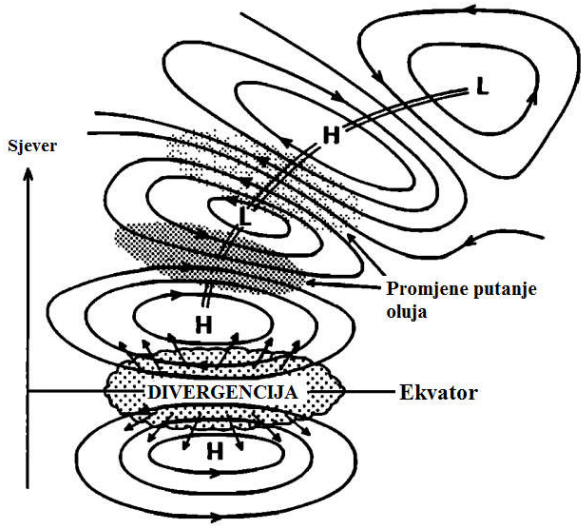


Slika 1.4 Odziv atmosfere na utjecaj pozitivne faze ENSO-a (El Niño) u poljima oborine (gore) i temperature (dolje). Izvor: https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/el-nino-la-nina/enso-impacts.

1.3 *Mehanizmi daljinskih veza*

Istovremene varijacije klimatskih polja, često suprotnog predznaka, iznad različitih područja na Zemlji nazivaju se daljinskim vezama (eng. *teleconnections*). Jedan od upravljačkih mehanizama daljinskih veza ENSO-a nad područjem NAE je takozvani "atmosferski most" koji se uspostavlja propagacijom Rossbyjevih valova. Povećanje SST u tropskom Pacifiku uzrokuje zagrijavanje zraka u graničnom sloju atmosfere te njegovo uzdizanje. Takve fluktuacije u temperaturi i vlažnosti u graničnom sloju atmosfere vode do izmjene tokova latentne i senzibilne topline na površini sjevernog Pacifika i sjevernog Atlantika. Ti površinski tokovi uzrokuju promjene SST-a u izvantropskim širinama koje onda utječu na zračnu masu u graničnom sloju izvantropskih širina (Lau i Nath, 1996.). Na slici 1.5 nalazi se sistematski prikaz promjena u gornjoj troposferi kao odaziv na povišene SST u tropskom Pacifiku, pojačanu konvekciju te anomalnu divergenciju zraka u gornjoj troposferi u blizini ekvatora. Tu zrak istječe prema objema hemisferama što rezultira u konvergenciji zraka i polju višeg tlaka zraka u suptropskim širinama. Uzorak alternirajućeg visokog i niskog geopotencijala rezultat je odziva na kvazistacionarne Rossbyjeve valove (Trenberth i sur.,1998.).

Na cirkulaciju iznad sjevernog Atlantika utječe stratosfera i stanje polarnog vrtloga. Van Loon i Labitzke (1987.) su pronašli da su jaki El Niño događaji povezani s jačanjem Aleutskog maksimuma u stratosferi uslijed čega dolazi do slabljenja polarnog vrtloga (vidi poglavlje 3.4).



Slika 1.5 Mehanizam daljinskih veza kojim se u gornjoj troposferi signal prenosi iz tropskog Pacifika u više zemljopisne širine. Izvor: Trenberth i sur.,1998.

1.4 *Cilj rada*

Dosadašnja razmatranja utjecaja NAO-a i ENSO-a na klimatska polja većinom se temelje na kategorizaciji godina u određene skupove prema vrijednosti indeksa koji opisuje NAO ili ENSO pojavu. Tako se na primjer pri razmatranju utjecaja ENSO-a vrši analiza po skupovima događaja pri čemu su skupovi definirani prema vrijednostima NINO3.4 indeksa koji opisuje intenzitet anomalija u Nino3.4 području tropskog Pacifika (Herceg Bulić i Branković, 2007.; Herceg Bulić i sur., 2011.). Međutim, pri takvoj kategorizaciji najčešće se ne uzima u obzir djelovanje nekih drugih modova klimatske varijabilnosti kao što je npr. NAO. S obzirom na činjenicu da je NAO najintenzivniji mod klimatske varijabilnosti na sjevernoj hemisferi s izrazitim utjecajem na Europu, može se pretpostaviti će njegov utjecaj modificirati ili prikriti utjecaj ENSO-a za kojeg je pokazano da je slab. Stoga istovremeno djelovanje NAO-a i ENSO-a može uzrokovati modifikaciju dominantnog signala povezanog s NAO-om. Nadalje, s obzirom da je utjecaj ENSO-a na Europu relativno slab, teško je razlučiti signal koji je posljedica upravo njegovog djelovanja. U izmjerenim podacima nije moguće izdvojiti dovoljno velik uzorak u kojem je prisutno djelovanje samo jedne od tih dviju pojava (dok je druga neutralna). Stoga je za potrebe ovog rada napravljen veliki ansambl dugačkih simulacija koji je omogućio analizu različitih kombinacija utjecaja NAO-a i ENSO-a. Cilj ovog rada je ispitati kakav je međusobni utjecaj tih pojava, analizirati zaseban utjecaj ENSO-a i NAO-a, ispitati u kojoj mjeri ENSO modificira signal NAO-a te ima li smisla razmatrati te pojave odvojeno.

2 Podaci i metode

2.1 *Numerički model SPEEDY*

Atmosferski model opće cirkulacije SPEEDY (eng. *Simplified Parametrizations primitivE-Equation DYnamics*) korišten je za dobivanje polja meteoroloških parametara koji su korišteni pri izradi ovog rada. SPEEDY je model srednje složenosti (eng. *model of intermediate complexity*) koji koristi σ-koordinatu (vertikalna koordinata definirana kao omjer tlaka na nekom nivou modela i tlaka pri tlu atmosfere modela) i pojednostavljene sheme fizikalnih parametrizacija koje su prilagođene modelu grube horizontalne i vertikalne rezolucije. Fizikalne parametrizacije se temelje na istim fizikalnim principima kao i u složenijim modelima. Ovaj model razvijen je u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku Abdus Salam u Trstu, Italija. SPEEDY se temelji na spektralnoj dinamičkoj jezgri razvijenoj u Geofizičkom laboratoriju za dinamiku fluida, Princeton, New Jersey.

Najčešće korištena horizontalna rezolucija 3.75° zemljopisne širine × 3.75° zemljopisne dužine odgovara trokutastom odsijecanju spektralnih polja (eng. *triangular spectral trunction*) pri valnom broju T30. To odgovara Gaussovoj mreži od 96×48 točaka. SPEEDY koristi 8 vertikalnih slojeva s polunivoima na σ vrijednostima 0, 0.05, 0.14, 0.26, 0.42, 0.60, 0.77, 0.90 i 1. Za vremensku shemu koristi preskočnu shemu s vremenskim filtrom.

Osnovne prognostičke varijable su vrtložnost, divergencija, apsolutna temperatura, logaritam prizemnog tlaka te se trenutno koristi jedna dodatna varijabla - specifična vlažnost. Sve varijable, osim logaritma prizemnog tlaka, određene su kao srednje vrijednosti između gornjeg i donjeg polunivoa, odnosno na tako zvanim punim nivoima na σ vrijednostima 0.025, 0.095, 0.20, 0.34, 0.51, 0.658, 0.835 i 0.95. Izlazne varijable interpolirane su na standardne izobarne plohe: 30, 100, 200, 300, 500, 700, 850 i 925 hPa. Gornja dva nivoa predstavljaju stratosferu, a donji nivo atmosferski granični sloj. Modelom se također dobiva niz dodatnih dijagnostičkih varijabli čiji su izvori i ponori definirani fizikalnim parametrizacijama.

Odgovarajući rubni uvjeti u modelu potrebni su za utvrđivanje flukseva količine gibanja, topline i vlažnosti pri površini i za tok dolaznog solarnog zračenja na vrhu atmosfere. Na donjoj granici model zahtjeva klimatološka polja: površinske temperature mora, udjela prekrivenosti morske površine ledom, temperature tla u dubokom sloju, vlažnosti u gornjem i vegetativnom sloju tla, dubine snijega, albeda gole površine, udjela tla prekrivenog

vegetacijom. Za klimatološka polja albeda gole površine i udjela tla prekrivenog vegetacijom koriste se godišnji srednjaci, a za sva ostala mjesečni srednjaci iz kojih se linearno interpoliraju dnevne vrijednosti. Albeda gole površine, morskog leda i snijega su linearno kombinirani kako bi se dobio ukupni albedo površine. Također su linearno kombinirani vlažnost u gornjem i vegetativnom sloju tla da se definira indeks raspoložive vlage u tlu koji se koristi za računanje evaporacije. Model dopušta superponiranje vremenski promjenjivih SSTA na klimatološka polja površinske temperature mora (SST). Na vrhu atmosfere fluks dolaznog zračenja računa se dnevno iz formula.

Sva klimatološka polja dobivaju se usrednjavanjem podataka iz ERA reanalize (eng. *European Reanalysis*) Europskog centra za srednjoročnu prognozu vremena (eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*, ECMWF) za razdoblje od 1979. do 2008. (Kucharski i sur., 2013.).

2.1.1 Fizikalne parametrizacije modela

Prvo se računaju vrijednosti primarnih varijabli u svim točkama mreže: u i v komponenta vjetra, temperature T, specifične vlažnosti Q, geopotencijala Φ, prizemnog tlaka p_s. Iz primarnih varijabli se zatim definiraju dodatne varijable: specifična vlažnost zasićenja Q^{sat}, relativna vlažnost RH, statička energija suhog zraka $SE = c_pT + \Phi$, statička energija vlažnog zraka $MSE = SE + L_cQ$, statička energija zasićenog vlažnog zraka $MSS = SE + L_cQ^{stat}$. L_c je latentna toplina kondenzacije, a c_p je specifični toplinski kapacitet pri p=konst. Sve varijable su definirane na punim nivoima, a neke na polunivoima za definiranje flukseva.

Shema konvekcije je pojednostavljena verzija sheme fluksa mase. Shema se aktivira područjima uvjetne nestabilnosti gdje statička energija zasićenog vlažnog zraka pada s visinom i gdje vlažnost u AGS-u i nivou iznad prelazi zadanu vrijednost.

Kondenzacija na velikoj skali modelirana je smanjenjem specifične vlažnosti prema zadanoj vrijednosti. To se događa u slojevima troposfere kad god relativna vlažnost prijeđe zadanu vrijednost koja ovisi o σ.

Svojstva oblaka su definirana dijagnostički iz relativne vlažnosti stupca zraka u troposferi i količine ukupne oborine. Pretpostavlja se da je baza oblaka na granici između dva najniža nivoa u modelu, a vrh na gornjoj granici najvišeg nivoa

Tok dolaznog solarnog zračenja računa se na vrhu atmosfere. Budući da je stratosfera predstavljena s gornja dva sloja, apsorpcija zračenja ozonom u nižoj stratosferi definirana je kao idealizirana funkcija zemljopisne širine. Smatra se da pripadni fluks apsorbira viši sloj

stratosfere. Preostali dio zračenja podijeljen je u dva spektra: vidljivi i blizu infracrveni. Za svaki pojas u svakom sloju troposfere, propusnost atmosfere definirana je kao funkcija dnevno usrednjene vrijednosti zenitnog kuta, dubine sloja, specifične vlažnosti i svojstva oblaka. Dio zračenja se reflektira na vrhovima oblaka, a dio od tla gdje albedo ovisi o sezonskoj promjeni morskog leda i dubine snijega. Odlazno solarno zračenje reflektirano na oblacima modelirano je samo za vidljivi pojas.

Parametrizacijska shema za dugovalno zračenje dijeli infracrveni spektar u 4 pojasa: prvi s apsorpcijama između 8.5 i 11 μm, drugi predstavlja jaku apsorpciju CO_2, treći slabu apsorpciju vodene pare, a četvrti jaku apsorpciju vodene pare. Za svaki pojas i sloj modela računa se propusnost atmosfere kao funkcija dubine sloja, vlažnosti i svojstva oblaka. Efekt oblaka uključen je kroz jaki pad u propusnosti atmosfere za pojas. Dio silaznog dugovalnog zračenja računa se kao težinska funkcija temperature u centru i na donjoj granici sloja. Dio uzlaznog dugovalnog zračenja računa se kao funkcija temperature u centru i na gornjoj granici sloja.

Shema vertikalne difuzije sastoji se od tri dijela: plitke konvekcije koja raspodjeljuje vlagu i statičku energiju suhog zraka između dva najniža sloja u slučaju statičke nestabilnosti; difuzije vlage u stabilnim uvjetima; difuzija statičke energije suhog zraka kada vertikalni temperaturni gradijent doseže ili premašuje suhoadijabatičku stopu ohlađivanja (izvor: http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy_description/km_ver41_appendixA.pdf).

2.1.2 Ansambl numeričkih simulacija

Ansambl je skup rezultata numeričkih integracija koje su dobivene istim modelom uz identične rubne uvjete, ali s malim razlikama u početnim uvjetima. U ovom radu napravljen je eksperiment Ctrl u kojem je kao donji rubni uvjet postavljeno polje izmjerenih vrijednosti SST u svim oceanima u vremenskom razdoblju od 1854.-2010. godine. SPEEDY integrira u vremenskom razdoblju od 1854.-2010., no prva godina je izostavljena pa se analiza odnosi na vremensko razdoblje od 1855.-2010.. Napravljen je ansambl od 35 članova kako bi se detektirao značajniji signal ENSO događaja u izvantropskim širinama na sjevernoj hemisferi (Herceg Bulić i Branković, 2007.).

2.2 *Određivanje NAO indeksa*

2.2.1 Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija

Klimatološka polja se dobivaju usrednjavanjem, ali ih istovremeno karakterizira nelinearnost i multidimenzionalnost. Stoga je zahtjevno reducirati dimenzionalnost sustava i izdvojiti najvažnija polja koja opisuju promjenjivost klime (Hannachi i sur., 2006.). Analiza empirijskih ortogonalnih funkcija je dobra metoda za reduciranje dimenzija sustava (Monahan i sur., 2009.). Analiza EOF se počela koristiti 40-ih godina (Obukhov, 1947.; Fukuoka, 1951.; Lorenz, 1956.) i od tada je postala jedna od najpopularnijih metoda korištenih u istraživanjima u meteorologiji i oceanografiji. Za dano prostorno-vremensko meteorološko polje analiza EOF pronalazi set ortogonalnih prostornih uzoraka zajedno sa setom pripadnih nekoreliranih vremenskih komponenti. Temelji se na određivanju glavnih vektora kovarijantne matrice ulaznih podataka s ciljem identificiranja dominantnih prostornih i vremenskih režima. Cilj analize je pronaći mali broj međusobno nezavisnih varijabli pomoću kojih je moguće opisati početni set podataka sa što manje gubitaka informacija. Analiza EOF koristi ortogonalne funkcije EOF i vremenske komponente PC za opis originalnog vremensko-prostornog niza podataka Z:

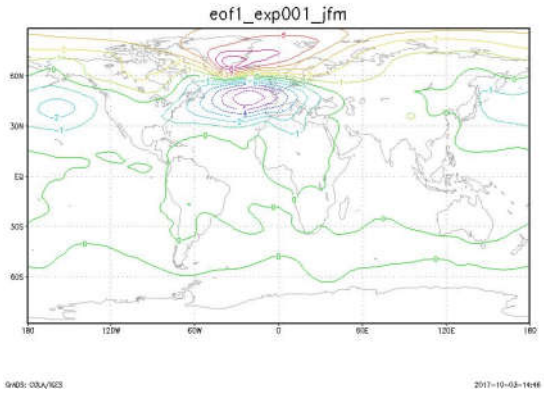
$$Z(x,y,t) = \sum_{k=1}^{n} PC(t)EOF(x,y)$$

$EOF_k(x,y)$ predstavlja prostornu strukturu glavnih faktora koji doprinose vremenskoj promjenjivosti Z, a PC_k je glavna komponenta koja pokazuje kako se amplituda EOF_k mijenja u vremenu. Varijanca koja odgovara n-toj glavnoj komponenti je n-ta svojstvena vrijednost. Uvjeti ortogonalnosti analize EOF nalažu da PC moraju biti ortogonalne u vremenu tj. nema istovremene vremenske korelacije između bilo koja dva PC; te da EOF moraju biti ortogonalni u prostoru. Na taj način se prostorno-vremensko polje raščlanjuje na prostorno polje i vremenski zavisne indekse (Hannachi i sur., 2007.).

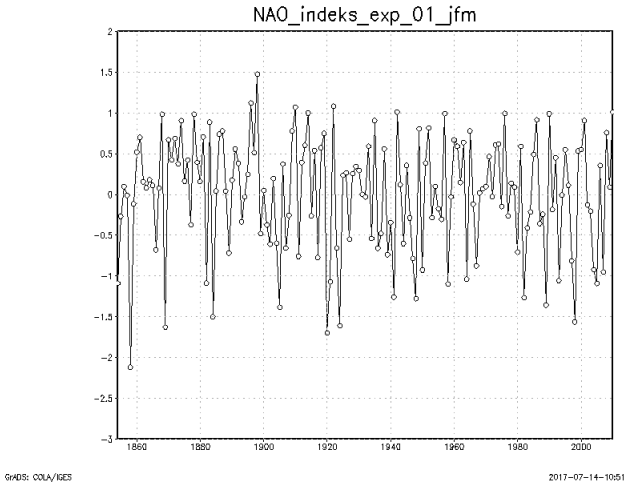
Uvjet prostorne ortogonalnosti može biti ograničavajući te može uzrokovati da se EOF polje proteže preko cijele domene sa značajnom amplitudom kada zapravo očekujemo da će polje biti lokalno. Ako prvi EOF ima konstantni predznak nad domenom, onda će drugi imati oba predznaka, a nulta linija će prolaziti kroz maksimum prvog moda (Horel, 1981.). To pridonosi problemu ovisnosti o domeni i ne-lokalnosti. Ti problemi mogu uzrokovati poteškoće kod interpretacije polja jer fizikalni modovi nisu nužno ortogonalni (Ambaum i sur., 2001, 2002.; Dommenget i Latil., 2002.).

2.2.2 NAO indeks

Za izračune NAO indeksa korištena je analiza empirijskih ortogonalnih funkcija primijenjena na polja tlaka na srednjoj morskoj razini na području Europe i sjevernog Atlantika za JFM sezonu. Dobivena su prostorna polja EOF i vremenske komponente PC za svih 35 numeričkih simulacija. Prvi mod prostornog polja (EOF1) predstavlja prostornu raspodjelu tlaka na srednjoj morskoj razini koja odgovara NAO-u (Slika 2.1), dok prvi mod vremenske komponente (PC1) predstavlja NAO indeks (Slika 2.2). Prostorno polje na Slici 2.1 odgovara negativnoj fazi NAO-a (dipolno polje s negativnim anomalijama na jugu, a s pozitivnim na sjeveru).



Slika 2.1 Prvi mod EOF1 prostornog polja tlaka na morskoj razini za sezonu JFM za prvu numeričku simulaciju SPEEDY modelom.

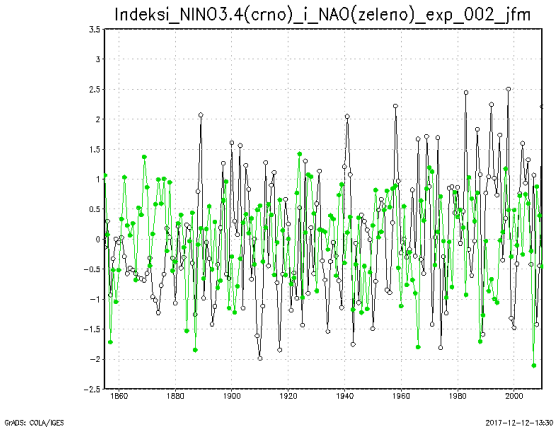


Slika 2.2 Glavna komponenta PC1 za tlak na morskoj razini za JFM sezonu za prvu numeričku simulaciju SPEEDY modelom.

2.3 *Određivanje NINO3.4 indeksa*

Za mjerenje jačine ENSO događaja odabran je NINO3.4 indeks jer obuhvaća područje u kojem se SST značajno mijenja i dolazi do pomicanja zone oborine. Izračunate su anomalije SST za JFM sezonu kao razlika sezonskog i klimatološkog srednjaka. Anomalije SST usrednjene su nad NINO3.4 područjem (5°S-5°N, 170°-120°W) te je indeks NINO3.4 standardiziran dijeljenjem s pripadnom standardnom devijacijom. NINO3.4 indeks je isti za sve numeričke simulacije modelom SPEEDY jer je kao donji rubni uvjet postavljeno polje izmjerenih vrijednosti SST-a u svim oceanima u vremenskom razdoblju od 1854.-2010. godine.

Slika 2.3 prikazuje NAO indeks i NINO3.4 indeks za JFM sezonu za drugu numeričku simulaciju modelom SPEEDY.



Slika 2.3 NAO indeks i NINO3.4 indeks za JFM sezonu za drugu numeričku simulaciju modelom SPEEDY za vremensko razdoblje 1855.-2010..

2.4 *Analiza po skupovima događaja*

Analiza po skupovima događaja (eng. *composite analysis*) temelji se na grupiranju podataka u određene kategorije ovisno o promatranom utjecaju tako da je signal povezan s tim utjecajem dominantan dok su drugi utjecaji eliminirani ili umanjeni. Ovom analizom možemo dobiti uvid u to na koji način je signal izražen u drugim varijablama. Varijabla u kojoj želimo uočiti signal je označena s V. Ideja je formirati setove Θ sastavljene od indeksa $\vec{z}$ (indeksi jedne ili više varijabli) i procijeniti očekivanu vrijednost varijable V s uvjetom $\vec{z} \in \Theta$. Takav skup dan je sa:

$$\overrightarrow{V_\theta} = \varepsilon(\vec{V}_t | \vec{z}_t \in \Theta)$$

U praksi operator očekivanja ε zamijenjen je sumom da bi se dobila procjena skupa:

$$\vec{V}_{\Theta} = \frac{1}{k}\sum_{j=1}^{k}\vec{V}_{t_j}$$

gdje suma ide po vremenima $t_1,...,t_k$ za koje vrijedi $\vec{z}_{t_j} \epsilon \Theta$. Ovakav pristup ne pretpostavlja prirodu veze između $\vec{z}$ i $\vec{V}$, ona može biti linearna ili nelinearna. Ideja sa skupovima je konstruirati tipična stanja varijable V koja su uvjetovana vrijednostima odabranog indeksa. Oko svakog skupa može postojati znatna varijabilnost stoga on ne mora biti predstavnik tipičnog stanja $\vec{V}$ za $\vec{z} \in \Theta$ (von Strock i Zwiers, 1999.).

Kako bi se pokušao detektirati signal povezan samo s jednom od pojava ENSO ili NAO, napravit će se analiza po skupovima događaja uzimajući u obzir predznake i vrijednosti NAO indeksa i NINO3.4 indeksa za JFM sezonu. Kategorizacija će se napraviti s obzirom na sljedeće uvjete:

- pojave su definirane kao jake pozitivne (+ +) ako je odgovarajući standardizirani indeks veći od 1,
- pojave su definirane kao umjerene pozitivne (+) ako je odgovarajući standardizirani indeks unutar intervala $\langle 0.5, 1]$,
- pojave su definirane kao neutralne (0) ako je odgovarajući standardizirani indeks unutar intervala $[-0.5, 0.5]$,
- pojave su definirane kao umjerene negativne $(-)$ ako je odgovarajući standardizirani indeks unutar intervala $[-1, -0.5\rangle$,
- pojave su definirane kao jake negativne $(--)$ ako je odgovarajući standardizirani indeks manji od -1.

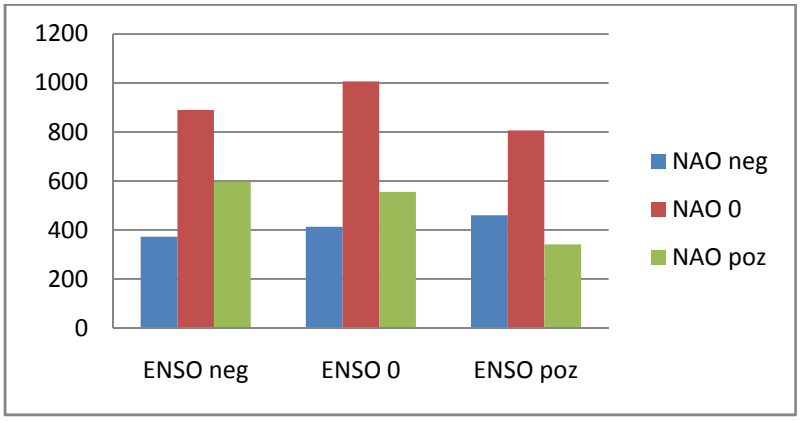
U ovom radu analiza po skupovima događaja se provodi za vremensko razdoblje od 156 godina i za svih 35 numeričkih simulacija uz razvrstavanje godina u 25 grupa prema gore navedenim uvjetima. U Tablici 1 prikazan je ukupan broj godina koje zadovoljavaju uvjete za pojedinu grupu. Za svaku pojedinu grupu izračunat je srednjak određenih meteoroloških parametara koji će biti analizirani u ovom radu. Iz tablice vidimo da najviše godina ima u kategoriji kada su obje pojave neutralne. Kategorije za neutralni NAO i bilo koju kombinaciju ENSO-a imaju više godina nego ostale kategorije NAO događaja i bilo koje kombinacije ENSO događaja. Ista je situacija za kategorije neutralnih ENSO-a i bilo koju kombinaciju

NAO događaja, imaju više godina nego ostale kategorije ENSO događaja u kombinaciji s bilo kojom NAO-om.

Tablica 1: Ukupan broj godina koji zadovoljava kriterije za svaku pojedinu kombinaciju jakosti ENSO i NAO događaja.

	ENSO - -	ENSO -	ENSO 0	ENSO +	ENSO + +
NAO - -	58	115	190	76	128
NAO -	91	109	223	80	176
NAO 0	420	470	1006	308	499
NAO +	248	211	441	122	156
NAO + +	62	75	125	42	21

Na slici 2.4 nalazi se grafički prikaz ukupnog broja godina za negativne (zbroj umjerenih i jakih događaja), neutralne i pozitivne (zbroj umjerenih i jakih događaja) ENSO i NAO pojave prema podacima iz Tablice 1. Prva skupina podataka (ENSO neg) pokazuje da se pozitivna faza NAO događaja (zeleno) događa češće u kasnoj zimi za La Niña događaja nego negativna faza NAO događaja (plavo). Druga skupina podataka (ENSO 0) pokazuje da se pozitivna faza NAO događaja (zeleno) događa češće u kasnoj zimi za neutralnog ENSO događaja nego negativna faza NAO događaja (plavo). Treća skupina podataka (ENSO poz) pokazuje da se negativna faza NAO događaja (plavo) događa češće u kasnoj zimi za El Niño događaja nego pozitivna faza NAO događaja (zeleno). Najviše godina pripada kategoriji kada su obje pojave neutralne. Li i Lau (2011.) napravili su 2000 godišnju integraciju združenog modela opće cirkulacije CM2.1 te dobili slične rezultate.



Slika 2.4. Prikaz ukupnog broja godina za pozitivne, neutralne i negativne kombinacije ENSO i NAO događaja prema podacima iz Tablice1.

2.5 ***NCEP-NCAR reanaliza***

NCEP/NCAR reanaliza je združeni projekt američkog Nacionalnog centra za prognozu okoliša (eng. *National Centers for Environmental Prediction* - NCEP) i Nacionalnog centra za atmosferska istraživanja (eng. *National Center for Atmospheric Research* - NCAR). Cilj projekta je napraviti nove analize atmosfere koristeći podatke od 1948. do danas. Reanaliza meteoroloških podataka iz prošlosti daje sliku prošlog vremena neovisnu o različitim instrumentima kojima su se izvršavala mjerenja kroz godine. Koristi se niz metoda kako bi se mjerenja meteoroloških parametara predočila na mreži podataka s pravilno raspoređenim točkama. Reanalizama se procjenjuje prošlo vrijeme umjesto prognoze budućeg, a omogućava da povijesni podaci ne budu pod utjecajem umjetnih faktora tijekom modeliranja.

Američka nacionalna agencija za ocean i atmosferu (*National Ocean and Atmosphere Administration* - NOAA) daje pristup NCEP/NCAR reanalizi na svojoj web-stranici https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html te omogućava crtanje regresije sezonskih srednjaka različitih meteoroloških parametara i klimatskih indeksa (www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/).

3 **Rezultati i rasprava**

U ovom poglavlju prikazani su rezultati ansambla numeričkih simulacija modelom SPEEDY za eksperiment Ctrl za JFM sezonu. Prema kriterijima analize po skupovima događaja podaci su razvrstani u 25 grupa ovisno o vrijednostima NAO i NINO3.4 indeksa. Za svaku pojedinu grupu izračunat je srednjak određenog meteorološkog parametra za JFM sezonu. U ovom radu razmatrani su sljedeći parametri: geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa (GH200), ukupna oborina te temperatura na izobarnim plohama od 925 hPa (T925) i 30 hPa (T30). Rezultati modela su uspoređeni s regresijom spomenutih parametara i NAO i ENSO indeksa koja je dobivena na temelju podataka reanalize NCEP-NCAR. Područje interesa u diskusiji anomalija je područje PNA i NAE.

3.1 ***Geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa***

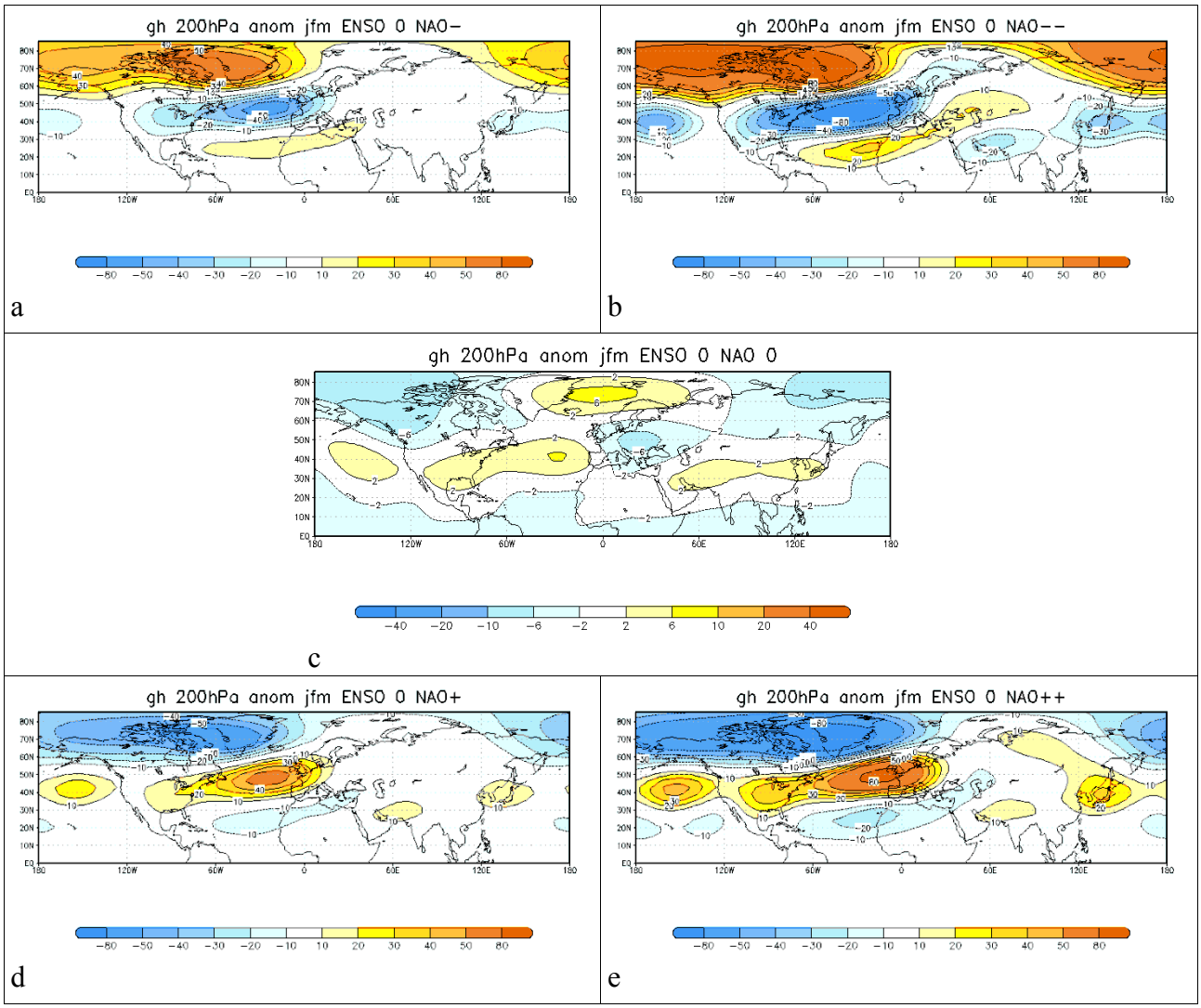
Na slici 3.1 prikazane su anomalije geopotencijalne visine izobarne plohe od 200 hPa za sezonu JFM kada je ENSO događaj neutralan sa svim mogućim kombinacijama NAO-a. Za umjerene i jake negativne/pozitivne faze NAO-a, vidljiv je očekivani dipolni uzorak geopotencijala u smjeru sjever-jug. U slučaju umjerene negativne faze NAO-a (NAO -, slika 3.1a) polje pozitivnih anomalija nalazi se iznad Grenlanda i sjevernog dijela Sjeverne Amerike s amplitudama preko 50 m. One predstavljaju slabljenje Islandskog minimuma. Negativne anomalije geopotencijala sa središtem iznad Azora protežu se prema središnjem dijelu Sjeverne Amerike i Europe gdje amplituda anomalija slabi s 50 m do 10 m. One ukazuju na slabljenje Azorskog maksimuma. Pozitivna anomalija, amplitude do 20 m, proteže se suptropskim Atlantikom, sjeverom Afrike i istokom Mediterana. Umjerenim širinama sjevernog Pacifika proteže se negativna anomalija geopotencijala amplitude do 20 m. Sličnu prostornu raspodjelu ima slučaj jake negativne faze NAO događaja (NAO--, slika 3.1b), no pripadajuće amplitude anomalija su veće, preko 80 m. Pozitivna anomalija koja se proteže od suptropskog Atlantika preko sjevera Afrike u ovom slučaju pruža se prema Uralu. Nad područjem Bliskog Istoka postoji polje negativnih anomalija amplitude 20 m.

Suprotni predznak anomalija uz približno jednaku vrijednost amplituda i sličnu prostornu raspodjelu javlja se za umjereni i jaki pozitivni NAO (NAO+ i NAO++, slike 3.1d i 3.1e). Negativne anomalije iznad Grenlanda i sjevernog dijela Sjeverne Amerike predstavljaju jačanje Islandskog minimuma, a pozitivne iznad Azora jačanje maksimuma. Atmosferski

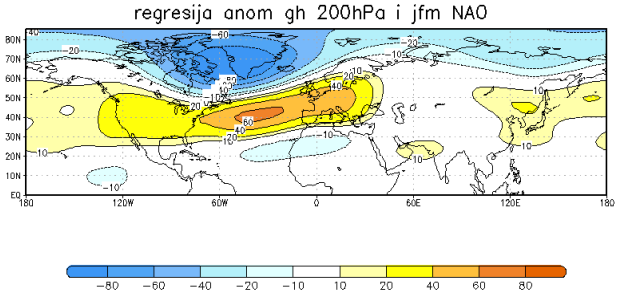
odziv na NAO+ se od odziva na NAO- razlikuje u postojanju polja anomalija nad Bliskim Istokom. U slučaju jake pozitivne faze amplitude anomalija jačaju.

Na slici 3.2 prikazan je regresijski koeficijent dobiven jednostavnom linearnom regresijom sezonski usrednjene (JFM) visine geopotencijalne plohe na 200 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu. Regresija se temelji na podacima reanalize NCEP-NCAR za vremensko razdoblje 1948.-2015.. Ovdje je potrebno naglasiti kako ova metoda uzima u obzir sve godine unutar navedenog razdoblja. Usporedbom sa slikama dobivenim na temelju rezultata modela SPEEDY za umjerenu/jaku pozitivnu NAO-u vidimo da model vjerno reproducira pojavu NAO. Središte pozitivnih anomalija (slika 3.2) pomaknuto je od Azora prema središnjem sjevernom Atlantiku u odnosu na model (slika 3.1) što je vjerojatno posljedica grube rezolucije modela. Ta anomalija se pruža na zapad sve do Azijskog kontinenta. Izrazita sličnost polja regresije dobivenog pomoću reanalize NCEP-NCAR (koja uzima u obzir sve događaje bez obzira na iznos NAO i NINO3.4 indeksa) i polja koje daje model za kategoriju neutralnog ENSO događaja i pozitivnog NAO događaja vodi do zaključka da je na slici 3.2 dominantna NAO pojava.

Slučaj kada su obje pojave ENSO i NAO neutralne prikazan je na slici 3.1c. Intervali crtanja anomalija su manji u odnosu na ostale slike. Očekivano, anomalije su vrlo malog iznosa. Iznad Grenlandskog mora nalazi se polje pozitivnih anomalija geopotencijala amplitude 6 m, a iznad Europe polje negativnih anomalija. Iznad sjeverne Kanade i Aljaske postoji polje negativnih anomalija, a iznad središnjeg Atlantika polje pozitivnih anomalija što donekle podsjeća polje odziva na negativnu fazu ENSO-a (slike 3.3a i b) i pozitivnu fazu NAO-a. Amplituda tog signala je oko 10 puta manja od signala vezanog uz pozitivan NAO događaj što upućuje na zaključak da je u toj kategoriji izostavljen dominantan izvor klimatske varijabilnosti.



Slika 3.1 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim ENSO-om (podaci: model SPEEDY).



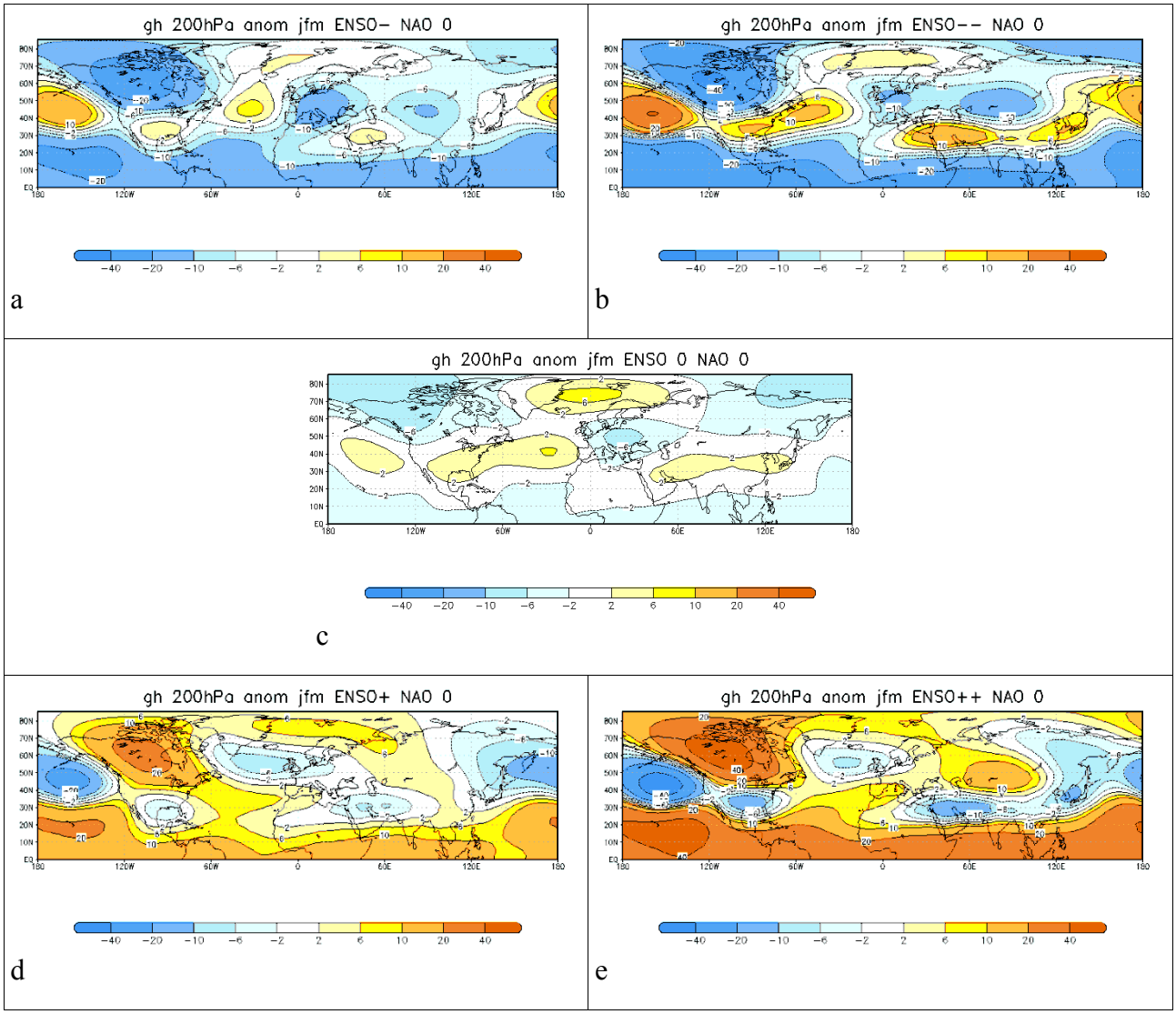
Slika 3.2 Regresijski koeficijent [m/hPa] dobiven linearnom regresijom geopotencijala na izobarnoj plohi 200 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

Slika 3.3 se odnosi na slučaj kad je NAO događaj neutralan u kombinaciji sa svim kategorijama ENSO događaja. Budući da je utjecaj ENSO-a slab, intervali ocrtavanja anomalija su manji nego na ostalim slikama u radu. Za umjereni negativan ENSO događaj (ENSO-) prikazan na slici 3.3a nad kontinentom Sjeverne Amerike nalazi se polje negativnih anomalija amplitude 20 hPa, a južnije nad Meksičkim zaljevom te nad sjevernim Pacifikom polje pozitivnih anomalija. Nad sjevernim Atlantikom postoji polje pozitivnih anomalija amplitude do 10 hPa, dok je nad Europom polje negativnih anomalija GH200. Za jaki negativni ENSO (ENSO--) pozitivna anomalija sa sjevernog Pacifika zonalno se produžuje prema Atlantiku. Nad Grenlandskim morem javlja se slabo polje pozitivnih anomalija, a jačaju negativne anomalije nad Europom i pozitivne nad Arapskim poluotokom. Iako su iznosi anomalija iznad područja Europe mali, signal vezan uz djelovanje ENSO-a jači je nego u slučaju potpuno neutralnog skupa (slika 3.3c) što ukazuje na prinudno djelovanje tropskog Pacifika i na to područje.

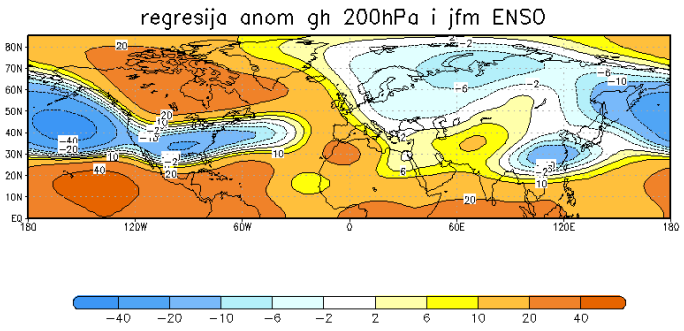
Na slici 3.3d za umjereni pozitivan ENSO (ENSO+) uočavamo simetričnu situaciju nad područjem PNA u odnosu na ENSO- (slika 3.3a): slična je prostorna raspodjela uz amplitude suprotnog predznaka. Nad područjem NAE prostorna raspodjela nije potpuno simetrična u odnosu na skup događaja ENSO- (slika 3.3a). Nad Atlantikom i sjeverozapadnom Europom postoji polje negativnih anomalija amplitude 6 hPa i polje pozitivnih anomalija iznad Grenlandskog mora i jugozapadne Europe. Polje odziva na jaki pozitivan ENSO (ENSO++, slika 3.3e) nad područjem PNA prikazuje istu prostornu raspodjelu anomalija kao za slučaj umjerenog pozitivnog (slika 3.3d), ali uz veće amplitude. Nad područjem NAE polje pozitivnih anomalija jača nad jugozapadnom i središnjom Europom te se produbljuje prema Aziji, dok je polje negativnih anomalija nad Atlantikom slabije. Utjecaj ENSO-a na atmosferu tijekom zime u srednjim širinama sjeverne hemisfere najjači je nad područjem PNA gdje se uočavaju najveće anomalije. Dobivena polja kvalitativno odgovaraju opaženim poljima i poljima dobivenim modelom SPEEDY u radu Herceg Bulić i Branković (2007.).

Slika 3.4 prikazuje koeficijent regresije anomalija GH200 i indeksa NINO3.4 za JFM sezonu dobiven pomoću podataka reanalize NCEP-NCAR. Prostorna raspodjela polja i amplitude anomalija nad područjem PNA slična je kao u slučaju ENSO++ događaja (slika 3.3e). Nad područjem NAE polje pozitivnih anomalija zahvaća prostor Pirinejskog poluotoka i zapadnog Mediterana kao i kod ENSO++ utjecaja, a polje negativnih anomalija zahvaća sjevernu Europu za razliku od spomenutog slučaja gdje se ono nalazi iznad Atlantika. Mogući

uzrok razlika je to što reanaliza obuhvaća manje godina i uzima u obzir utjecaj drugih fenomena, a ne samo događaja kada je NAO pojava neutralna kao što je obuhvaćeno analizom podataka dobivenih modelom SPEEDY.

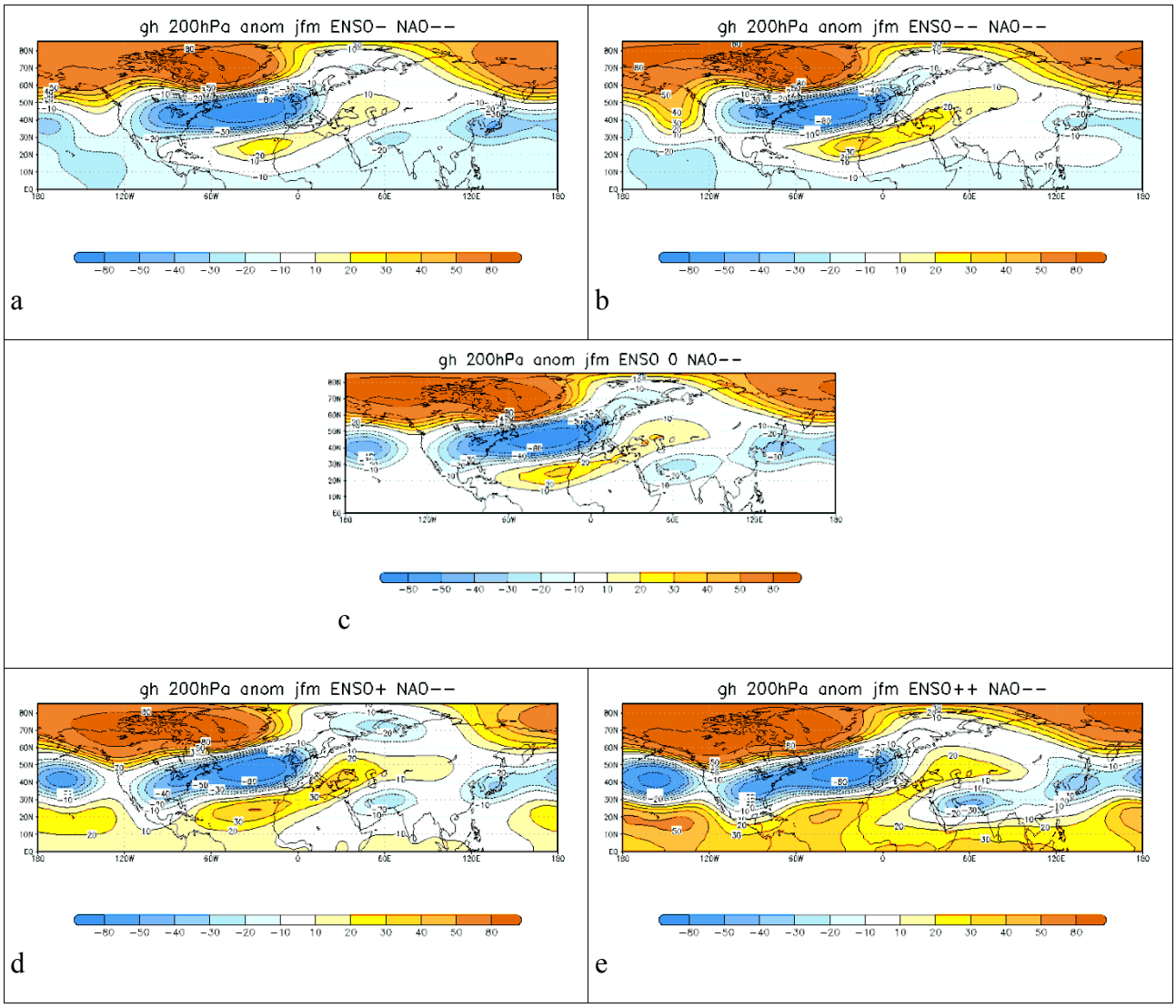


Slika 3.3 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



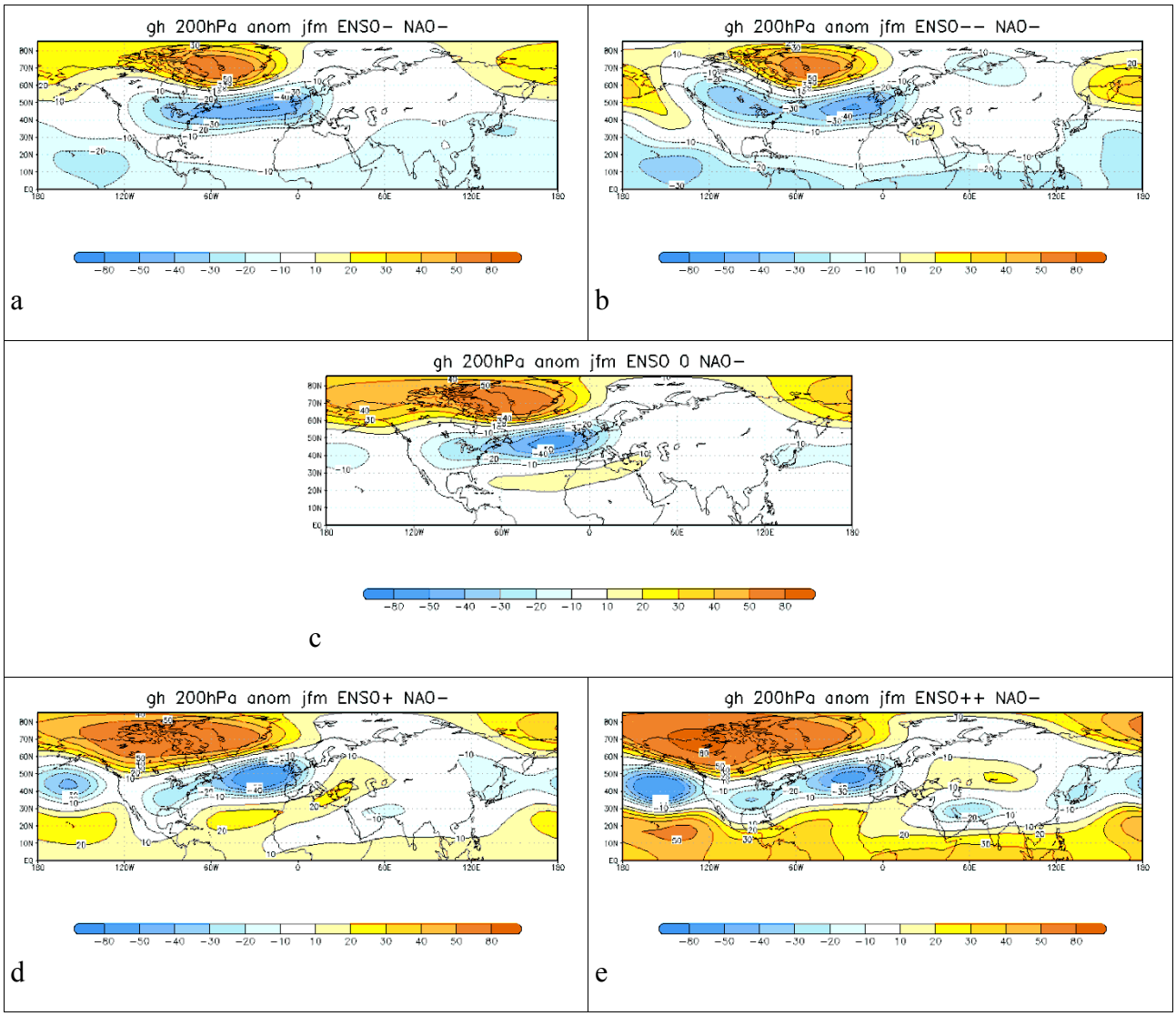
Slika 3.4 Regresijski koeficijent [m/°C] dobiven linearnom regresijom geopotencijala na izobarnoj plohi 200 hPa i ENSO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

Da bi ispitali utječu li ENSO događaji na signal koji je povezan s jakim negativnim događajima NAO-a, uspoređeno je polje odziva za kombinaciju neutralnog ENSO-a i jakog negativnog NAO događaja (koje predstavlja odziv samo na negativni NAO bez utjecaja ENSO-a) s ostalim kombinacijama prikazanim na slici 3.5. ENSO- (slika 3.5a) donekle smanjuje amplitudu negativne anomalije nad Pacifikom za 10 hPa, a ENSO-- za 20 hPa. ENSO-- (slika 3.5b) jača amplitudu pozitivne anomalije nad jugoistočnim Mediteranom za 10 hPa. ENSO- i ENSO-- događaj nemaju značajan utjecaj na anomalije GH200 kada je NAO događaj jaki negativan. ENSO+ i ENSO++ (slika 3.5d i e) pojačavaju pozitivnu anomaliju nad jugoistočnim Mediteranom i jačaju amplitude anomalija nad područjem PNA.



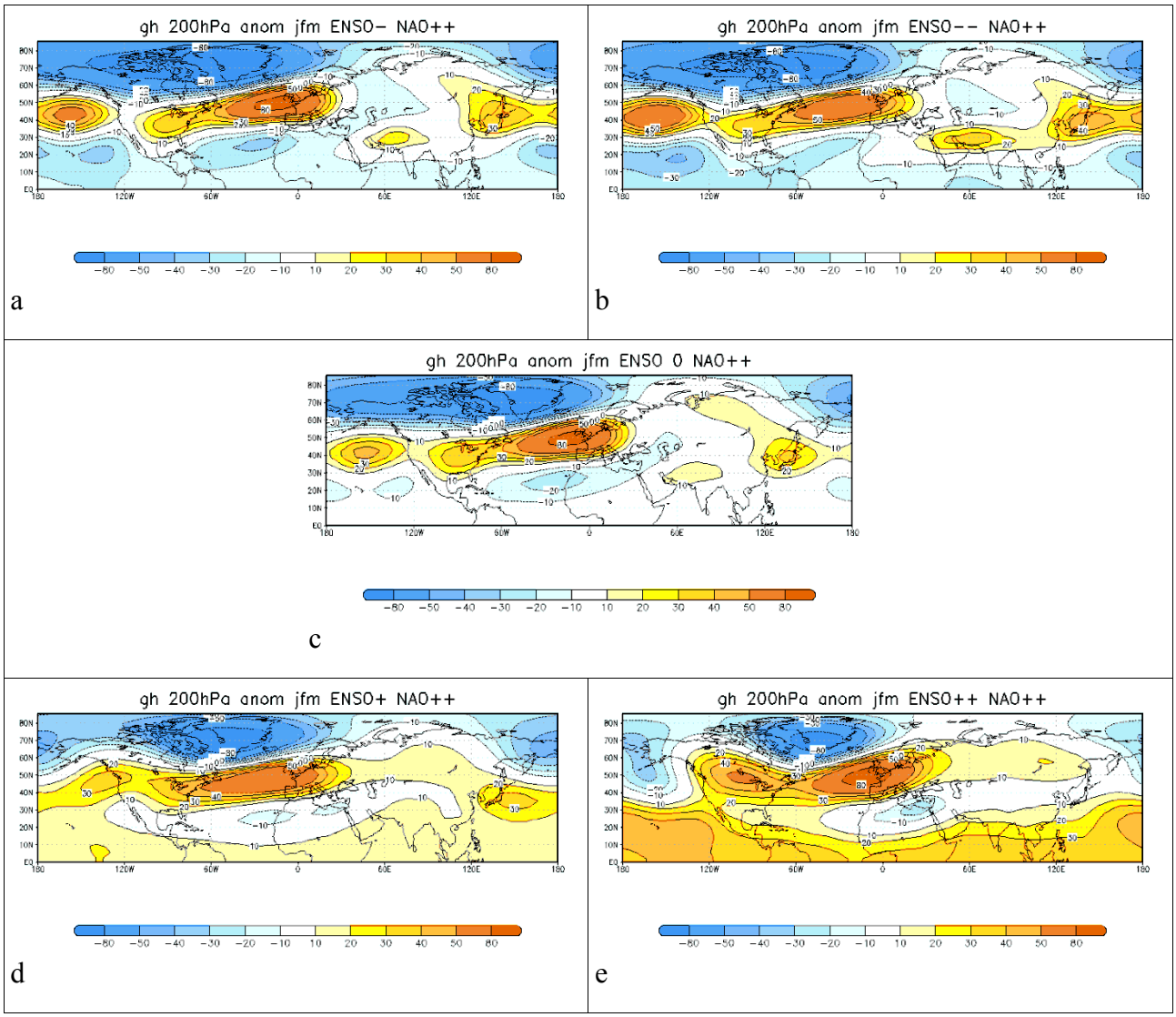
Slika 3.5 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s jakim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

Slika 3.6 prikazuje anomalije geopotencijala za sve kombinacije ENSO događaja s NAO-događajem. U odnosu na sliku 3.6c kada je ENSO događaj neutralan, ENSO- (slika 3.6a) pojačava negativnu anomaliju iznad sjeveroistočnog SAD-a i Atlantika te smanjuje pozitivnu anomaliju iznad sjevera Kanade. Također smanjuje pozitivnu anomaliju iznad jugoistočnog Mediterana. ENSO-- ima sličan, ali ipak nešto izraženiji utjecaj (slika 3.6b). Smanjuje se polje pozitivnih anomalija nad sjeverom Kanade, proširuje se polje negativnih anomalija nad Kanadu te se smanjuje polje pozitivnih anomalija nad jugoistočnim Mediteranom. ENSO+ i ENSO++ događaj (slika 3.6d i e) pojačavaju amplitude negativnih i pozitivnih anomalija umjerenog negativnog NAO događaja nad cijelim područjem PNA i NAE pa su stoga i meridionalni gradijenti izraženiji. Što se tiče Europe, za ENSO+ događaj pojačava se pozitivna anomalija iznad jugoistočnog Mediterana.



Slika 3.6 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

Usporedbom polja odziva za jake pozitivne NAO događaje uz neutralni ENSO (ENSO0 NAO++) i ostalih slika s 3.7 razmatramo mogući utjecaj ENSO-a na jaki pozitivni NAO događaj. ENSO- (slika 3.7a) pojačava negativne amplitude nad sjevernom Kanadom i pozitivne anomalija nad Pacifikom. ENSO-- (slika 3.7b) još više pojačava pozitivne anomalije nad Pacifikom i Atlantikom uz zamjetno slabljenje negativnih anomalija nad jugoistočnim Mediteranom. ENSO+ (slika 3.7d) ublažava negativne anomalije nad Kanadom i Grenlandom, a uočava se i slabljenje pozitivnih anomalija nad Pacifikom i Atlantikom kao i negativnih anomalija iznad jugoistočnog Mediterana (slika 3.7d). Jačanjem pozitivne faze ENSO-a (slika 3.7e) još se više smanjuju negativne anomalije nad Grenlandom.

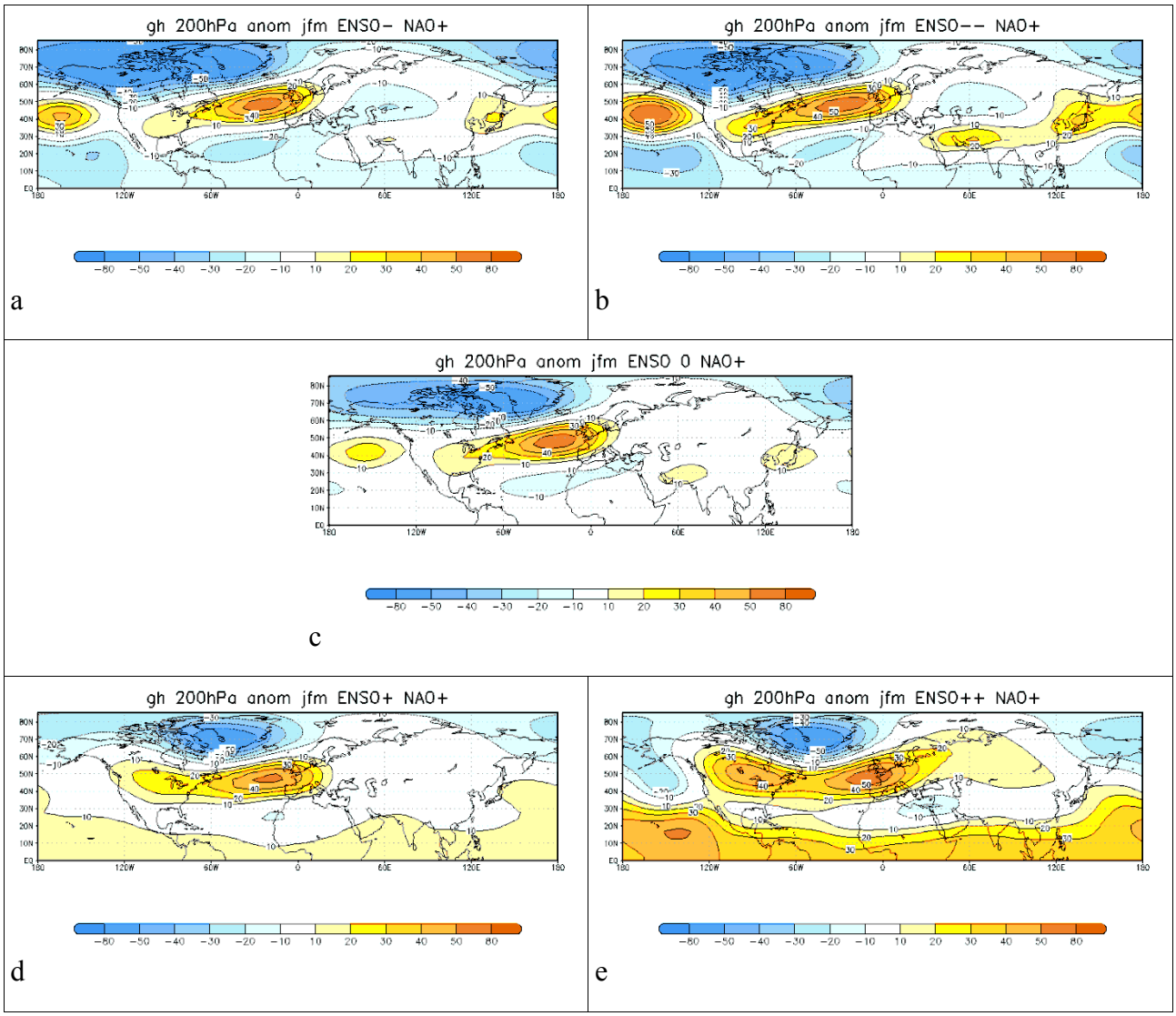


Slika 3.7 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s jakim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

Središte polja pozitivnih anomalija se premješta s Pacifika na središte kontinenta Sjeverne Amerike uz porast amplitude. Polje pozitivnih anomalija sa središtem iznad Azora jača u odnosu na kombinaciju s umjerenim pozitivnim ENSO-om (slika 3.7d), ali ne u odnosu na kombinaciju s neutralnim ENSO-om (slika 3.7c). Polje negativnih anomalija iznad Maroka premješta se iznad Egipta i jugoistočnog Mediterana. ENSO+ i ENSO++ događaj slabi signal jakog pozitivnog NAO događaja, a ENSO- događaj ga povećava.

Usporedba slika 3.8c i 3.8a pokazuje da ENSO- jača negativne anomalije GH200 nad sjevernom Kanadom i Grenlandom te jača pozitivne anomalije iznad Pacifika i Atlantika povezane s NAO+ događajem (slika 3.8a). ENSO-- još više jača pozitivnu anomaliju iznad Pacifika te iznad sjeveroistočnog SAD-a, a ublažava polje negativnih anomalija iznad Mediterana (slika 3.8b). U odnosu na neutralni ENSO događaj, ENSO+ slabi negativnu anomaliju na sjeveru Kanade i pozitivnu iznad Atlantika i Pacifika. Jačanjem pozitivnog ENSO događaja, polje pozitivnih anomalija sa središtem iznad Atlantika premješta se nad sjeverozapad Europskog kontinenta i proteže se sve do Kanade uz porast amplituda (slika 3.8e).

Gornja diskusija ukazuje da negativni ENSO amplificira signal umjerenog pozitivnog NAO-a, a pozitivni ENSO oslabljuje gradijent geopotencijala koji je inače karakterističan za pozitivni NAO.



Slika 3.8 Anomalije geopotencijalne visine na izobarnoj plohi 200 hPa [m] za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

3.2 *Oborina*

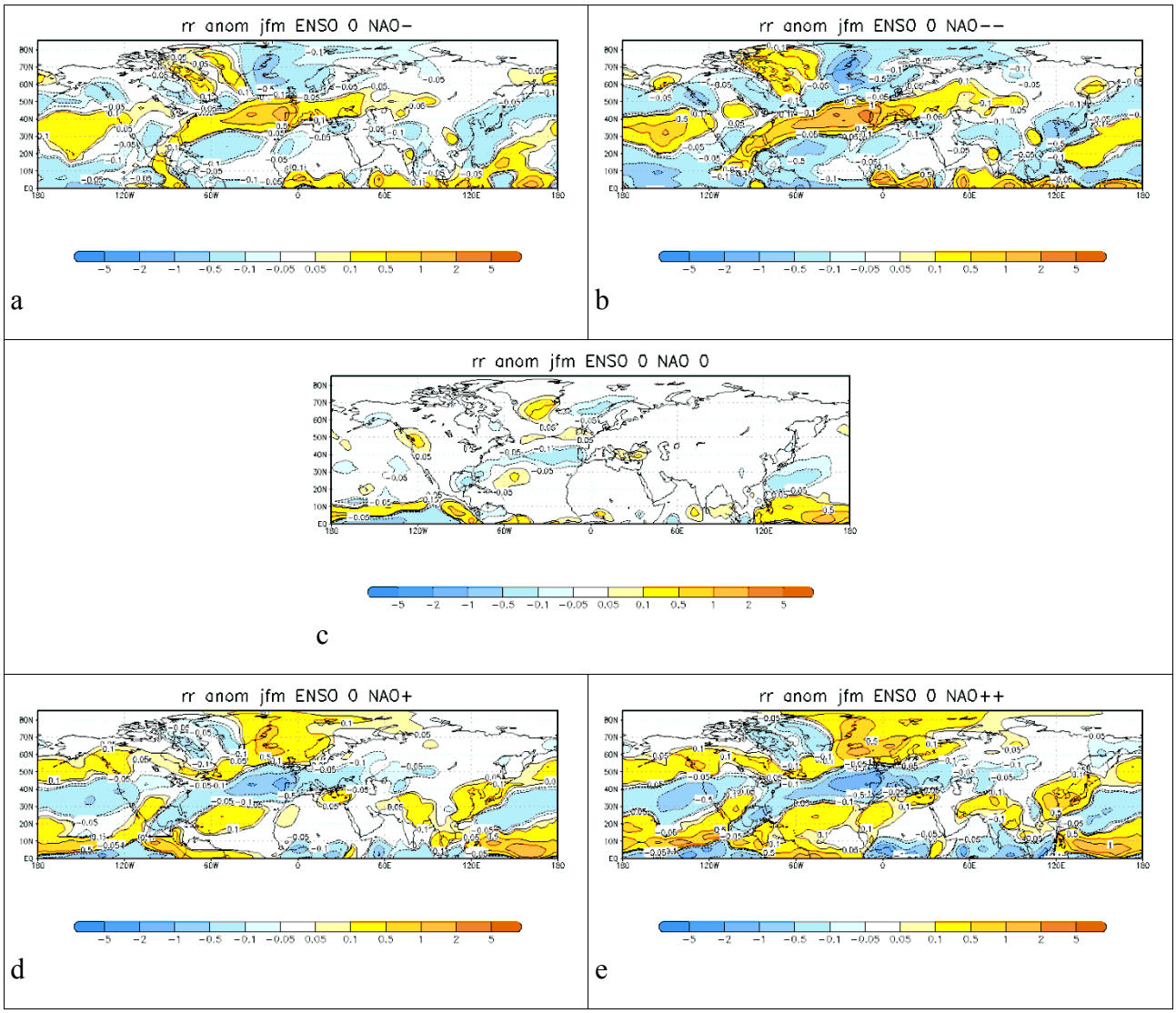
Polje anomalija oborine je u skladu s poljem anomalija GH200. Na mjestima povišenog tlaka zraka oborina je manja od uobičajene i obrnuto. Na slici 3.9 prikazane su anomalije oborine za JFM sezonu za slučaj kada je ENSO događaj neutralan uz sve kategorije NAO događaja. Rezultati su u skladu s istraživanjima (Hurrell i sur., 2003.; Ning i Bradley, 2015.). U slučaju pozitivne faze NAO-a (slike 3.9d i e), nad Skandinavijom i Islandom postoji polje pozitivnih anomalija oborine, dok se nad središnjom i južnom Europom nalazi polje negativnih anomalija. Nad dijelom sjeverne Kanade i Grenlanda postoji polje negativnih anomalija, a na jugu SAD-a polje pozitivnih anomalija. Jačanjem pozitivne faze NAO-a povećavaju se i amplitude anomalija. U slučaju negativne faze NAO-a vrijedi obrnuto (slike 3.9a i b). Suhe zime su iznad Skandinavije i Islanda, a vlažne nad središnjom i južnom Europom. Iznad Kanade i Grenlanda prevladavaju vlažne zime, a na jugu SAD-a suhe. Usporedbom slike regresijskog koeficijenta oborine i NAO indeksa za JFM sezonu (slika 3.10) dobivenog na temelju reanalize NCEP-NCAR sa slikama za pozitivan NAO događaj dobivenih modelom SPEEDY (slike 3.9d i e) vidimo da model vjerno reproducira NAO pojavu.

Slika 3.11 odnosi se na slučaj neutralnog NAO-a uz sve kategorije ENSO događaja za JFM sezonu. Za slučaj ENSO-- (slika 3.11b), nad zapadnom i središnjom Europom postoji polje negativnih anomalija malih amplituda koje se proteže preko Atlantika i SAD-a do Pacifika. Nad Britanskim otočjem postoji polje pozitivne anomalije koje se prostire do istočne Kanade. Amplitude polja odziva oborine na ENSO nad područjem PNA jače su nego amplitude polja nad Europom. Razlika u odnosu na ENSO-- je u tome što za ENSO- nad područjem jugoistočne Europe i jugoistočnog Mediterana postoji polje pozitivne anomalije (slika 3.11a). Polje odziva oborine na ENSO+ i ENSO++ (slike 3.11d i e) uglavnom je simetrično u odnosu na negativnu fazu, a određena asimetrija se uočava u području istočnog Mediterana. Prostorna raspodjela polja oborine za slučaj kada su obje pojave neutralne (slika 3.11c) slična je onoj za ENSO- (slika 3.11a), samo s manjim amplitudama. Usporedbom dobivenih rezultata s opaženom oborinom postoji kvalitativno slaganje, osim za ENSO- nad područjem istočnog Mediterana. Jače anomalije oborine su nad područjem PNA nego nad NAE. Za ENSO++ prostorna raspodjela regresijskog koeficijenta oborine i NINO3.4 indeksa (slika 3.12) podudara se s raspodjelom anomalija na području PNA (slika 3.11e), dok nad kontinentalnim područjem NAE-a ne postoji dobro slaganje. Na temelju ovih rezultata se čini da SPEEDY vjerno reproducira oborinu nad velikim morskim površinama te nad kopnom u

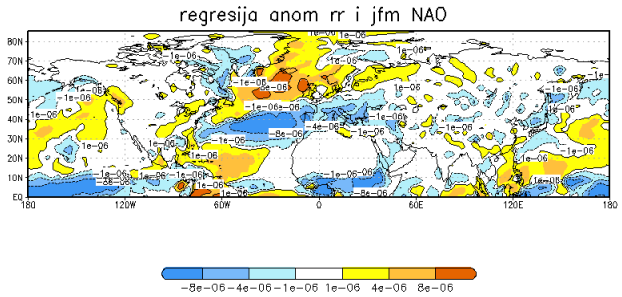
slučaju jakog signala, dok se nad dijelovima kopna gdje je forsirani signal slab uočavaju odstupanja u odnosu na izmjerene vrijednosti. Jedan od mogućih razloga neslaganja je to što reanaliza obuhvaća manje godina i uzima u obzir utjecaj drugih fenomena, a ne samo događaja kada je NAO pojava neutralna kao što je obuhvaćeno analizom po skupovima događaja za modelom SPEEDY. Također, SPEEDY je model relativno grube rezolucije i s pojednostavljenim parametrizacijama što može uzrokovati nedovoljno dobar prikaz oborine, posebno nad kompleksnom topografijom.

Na slici 3.13 prikazane su anomalije oborine za JFM sezonu za skupove događaja s jakim negativnim NAO-om. Usporedbom slika 3.13a,b,d,e sa slikom 3.13c utjecaj ENSO++ uz NAO-- vidljiv je u jačanju pozitivnih anomalija nad jugoistočnim SAD-om i Pacifikom te u smanjenju negativnih anomalija nad jugozapadnim SAD-om (slika 3.13e). ENSO-- jača negativne anomalije nad jugozapadnim SAD-om i proširuje polje na sjeveroistočni Pacifik te pomiče polje pozitivnih anomalija zapadnije na Pacifik (slika 3.13b). Utjecaj ENSO-a na polje oborine uz NAO- (slika 3.14) je isti kao i za NAO--.

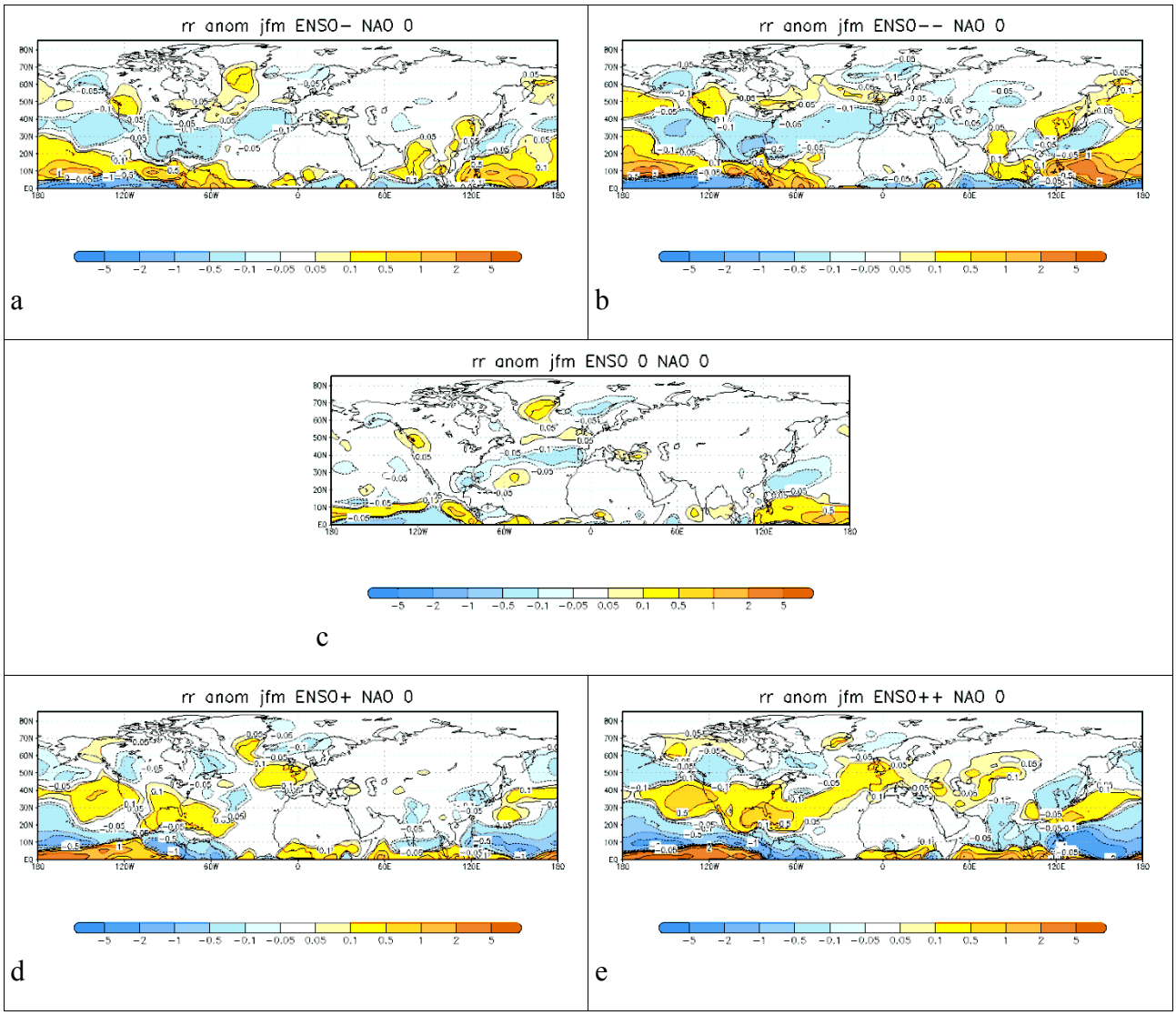
Pomoću slike 3.15 ispitujemo utjecaj ENSO-a na polje oborine uz jako pozitivan NAO. ENSO-- jača negativnu anomaliju iznad Atlantika sve do jugoistočnog SAD-a. Slabi pozitivne anomalije iznad jugozapadnog SAD-a i jača negativne anomalije iznad Pacifika. ENSO++ jača pozitivne anomalije iznad jugozapadnog SAD-a i proširuje polje na sjeveroistočni Pacifik odakle se polje negativnih anomalija pomiče zapadnije na Pacifik. Utjecaj ENSO-a na oborinu uz umjereni pozitivan NAO (slika 3.16) je isti kao i za NAO++. Što se tiče utjecaja ENSO-a na Europu nije uočen značajan utjecaj na polje oborine.



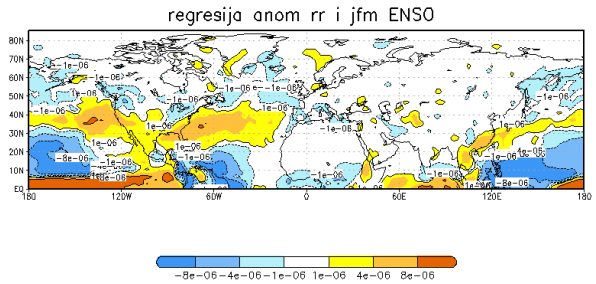
Slika 3.9 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim ENSO-om (podaci: model SPEEDY).



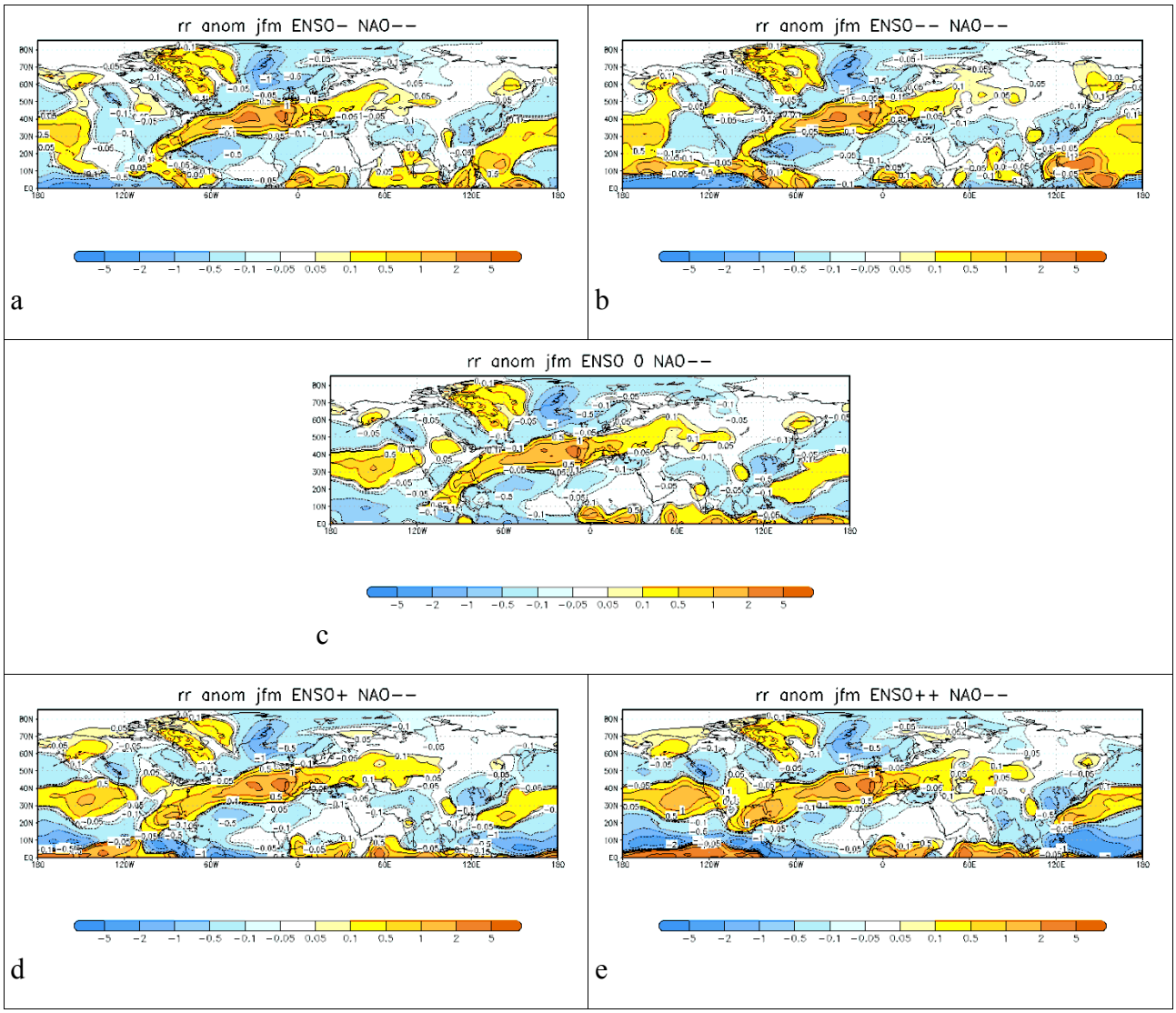
Slika 3.10 Regresijski koeficijent [mm/hPa] dobiven linearnom regresijom ukupne oborine i NAO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.



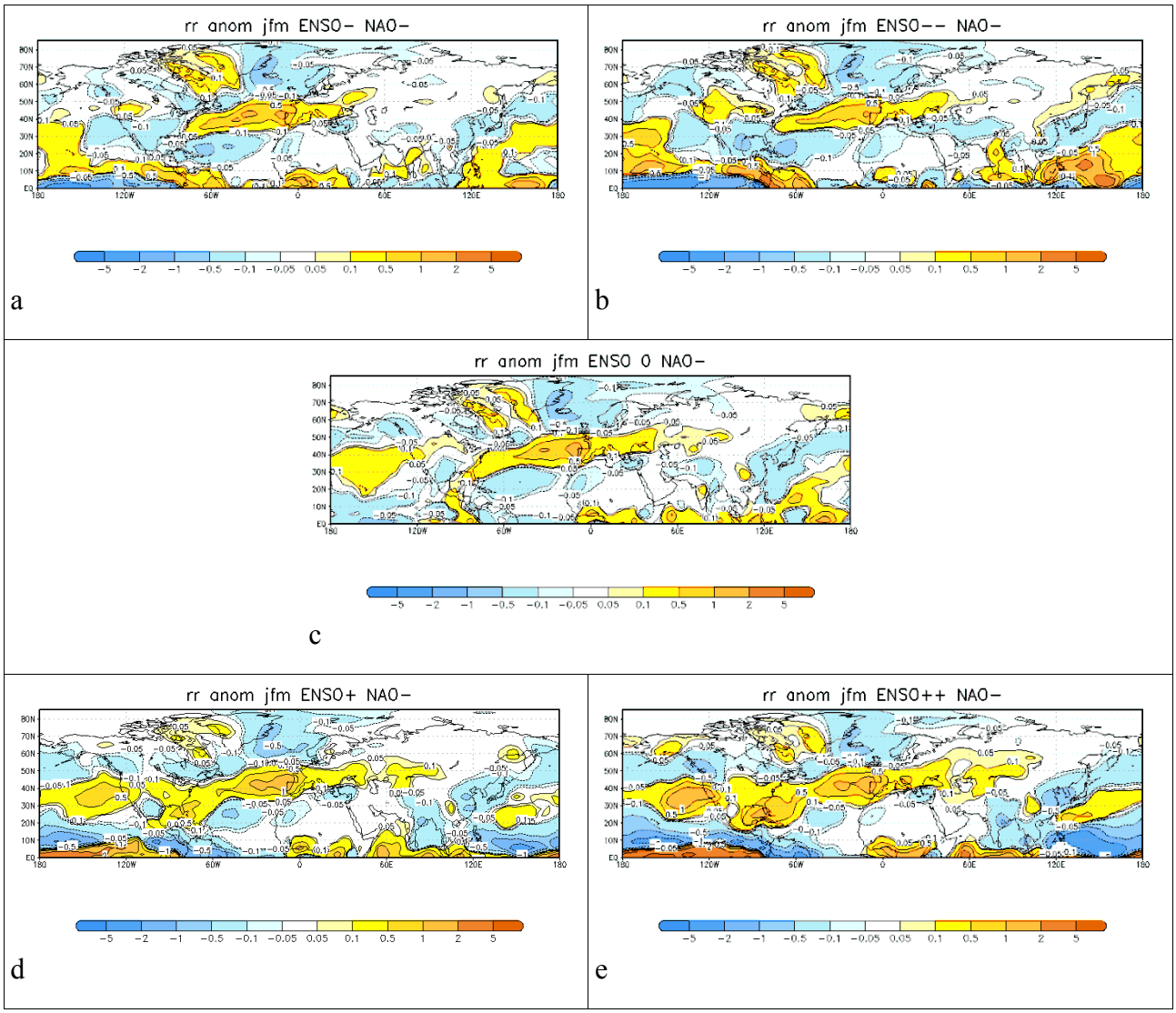
Slika 3.11 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



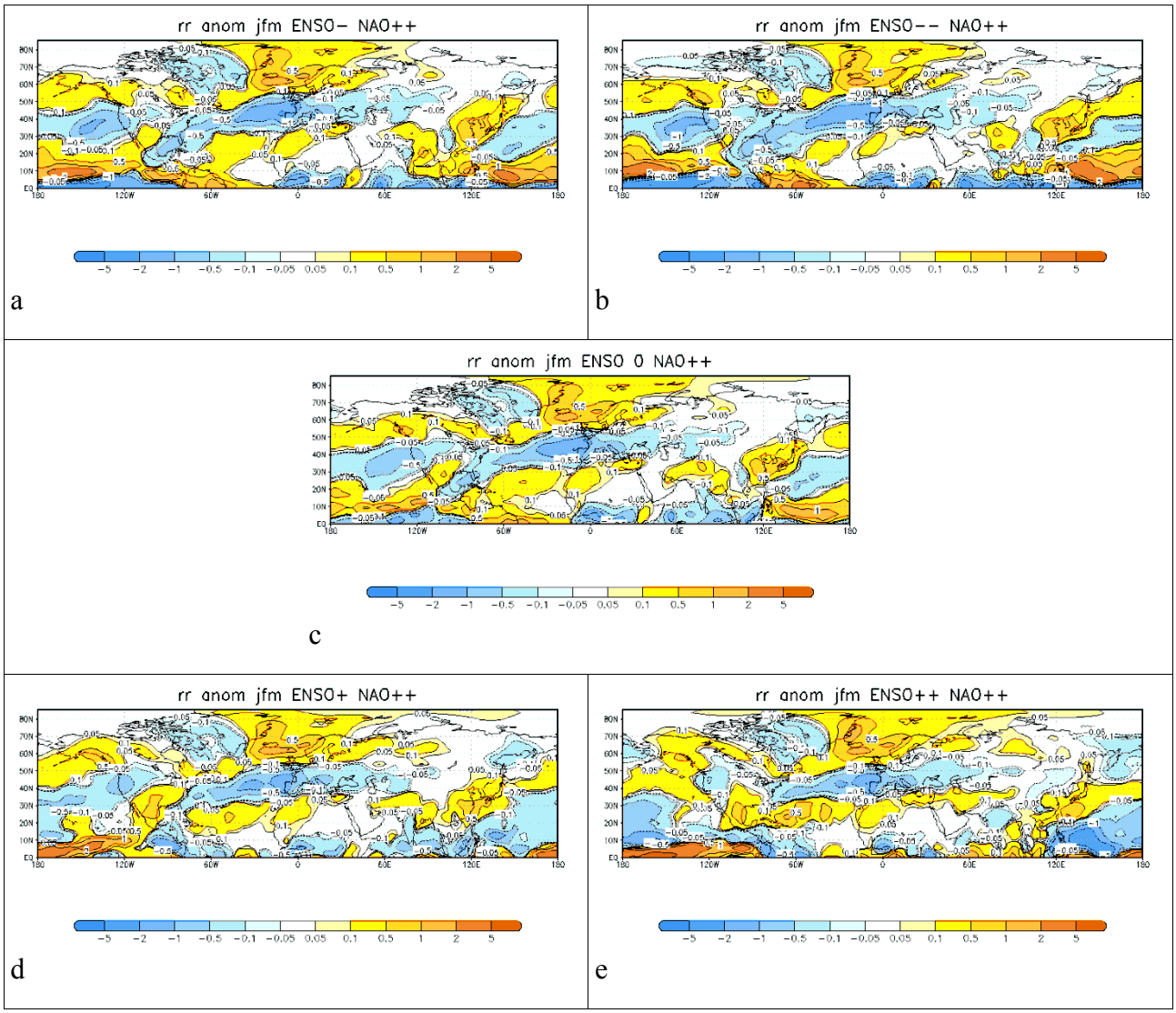
Slika 3.12 Regresijski koeficijent [mm/°C] dobiven linearnom regresijom ukupne oborine i ENSO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.



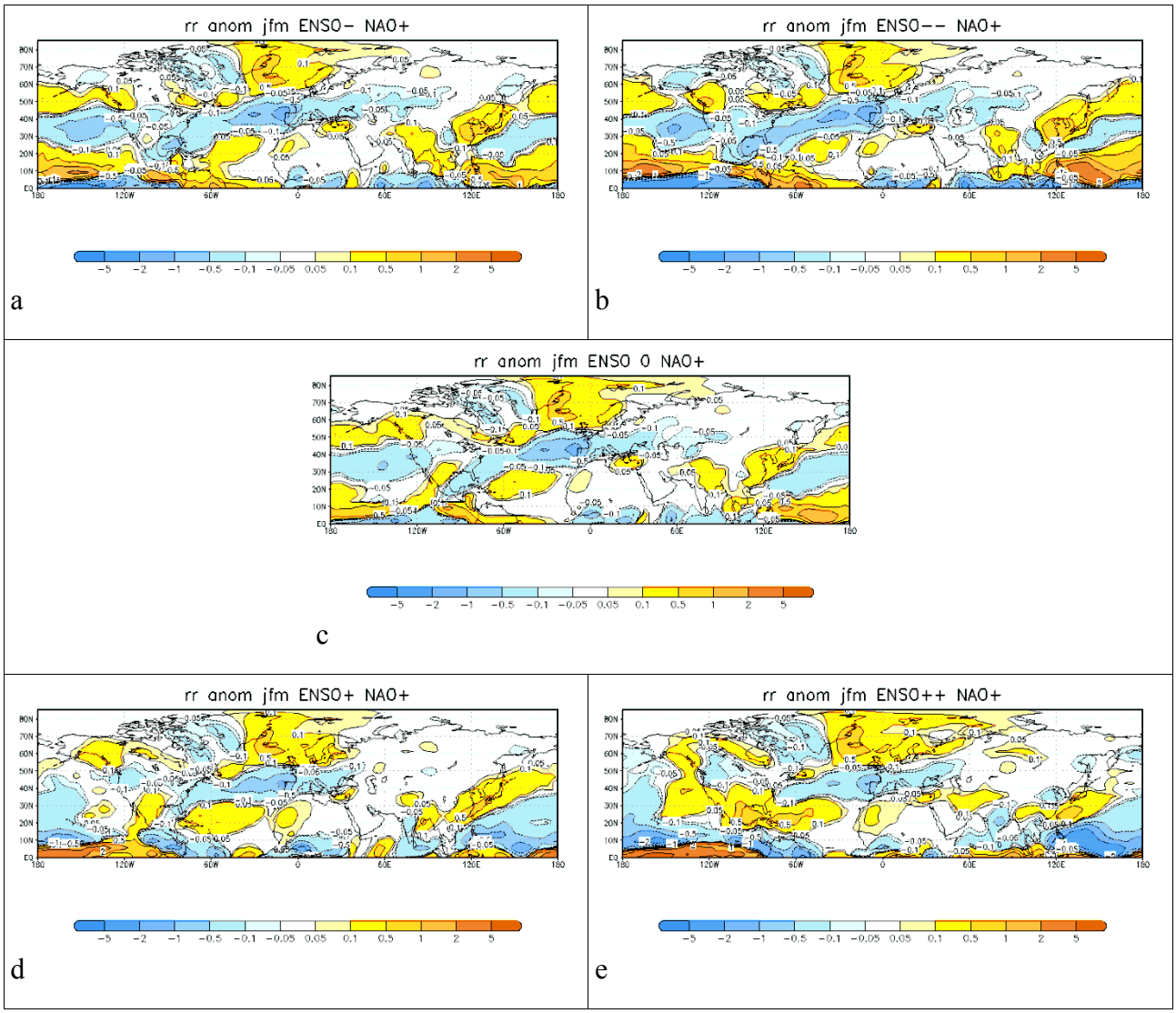
Slika 3.13 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s jakim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.14 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.15 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s jakim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.16 Anomalije ukupne oborine [mm] za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

3.3 *Temperatura na izobarnoj plohi od 925 hPa*

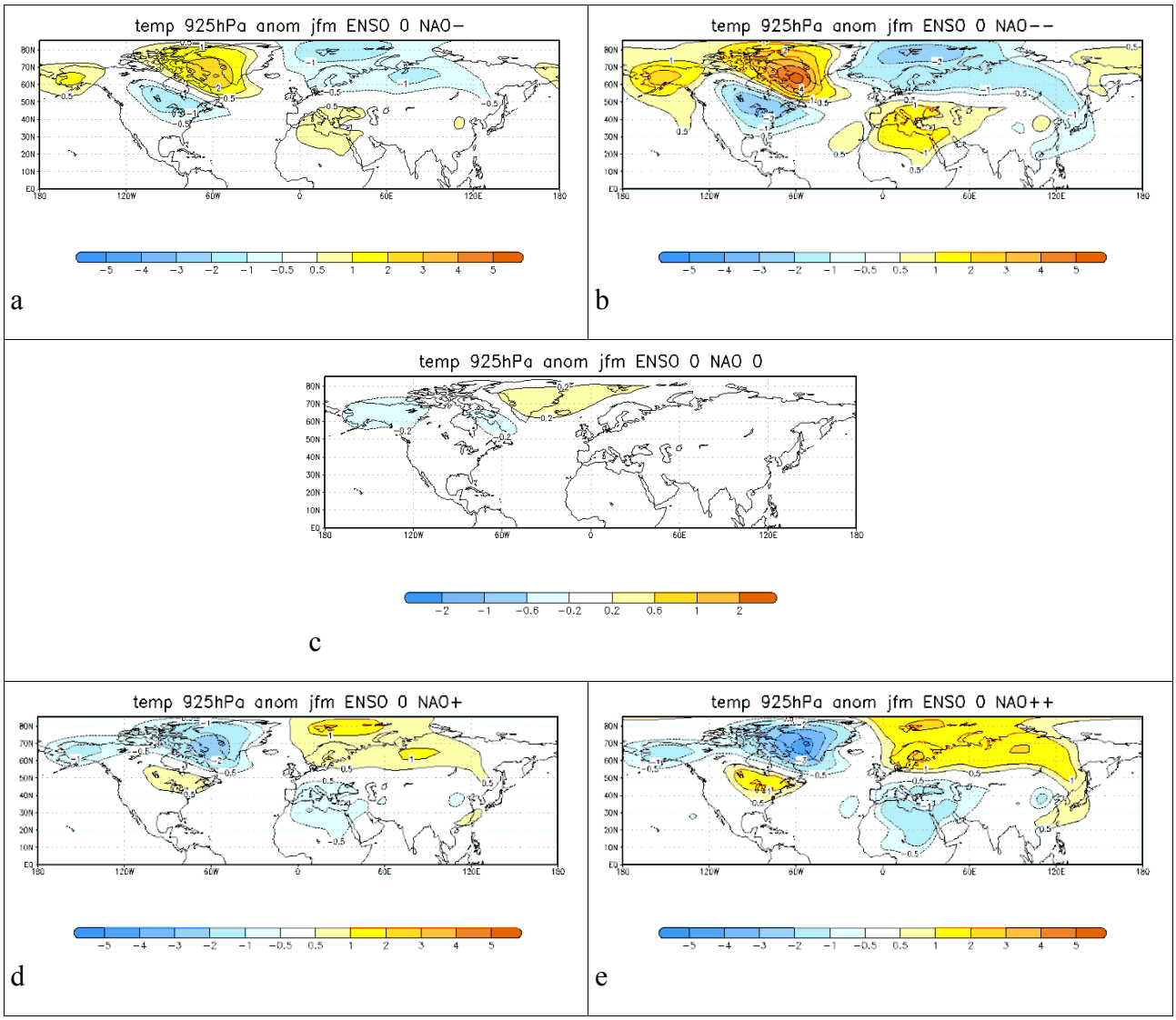
Na slici 3.17 prikazane su anomalije temperature na izobarnoj plohi od 925 hPa (T925) za JFM sezonu za neutralan ENSO događaj i sve kombinacije NAO događaja. Za NAO- (slika 3.17a) nad sjeveroistočnom Kanadom i Grenlandom te Aljaskom nalaze se polja pozitivnih anomalija T925, a iznad jugoistočne Kanade nalazi se polje negativnih anomalija amplitude do 1°C. Amplitude anomalija su manje iznad Europe u odnosu na područje PNA. Nad Skandinavijom se prostire polje negativnih anomalija, a na jugu Europskog kontinenta polje pozitivnih anomalija. Jačanjem negativne faze NAO-a (slika 3.17b) jačaju i anomalije polja T925 na cijelom području. Slika 3.17c koja prikazuje neutralni događaj obje pojave, napravljena je s manjim intervalom ocrtavanja. Iznad Grenlanda i Islanda nalazi se polje pozitivnih anomalija amplitude 0.2°C te polje negativnih amplituda iznad Aljaske i istoka Kanade. Ako utjecaj NAO+ događaja (slika 3.17d) usporedimo s onim za NAO- (slika 3.17a), uočavamo vrlo sličnu prostornu raspodjelu polja, samo što su predznaci anomalija suprotni. Jačanjem pozitivnog NAO-a jačaju i amplitude anomalija (slika 3.17e). Dobivena polja u skladu su s onim što je dosada opaženo i modelirano (Brönnimann, 2007.).

Usporedbom sa slikom regresijskog koeficijenta temperature na izobarnoj plohi 925 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu dobivenog na temelju reanalize NCEP-NCAR (slika 3.18) uočena je izrazita sličnost prostorne raspodjele polja za NAO++ (slika 3.17e) kao što je i uočeno za GH200 (slike 3.1e i 3.2).

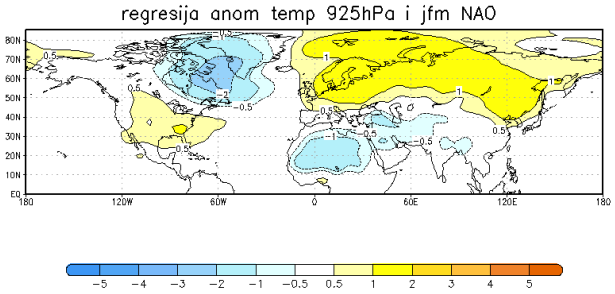
Za analizu utjecaja samo ENSO-a na T925 na slici 3.19 prikazani su skupovi događaja za neutralni NAO u kombinaciji sa svim kategorijama ENSO-a. ENSO- (slika 3.19a) utječe na polje negativnih anomalija T925 nad Aljaskom i većim dijelom Kanade te na polje pozitivnih anomalija nad Grenlandom. Iz tropskog Atlantika polje negativnih anomalija proteže se preko jugozapadne i sjeveroistočne Europe. Utjecaj jakog negativnog ENSO-a (slika 3.19b) jača polje negativnih anomalija nad Sjevernom Amerikom, polje pozitivnih anomalija nad Grenlandom slabi, a nad središnjim sjevernim Pacifikom javlja se polje pozitivnih anomalija T925. Pojavljuju se polja pozitivnih anomalija amplitude 0.2°C nad sjeveroistočnim i južnim SAD-om. Polje negativnih anomalija slabi nad središnjom Europom. Utjecaj ENSO+ (slika 3.19d) nad područjem Sjeverne Amerike očituje se u polju pozitivnih anomalija nad Sjevernom Amerikom, na obalama istočne Kanade u polju negativnih anomalija, a u središnjem sjevernom Pacifiku u polju negativnih anomalija. Nad Grenlandom još uvijek postoji polje pozitivnih anomalija. Nad većim dijelom Europe nema odziva, dok je nad sjeverozapadnom Afrikom, područjem Irana i Rusije uočen odziv u obliku slabog polja

pozitivne anomalije. Jačanjem pozitivnog ENSO-a (slika 3.19e) jačaju polja anomalija u Pacifiku, Sjevernoj Americi i Europi u odnosu na ENSO+, a u odnosu na ENSO-- situacija je simetrična uz suprotan predznak anomalija. Na ovim se slikama uočava da je odziv T925 na ENSO slab nad područjem Europe, ali također je vidljivo da su negativni i pozitivni ENSO događaji povezani sa sličnim poljem odziva suprotnih predznaka anomalija.

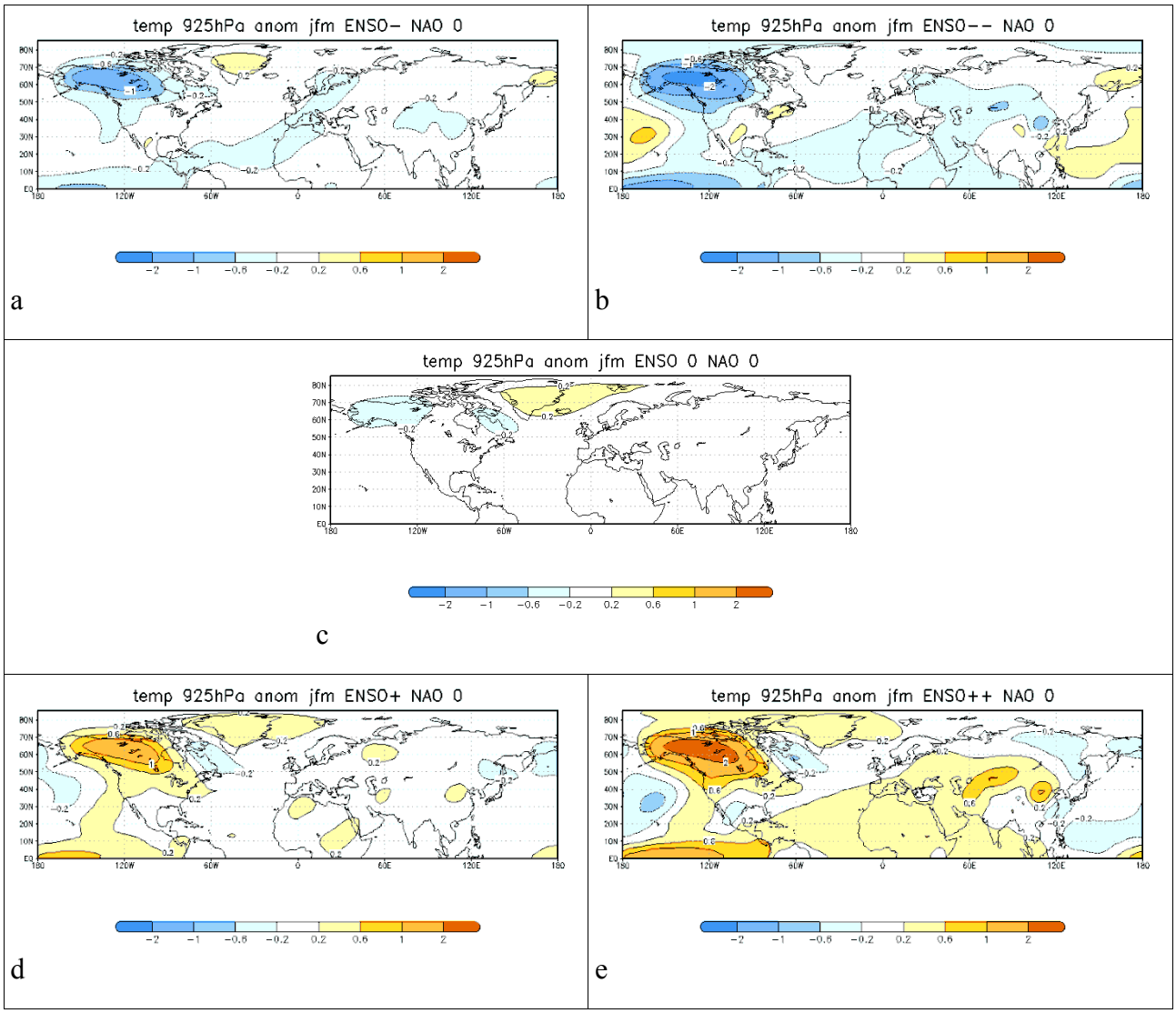
Usporedbom sa slikom regresijskog koeficijenta temperature na izobarnoj plohi 925 hPa i NINO3.4 indeksa za JFM sezonu dobivenog na temelju reanalize NCEP-NCAR (slika 3.20) uočeno je dobro slaganje s podacima dobivenim modelom SPEEDY na području PNA. Model daje više amplitude polja nad Aljaskom i Kanadom. Nad Europom podaci dobiveni NCEP-NCAR reanalizom ne pokazuju odziv T925 nad Europom. Budući da je nad Europom primijećen slab, ali statistički značajan odziv prizemne temperature na ENSO (Fraedrich i Müller 1992, Brönnimann, 2007., Li i Lau, 2011) koji se relativno dobro podudara s rezultatima na koje ukazuje model SPEEDY, može se zaključiti da je odziv T925 na ENSO dobiven modelom SPEEDY vjerodostojan. Odstupanje od tih rezultata na koje ukazuje reanaliza NCEP-NCAR (slika3.20) vjerojatno je posljedica same metode koja uvažava utjecaj i drugih fenomena (kao što je npr. NAO) te to što je regresijom obuhvaćeno kraće vremensko razdoblje.



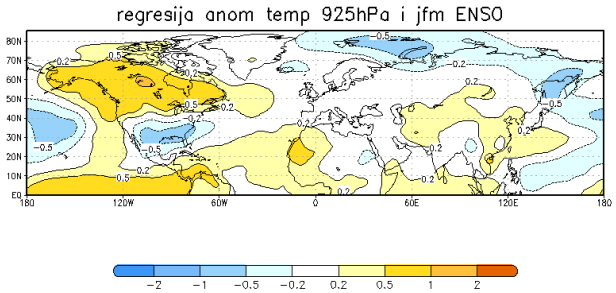
Slika 3.17 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim ENSO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.18 Regresijski koeficijent [°C/hPa] dobiven linearnom regresijom temperature na izobarnoj plohi 925 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

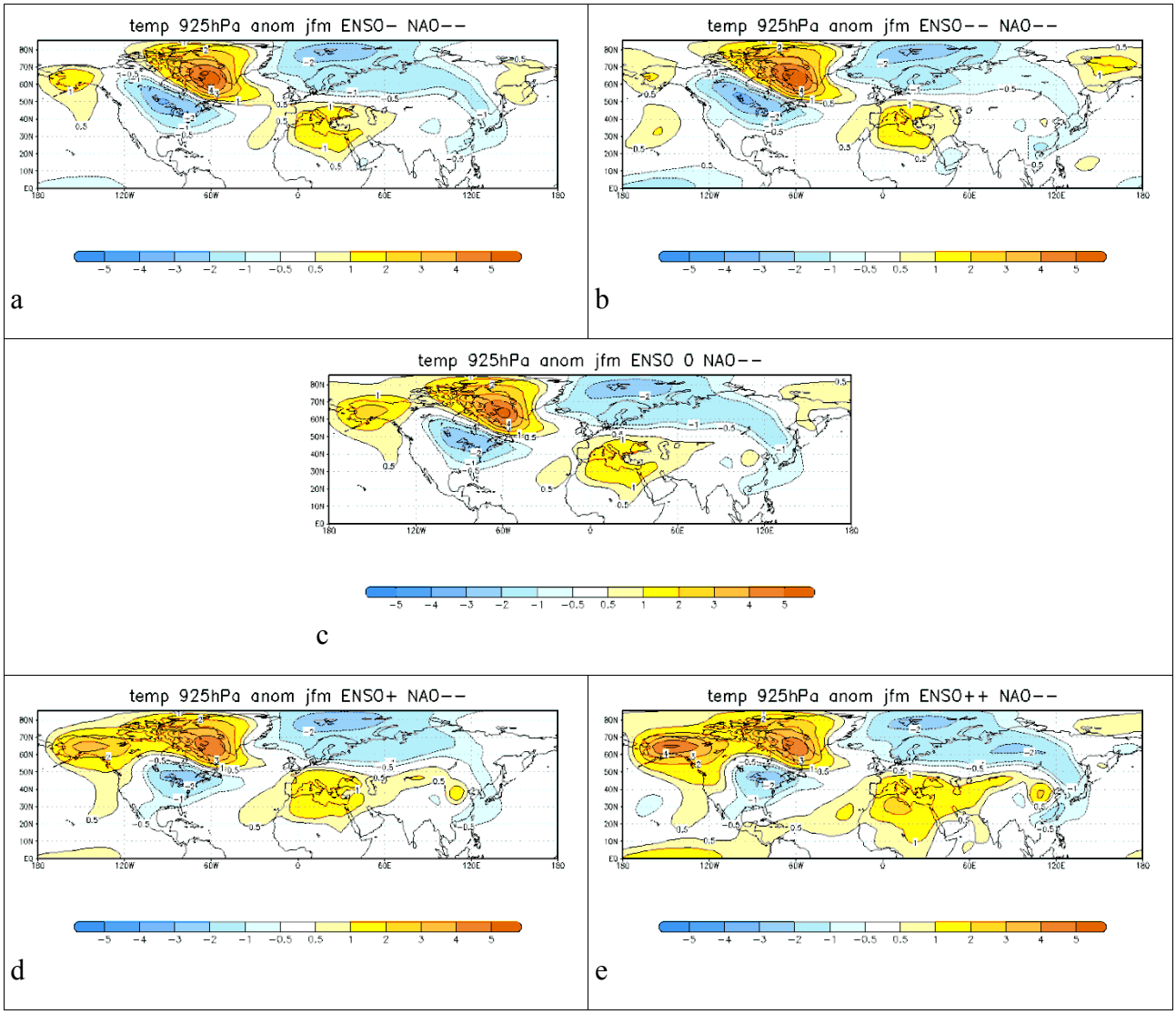


Slika 3.19 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



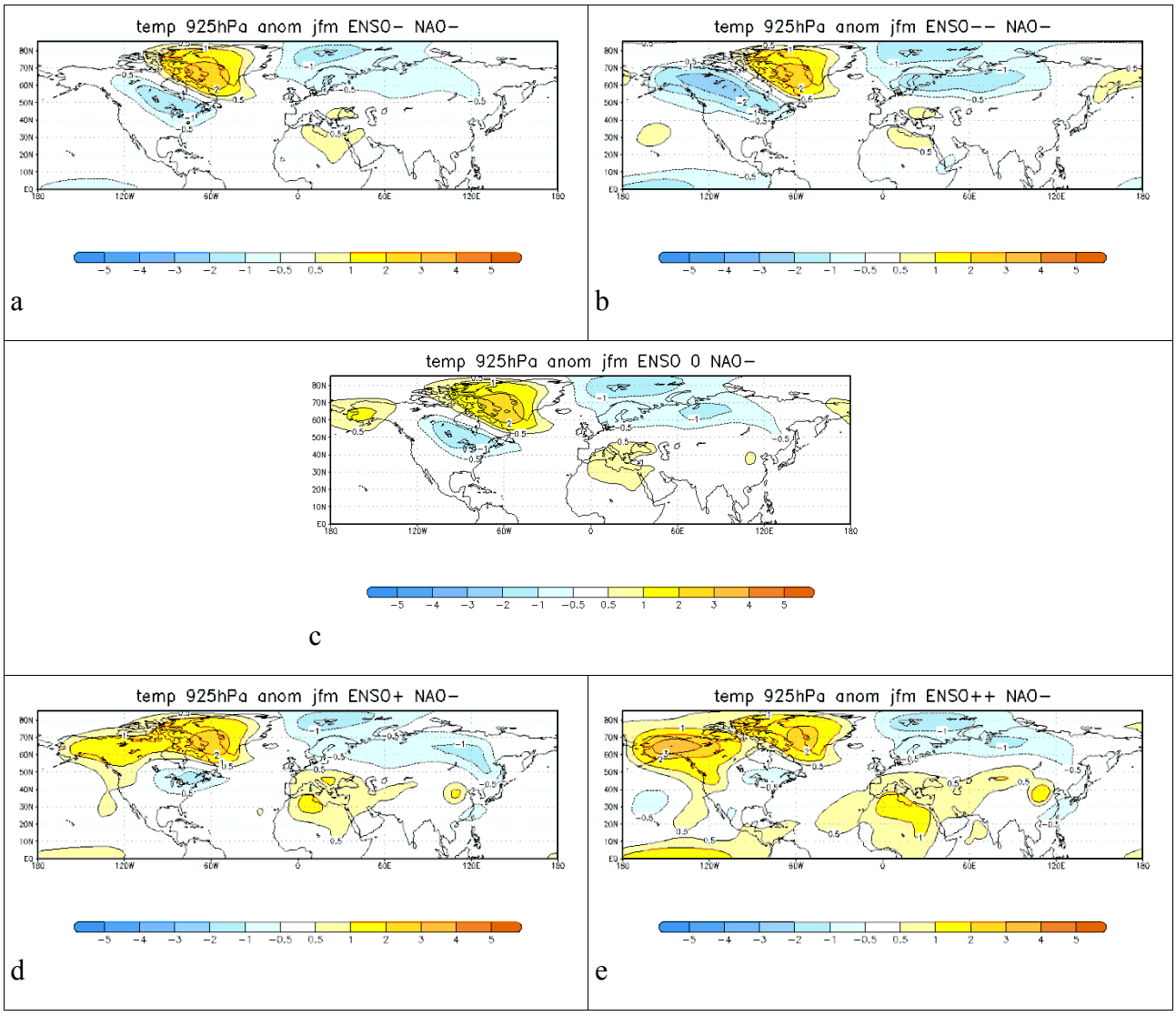
Slika 3.20 Regresijski koeficijent dobiven linearnom regresijom temperature na izobarnoj plohi 925 hPa i ENSO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.)..Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

Da bi ispitali kako pojava ENSO utječe na signal u polju T925 uz jaki negativan NAO, uspoređivane su slike 3.21a - e. Uočava se da ENSO- i ENSO-- (slike 3.21a i b) smanjuju amplitude pozitivnih anomalija T925 iznad Aljaske te jačaju amplitude polja negativnih anomalija nad Kanadom. Što se tiče područja NAE, ne primjećuju se značajne promjene u polju odziva. ENSO+ i ENSO++ pojačavaju polje pozitivnih anomalija T925 iznad Aljaske te smanjuju područje polja negativnih anomalija nad Kanadom (slike 3.21d i e). ENSO++ jača pozitivnu anomaliju nad Mediteranom i sjevernom Afrikom. Opažene promjene polja anomalija temperature nad Mediteranom u skladu su s promjenama polja anomalija GH200 (slika 3.5e).



Slika 3.21 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s jakim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

Utjecaj ENSO-a na signal povezan s NAO- analiziran je sa slike 3.22. Slike 3.22a-c pokazuju da ENSO- i ENSO-- događaji donekle smanjuju područje pozitivnih anomalija iznad Mediterana i južne Europe što je uočeno i za geopotencijal (slike 3.6a-c). Također je vidljivo jačanje polja negativnih anomalija iznad Kanade te slabljenje polja pozitivnih anomalija iznad Aljaske. ENSO+ i ENSO++ događaji jačaju polje pozitivnih anomalija iznad Grenlanda te slabe polje negativnih anomalija iznad jugoistočne Kanade. Pojačava se polje pozitivnih anomalija iznad Mediterana.



Slika 3.22 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

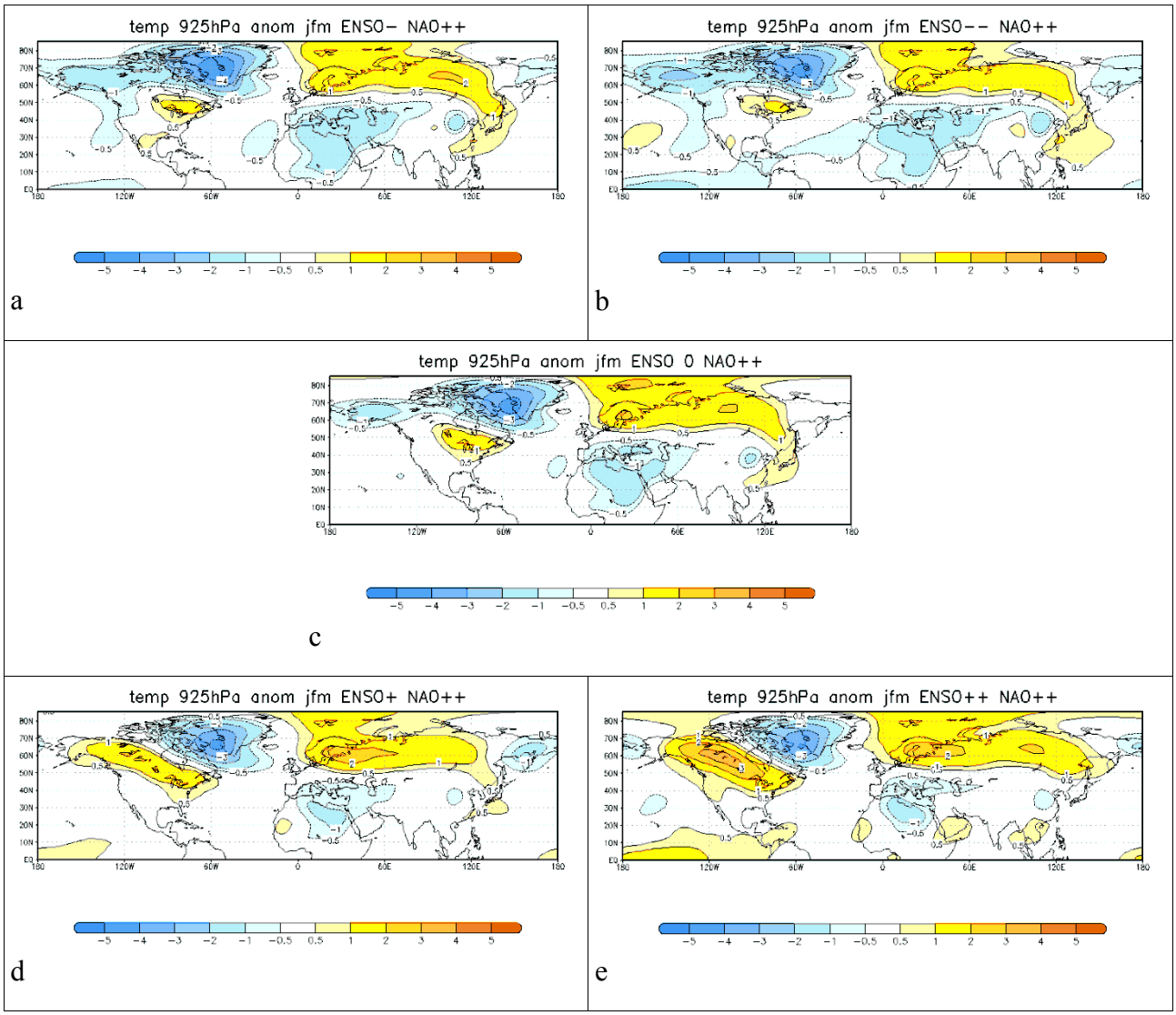
Za oba slučaja umjerenog i jakog negativnog NAO događaja primijećeno je da ENSO događaj mijenja signal na sljedeći način. ENSO- i ENSO-- jačaju polje negativnih i slabe polje pozitivnih anomalija nad PNA područjem. ENSO+ i ENSO++ jačaju polje pozitivnih anomalija nad PNA i NAE područjem te smanjuju polje negativnih anomalija nad područjem PNA. Za umjereni negativni NAO (NAO-), ENSO-- jača negativne i slabi pozitivne anomalije nad NAE područjem.

Utjecaj ENSO-a na signal NAO++ događaja analiziran je pomoću slike 3.23. ENSO- i ENSO-- (slike 3.23a i b) jačaju polje negativnih anomalija iznad sjeverne Kanade i Grenlanda, a slabe polje pozitivnih iznad jugoistočne Kanade. Nad Europom jača polje negativnih anomalija iznad južne Europe i Mediterana te slabi polje pozitivnih anomalija iznad Skandinavije za 1°C. Suprotan učinak vidljiv je kod nastupa ENSO+ i ENSO++ (slike 3.23d i e). Polje pozitivnih anomalija iznad jugoistočne Kanade jača i produžuje se prema Aljasci, dok polje negativnih anomalija iznad Grenlanda slabi. Iznad Skandinavije jača polje pozitivnih anomalija, a polje negativnih anomalija iznad južne Europe i Mediterana slabi.

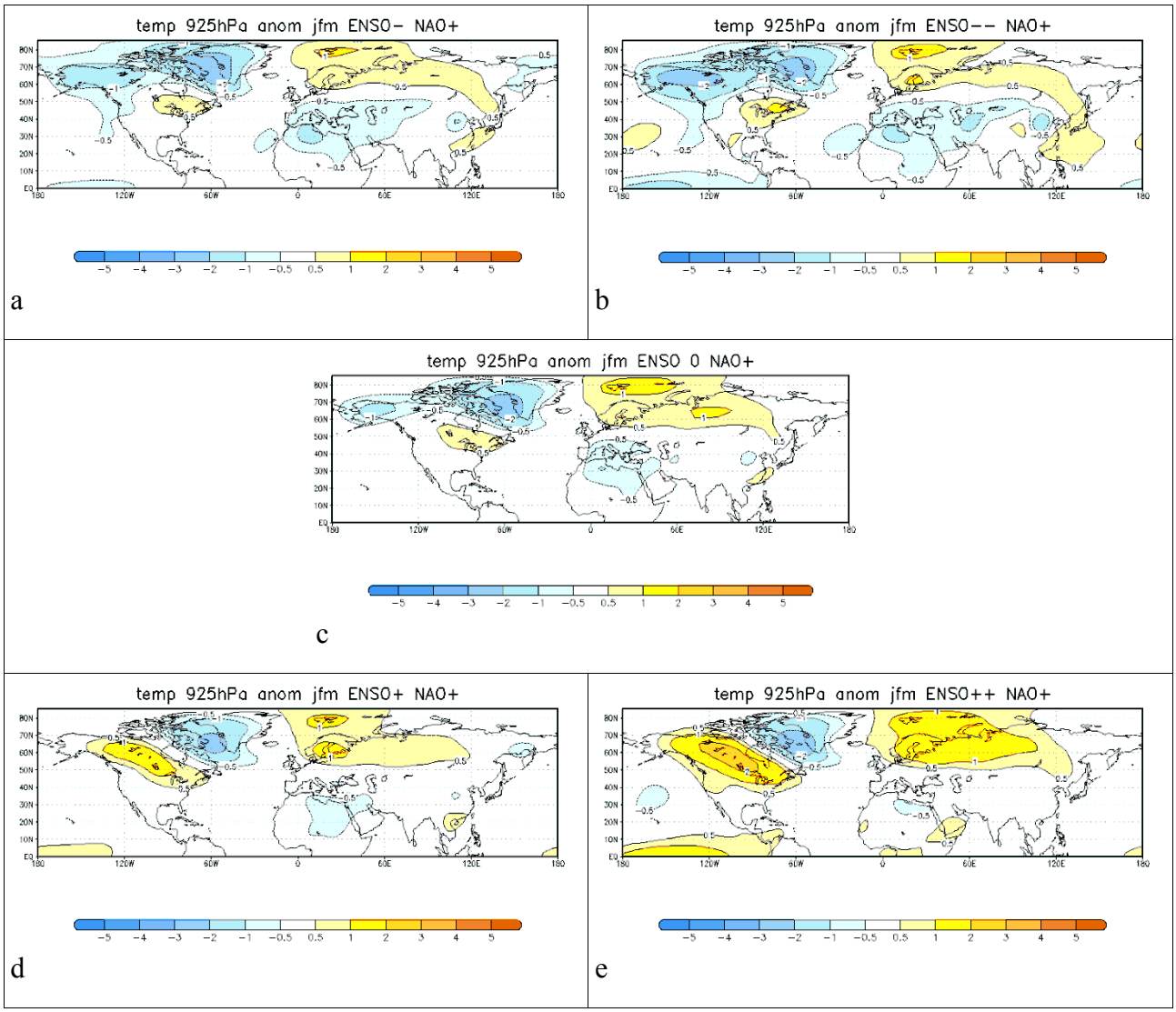
U odnosu na skup ENSO0 i NAO+ (slika 3.24c), ENSO- jača amplitude negativnih anomalija nad Aljaskom, sjevernom Kanadom i Grenlandom te jača polje negativnih anomalija nad južnom Europom (slika 3.24a). ENSO-- (slika 3.24b) dodatno jača amplitude negativnih anomalija nad Aljaskom i sjevernom Kanadom te nad Atlantikom i južnom Europom. Također jača amplitude pozitivne anomalije iznad Finske i jugoistočne Kanade. Promjenom faze ENSO-a u umjerenu/jaku pozitivnu (slike 3.24d i e) jačaju amplitude pozitivnih anomalija iznad jugoistočne Kanade i polje se produžuje prema Aljasci, dok negativne anomalije sjevernije slabe. Nad područjem NAE jačaju amplitude pozitivnih anomalija iznad Skandinavije i sjevera Europe, dok polje negativnih anomalija nad južnom Europom i Mediteranom oslabljuje.

Možemo zaključiti da kombinacijom pozitivnog NAO-a i pozitivnog ENSO-a jača polje pozitivnih anomalija T925 nad područjem PNA i NAE te slabi polje negativnih anomalija nad područjem PNA i NAE. U slučaju kombinacije pozitivnog NAO-a i negativnog ENSO-a, jača polje negativnih anomalija nad područjima PNA i NAE. Umjerena i jaka negativna faza ENSO-a praćena NAO++događajem slabi

pozitivne anomalije nad područjem PNA i NAE, dok ENSO-- uz NAO+ jača pozitivne anomalije nad područjem PNA i NAE.



Slika 3.23 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s jakim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



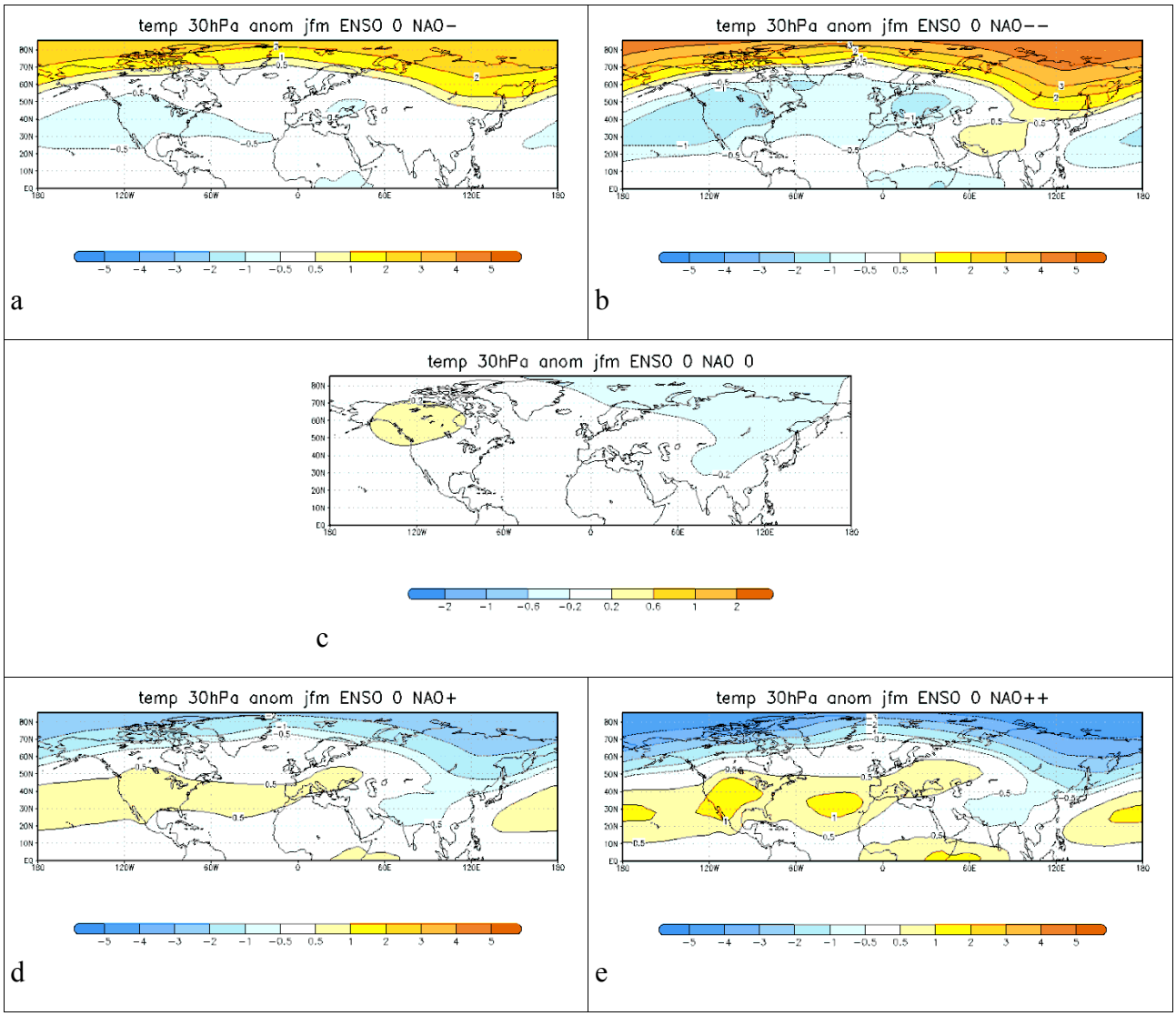
Slika 3.24 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 925 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

3.4 *Temperatura na izobarnoj plohi od 30 hPa*

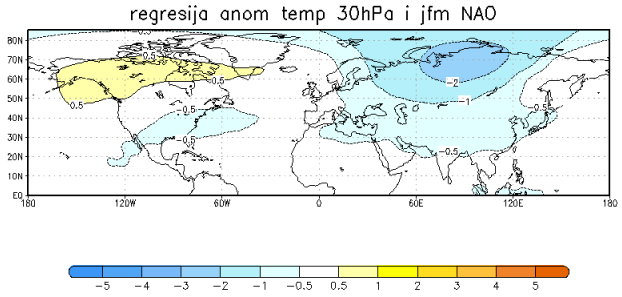
U nižoj stratosferi struktura geopotencijala pokazuje izrazitiju zonalnu simetričnost nego u troposferi. Kada je geopotencijal niži od uobičajenog na polu, geopotencijal u izvantropskim širinama je viši od uobičajenog i obrnuto. U prvom slučaju zapadni vjetrovi u stratosferi koji okružuju polarno područje ojačaju pa je polarni vrtlog jak i anomalno hladan. Istovremeno je na površini NAO uglavnom pozitivan (Baldwin i sur.,1994.; Perlwitz i Graf, 1995.; Kitoh i sur., 1996.; Kodera i sur., 1996.; Baldwin i Dunkerton, 1999.). Na slici 3.25 prikazane su anomalije temperature na izobarnoj plohi od 30 hPa (T30) za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim ENSO-om i svim kategorijama NAO. U modelu SPEEDY izobarna ploha od 30 hPa je najviši nivo koji predstavlja stratosferu. U slučaju NAO- događaja (slika 3.25a) nad arktičkim pojasom postoji polje pozitivnih anomalija amplitude do 2°C. Polje negativne anomalije amplitude 0.5°C proteže se od središnjeg sjevernog Pacifika preko SAD-a i južne Kanade do središnjeg sjevernog Atlantika. Slabo polje negativnih anomalija nalazi se i nad dijelom istočne Europe. Jačanjem negativne faze NAO događaja (slika 2.25b) jačaju i amplitude pozitivnih anomalija do 4°C, a polje se u odnosu na sliku 3.25a produbljuje sve do Indije. Polje negativnih anomalija proširuje se sa sjevernog Pacifika sve do Europe s dva akcijska centra nad Europom te SAD-om i sjeveroistočnim Pacifikom. Za slučaj umjerene pozitivne faze NAO-a (NAO+, slika 2.25d), anomalije temperature u arktičkom pojasu su negativne te se preko Azije pružaju do Indije. Polje pozitivnih amplituda pruža se od središnjeg dijela sjevernog Pacifika sve do Europe. Jačanjem pozitivne faze (slika 2.25e) amplitude T30 rastu, a polje pozitivnih anomalija ima tri akcijska centra: nad središnjim sjevernim Pacifikom, SAD-om i središnjim sjevernim Atlantikom. Polja anomalija temperature za obje faze NAO-a imaju sličnu prostornu raspodjelu no suprotan predznak amplituda.

Slučaj kada su obje pojave neutralne (slika 3.25c) prostornom raspodjelom podsjeća na slučaj pozitivne faze NAO-a, no s manjim amplitudama od 0.2°C.

Usporedbom slike 3.26 na kojoj je prikazan regresijski koeficijent T30 i NAO indeksa za JFM sezonu sa slikama 3.25 uočava se da prostorna raspodjela donekle nalikuje na slučaj ENSO0 NAO0. Moramo uzeti u obzir da je 3.26 napravljena na temelju podataka reanalize NCEP-NCAR koja obuhvaća manje godina i uzima u obzir utjecaj drugih fenomena kao što je ENSO, dok je analiza podataka dobivenih modelom SPEEDY napravljena tako da donekle umanjuje druge utjecaje.



Slika 3.25 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim ENSO-om (podaci: model SPEEDY).



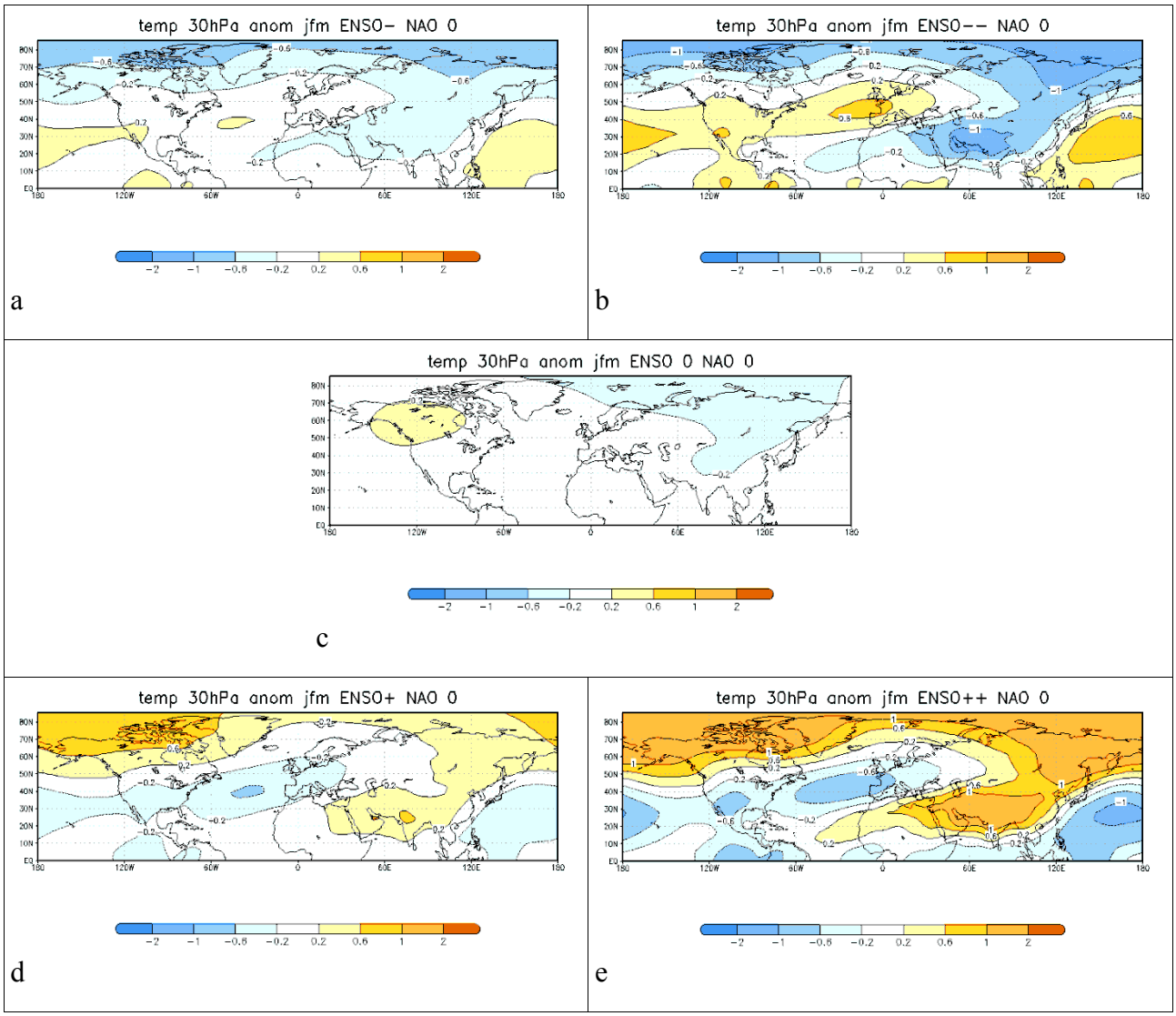
Slika 3.26 Regresijski koeficijent [°C/hPa] dobiven linearnom regresijom temperature na izobarnoj plohi 30 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

Brönnimann (2007.) je zaključio da je interakcija između stratosfere i troposfere dvosmjerna te da mogućoj silaznoj propagaciji signala obično prethodi uzlazna propagacija. Jačina i temperatura stratosferskog polarnog vrtloga u kasnoj zimi velikim dijelom je kontrolirana troposferskim planetarnim valovima. Oni ulaze u stratosferu i međudjeluju sa općom cirkulacijom atmosfere (Holton i sur., 1995.; Newman i sur., 2001.). Tijekom zime kad je prisutan El Niño, jače aktivni planetarni valovi propagiraju iz troposfere u stratosferu što uzrokuje slabljenje i zagrijavanje polarnog vrtloga (Brönnimann i sur., 2004.; Manzini i sur., 2006., Herceg-Bulić i sur., 2017.). Za La Niñe vrijedi obrnuto.

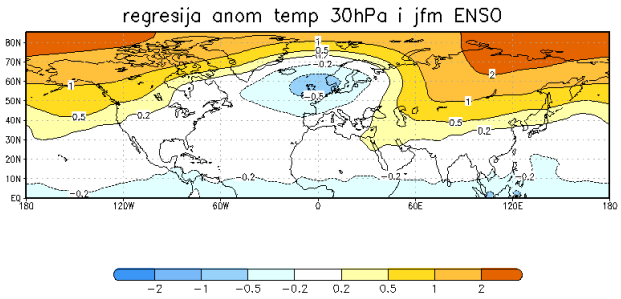
Na slici 3.27 prikazane su anomalije temperature na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim NAO-om. Intervali iscrtavanja su manji nego na ostalim slikama anomalija T30. Za ENSO- (slika 2.27a) polje negativnih anomalija se s arktičkog pojasa produbljuje na gotovo cijelu Aziju i dio sjeverne Afrike. Polje pozitivnih anomalija nalazi se nad središnjim sjevernim Pacifikom te nad središnjim Sjevernim Atlantikom. Amplitude su manje nego za NAO događaje. Amplitude jačaju jačanjem negativnog ENSO-a (slika 2.27b). Iznad Bliskog Istoka i Pakistana jača polje negativnih anomalija, a polje pozitivnih anomalija iznad središnjeg Sjevernog Atlantika pomiče se prema zapadnoj Europi. Za pozitivnu fazu ENSO-a (slike 3.27d i e) polje je simetrično u donosu na negativnu fazu te pokazuje gotovo istu prostornu raspodjela uz suprotni predznak amplituda anomalija.

Slika 3.28 prikazuje regresijski koeficijent dobiven linearnom regresijom T30 i NAO indeksa za JFM sezonu i nalikuje polju anomalija koje odgovara jakom pozitivnom ENSO-u (slika 3.27e). Na slici 3.28 se ne uočava jačanje pozitivnih anomalija nad jugoistočnom Azijom, a nad samim polom pokazuje jače anomalije. Polje negativnih anomalija nalazi se samo nad sjeverozapadnom Europom. Ipak, uzimajući u obzir karakteristike modela SPEEDY, može se zaključiti da model dobro reproducira utjecaj ENSO-a na temperaturu u stratosferi.

Za negativnog NAO-a polarni vrtlog je anomalno topao kao i za El Niña kada je pojačana aktivnost planetarnih valova, dok za pozitivan NAO i La Niña događaje vrijedi obrnuto. Analizom slika 3.29 - 3.32 proučavan je utjecaj ENSO-a na signal NAO-a u polju T30.

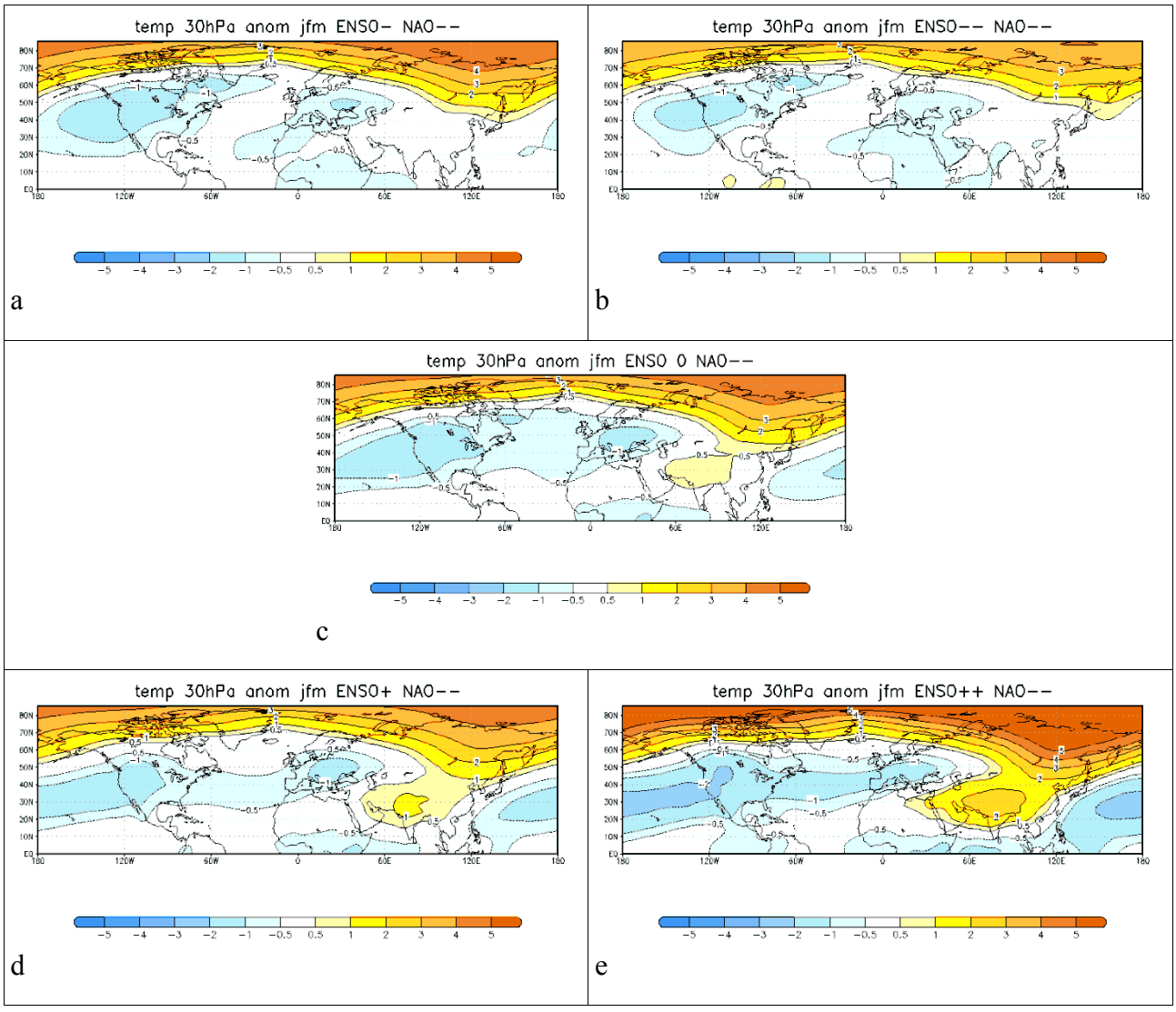


Slika 3.27 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s neutralnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.28 Regresijski koeficijent dobiven linearnom regresijom temperature na izobarnoj plohi 30 hPa i NAO indeksa za JFM sezonu (podaci: NCEP-NCAR reanaliza za razdoblje 1948.-2015.). Izvor: NOAA/ESRL Physical Sciences Division; www.esrl.noaa.gov/psd/.

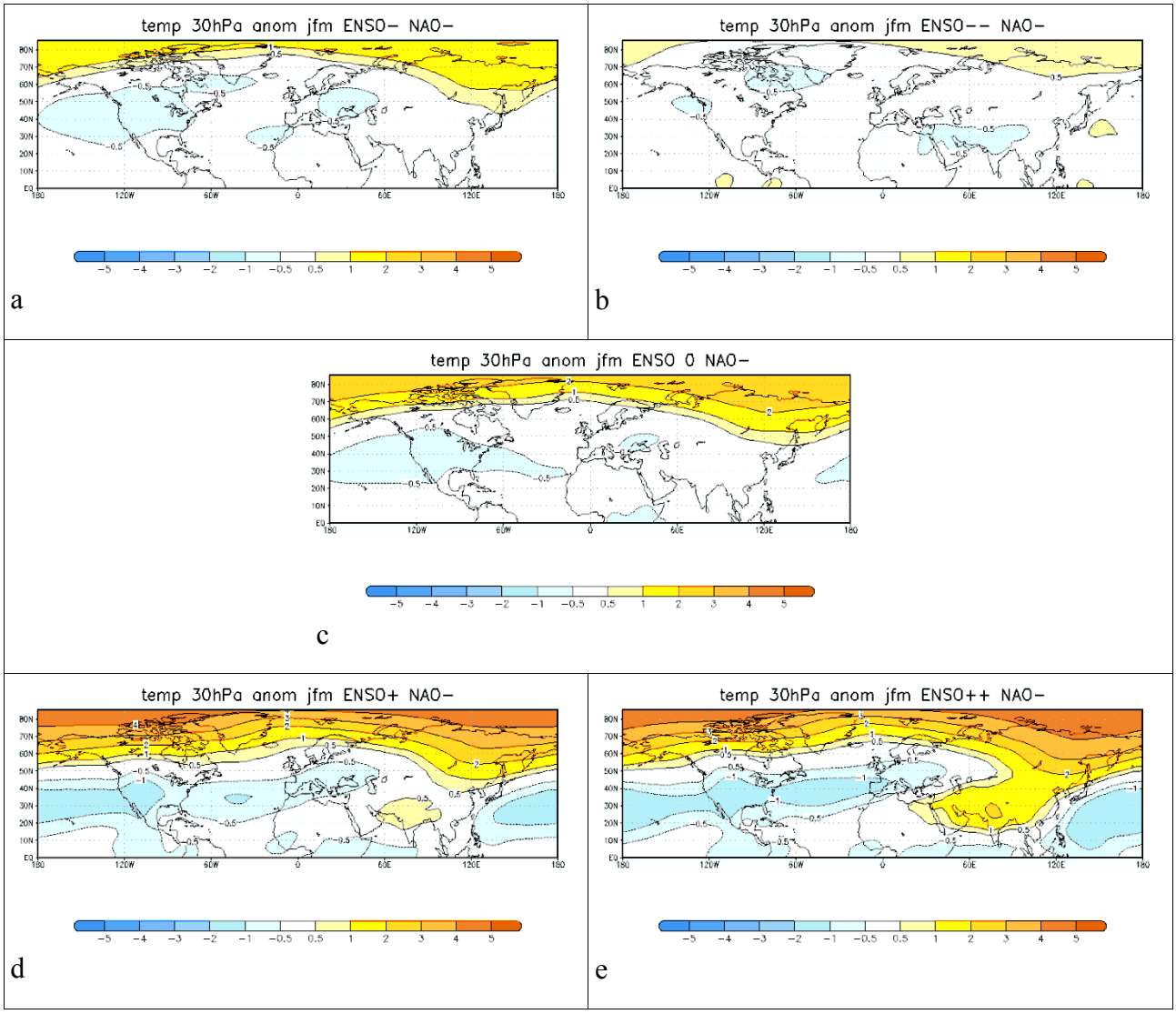
Situacija kad je ENSO neutralan uz NAO-- (slika 3.29c) uspoređivana je sa svim ostalim kombinacijama ENSO-a (slike 3.29a, b, d, e). ENSO- smanjuje površinu polja negativnih anomalija nad Atlantikom te umanjuje pozitivne anomalije nad Bliskim Istokom i Pakistanom. Jačanjem negativnog ENSO-a, smanjuje se amplituda polja pozitivnih anomalija nad arktičkim pojasom te negativnih nad Europom. ENSO+ jača amplitude pozitivne anomalije nad Bliskim Istokom i Pakistanom. Jačanjem pozitivnog ENSO-a jačaju amplitude polja pozitivnih i negativnih amplituda na cijelom području. Dakle, i ovdje se uočava da pozitivni ENSO pojačava polje odziva kad je u kombinaciji s NAO-- događajem. Negativni



Slika 3.29 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s jakim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

ENSO donekle oslabljuje polje odziva na NAO--, ali taj utjecaj nije tako izražen kao za pozitivni ENSO.

Slika 3.30 prikazuje anomalije temperature za skupove događaja s NAO- događajem i svim kategorijama ENSO-a. Da bi se ispitao mogući doprinos ENSO-a, uspoređujemo sliku 3.30c s ostalim kategorijama ENSO događaja. ENSO- (slika 3.30a) slabi amplitude polja pozitivnih anomalija, smanjuje polje negativnih anomalija iznad središnjeg sjevernog Atlantika i sjevernog Pacifika te povećava utjecaj negativnog polja nad istočnom Europom. Utjecaj ENSO-- događaja (slika 3.30b) dodatno smanjuje amplitude pozitivnih anomalija te oslabljuje polje negativnih anomalija nad Europom i smanjuje polje negativnih anomalija nad Sjevernom Amerikom. Promjenom faze ENSO-a u ENSO+ (slika 3.30d), jačaju amplitude



Slika 3.30 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim negativnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

pozitivnih anomalija na sjeveru i javlja se pozitivno polje nad Pakistanom i Indijom. Jača i polje negativnih anomalija od Europe do Pacifika. Jačanjem pozitivnog ENSO-a (slika 3.30e) dodatno jačaju anomalije T30.

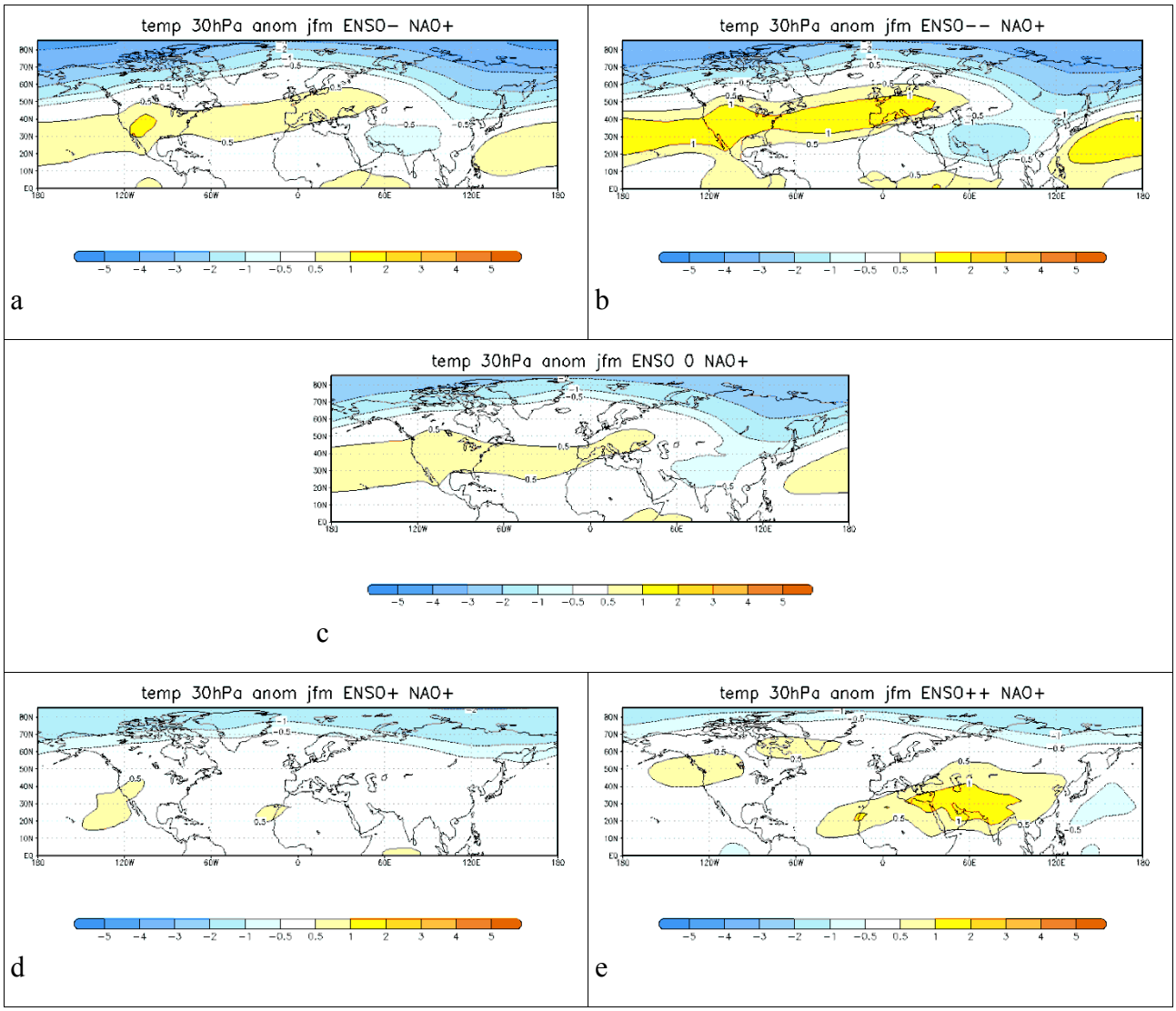
Kao i za slučaj utjecaja ENSO-- na polje T30 slijedi zaključak da u odnosu na kombinaciju ENSO0 NAO-, pozitivni ENSO pojačava signal u polju T30 povezan s NAO-, a negativni ENSO ga slabi.

Da bi ispitali utjecaj ENSO-a na signal povezan s NAO+ događajem, uspoređeno je polje odziva za kombinaciju neutralnog ENSO-a i NAO+ s ostalim kombinacijama (slika 3.31). ENSO- (slika 3.31a) jača negativne anomalije u arktičkom pojasu i jača polje pozitivnih anomalija nad istočnim SAD-om. Isti utjecaj vidljiv je sa slike 3.31b za ENSO--. ENSO+ (slika 3.31d) slabi anomalije negativnih anomalija u arktičkom pojasu i eliminira polje pozitivne anomalije nad Europom, velikim dijelom Atlantika, SAD-a i Sjevernog Pacifika. U odnosu na ENSO0 NAO+ (slika 3.31c), ENSO++ (slika 3.31e) smanjuje negativne anomalije u arktičkom pojasu, eliminira polje pozitivnih anomalija u središnjem Sjevernom Atlantiku i Sjevernom Pacifiku. Javlja se polje pozitivnih anomalija sa središtem nad Bliskim Istokom i Pakistanom amplitude 1°C.

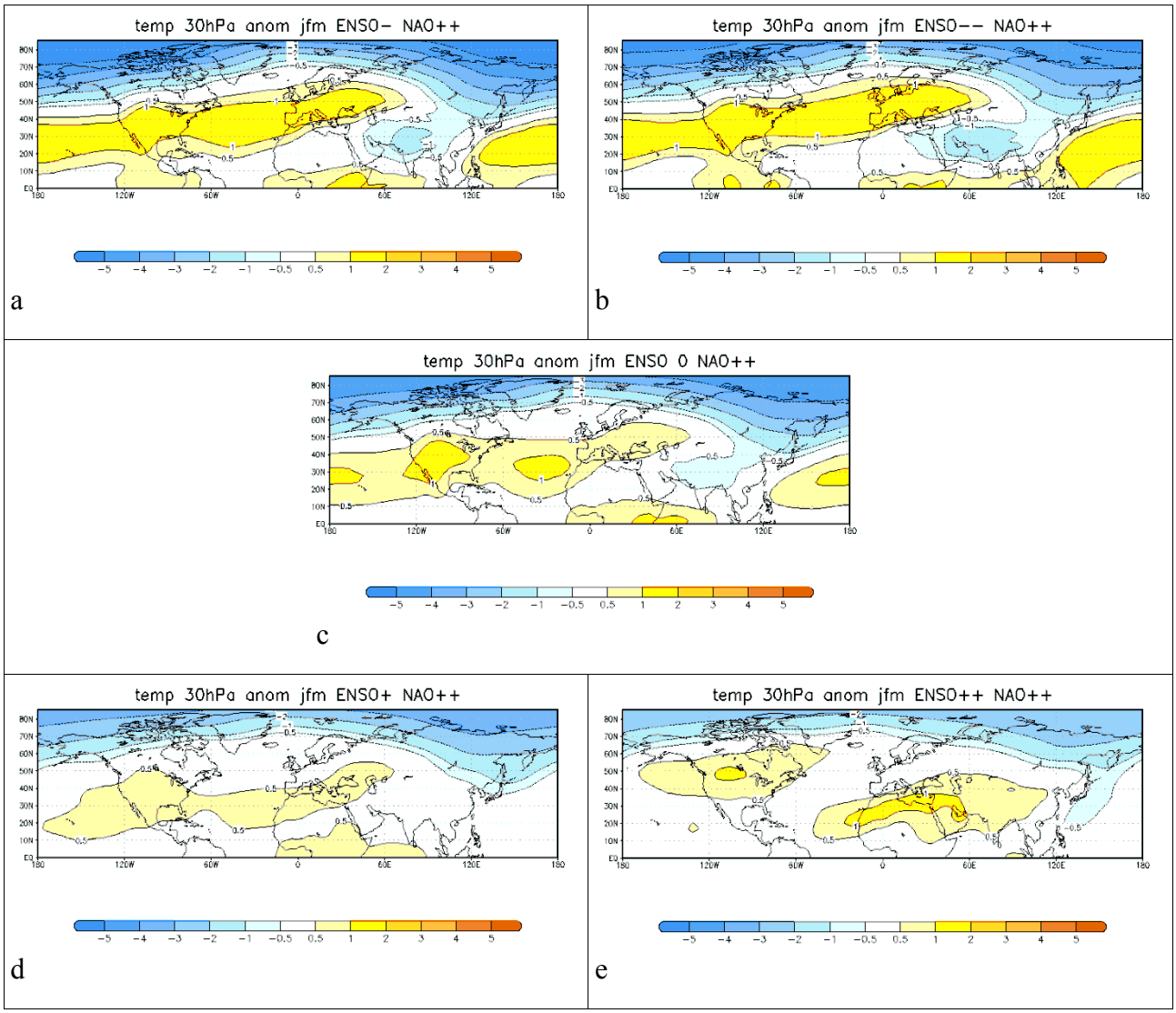
Negativan ENSO (ENSO- i ENSO--) jača signal povezan s NAO+ događajem u polju T30, a ENSO+ ga slabi. ENSO++ slabi isti signal uz iznimku pojave polja pozitivnih anomalija nad Bliskim Istokom i Pakistanom.

Slika 3.32 prikazuje anomalije temperature za skupove događaja s NAO++ i svim kategorijama ENSO-a. U odnosu na sliku 3.32c kad je ENSO neutralan, ENSO- (slika 3.32a) i ENSO-- (slika 3.32b) jačaju negativne anomalije u arktičkom pojasu i nad Bliskim Istokom i Pakistanom te jačaju polje pozitivne anomalije od Europe do zapadnog Sjevernog Pacifika. ENSO+ (slika 3.32d) slabi polje negativnih anomalija u arktičkom pojasu i nad Bliskim Istokom i Pakistanom te slabi polje pozitivnih anomalija od Europe do zapadnog Sjevernog Pacifika. ENSO++ (slika 3.32e) slabi amplitude polja negativnih i pozitivnih anomalija, a u odnosu na ENSO+ jača amplitude pozitivnih anomalija nad Kanadom i jugoistočnim Mediteranom i sjevernom Afrikom.

U slučaju NAO++, negativni ENSO jača signal u polju T30, a ENSO+ ga slabi. ENSO++ također slabi taj signal, no u usporedbi s umjerenim pozitivnim ENSO događajem jača amplitude pozitivnih anomalija.



Slika 3.31 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s umjerenim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).



Slika 3.32 Anomalije temperature [°C] na izobarnoj plohi 30 hPa za JFM sezonu za skupove događaja s jakim pozitivnim NAO-om (podaci: model SPEEDY).

4 Zaključak

NAO je najintenzivniji mod klimatske varijabilnosti na sjevernoj hemisferi s izrazitim utjecajem na klimatsku varijabilnost Europe, dok se za utjecaj ENSO-a pokazalo da ima slab, ali statistički značajan utjecaj na klimatsku varijabilnost Europe. Da bi se ispitalo kako utjecaj jedne pojave modificira utjecaj druge, napravljen je ansambl od 35 numeričkih simulacija modelom SPEEDY. U tom je eksperimentu kao donji rubni uvjet postavljeno polje izmjerenih vrijednosti SST u svim oceanima u vremenskom razdoblju od 1854. do 2010. godine. Kako bi se pokušao detektirati signal povezan samo s jednom od pojava (ENSO ili NAO) te njihovim raznim kombinacijama, napravljena je analiza po skupovima događaja uzimajući u obzir predznake i vrijednosti indeksa NAO i indeksa NINO3.4. NAO indeks određen je kao vremenska komponente prvog moda (PC1) dobivenog analizom EOF polja tlaka na srednjoj razini mora, a indeks NINO3.4 je dobiven kao površinski srednjak anomalija SST-a u Nino3.4 području. Na temelju vrijednosti indeksa NAO i NINO3.4, godine su kategorizirane u 25 skupova. Uočeno je da se pozitivna faza NAO-a događa češće u kasnoj zimi uz La Niña događaje, a negativna faza NAO-a događa se češće za El Niño događaja. Najviše godina razmatranog razdoblja pripada kategoriji kada su obje pojave neutralne. Pozitivna faza NAO-a događa se češće u kasnoj zimi za neutralnog ENSO događaja nego negativna faza NAO-a.

U ovom radu razmatrani su sljedeći parametri: geopotencijalna visina izobarne plohe od 200 hPa (GH200), ukupna oborina, temperatura na izobarnim plohama od 925 hPa (T925) i 30 hPa (T30), a područje interesa analize je područje Pacifika i Sjeverne Amerike (PNA) i područje sjevernog Atlantika i Europe (NAE). Polja parametara dobivena modelom SPEEDY za situaciju kada je jedna pojava neutralna dok je druga pozitivna ili negativna, su u skladu s dosadašnjim istraživanjima (Hurrell i sur., 2003.; Brönnimann, 2007.). Usporedbom polja dobivenih modelom SPEEDY s podacima dobivenim reanalizom NCEP - NCAR uočeno je dobro slaganje polja GH200, oborine, T925 za utjecaj NAO-a. Međutim, za utjecaj ENSO-a nad područjem PNA slaganje je dobro, dok nad područjem NAE postoje određena odstupanja. Jedan od mogućih razloga neslaganja je to što reanaliza obuhvaća manje godina i uzima u obzir utjecaj drugih fenomena, a ne samo događaja kada je NAO pojava neutralna. Model bolje reproducira utjecaj ENSO-a na T30 nego što je dobiveno za utjecaj NAO-a. Pri interpretecaiji ovih rezultata, svakako treba uzeti u obzir da je stratosfera u modelu SPEEDY predstavljena tek s dva nivoa (30 i 100 hPa), što svakako predstavlja izvor nepouzdanosti rezultata koji se odnose na visoku troposferu i stratosferu. Usprkos tome, može se zaključiti

da model zadovoljavajuće reproducira signale i na tim visinama, posebice onaj vezan uz ENSO.

Rezultati ovog rada su pokazali da signal u polju geopotencijala, oborine i temperature prvenstveno ovisi o utjecaju NAO-a. Međutim, signal može biti modificiran ENSO-om, posebice tijekom jakih pozitivnih ENSO (El Niño) događaja. Utjecaj pozitivnog ENSO-a je sličan utjecaju negativnog ENSO-a, ali je jači i suprotnog predznaka. Nadalje, utjecaj pozitivnog ENSO-a ugrubo se projicira na polje negativnog NAO-a, a negativni se ENSO projicira na polje pozitivnog NAO-a. Stoga su i anomalije vezane uz negativni (pozitivni) NAO pojačane u slučaju istovremenog djelovanja pozitivnog (negativnog) ENSO-a.

Ovaj je rad pokazao da iako je utjecaj ENSO-a relativno slab, on ipak može amplificirati ili donekle prigušiti signal vezan uz pojavu NAO. Kako bi se zaključci dobiveni u ovom radu detaljnije istražili i potvrdili, potrebno je ovakvu analizu primijeniti i na rezultate dobivene drugim modelima i dostupne reanalize što može biti tema nekog budućeg istraživanja.

Literatura

Ambaum, M. H. P., Hoskins, B. J., Stephenson, B. D., 2001: Arctic Oscillation or North Atlantic Oscillation?, *J. Climate* 14: 3495-3507.

Baldwin, M. P., Cheng, X., Dunkerton, T. J., 1994: Observed correlations between winter-mean tropospheric and stratospheric circulation anomalies, *Geophys. Res. Lett.* 21: 1141-1144.

Baldwin, M. P., Dunkerton, T. J., 1999: Propagation of the Arctic Oscillation from the stratosphere to the troposphere, *J. Geophys. Res.* 104: 30937-30946.

Barnston, A. G., Livezey, R. E., 1987: Classification, seasonality and presistance of low-frequency atmospheric circulation patterns, *Mon. Weather Rev.* 115: 1083-1126.

Bjerknes, J., 1969: Atmospheric teleconnections from the equatorial Pacific, *Mon. Weather Rev.* 97: 163-172.

Brönnimann, S., Luterbacher, J., Staehelin, J., Svendby, T. M., Hansen, G., Svenøe, T., 2004: Extreme climate of the global troposphere and stratosphere 1940 - 1942 related to El Niño, *Nature* 431: 971-974.

Brönnimann, S., 2007: Impact of El Niño - Southern Oscillation on European climate, *Rev. Geophys.* 45: RG3003.

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

Dommenget, D., Latif, M., 2002: A cautionary note on the interpreta-tion of EOFs, *J. Climate.* 15: 216-225.

Fraedrich, K. K., Müller, 1992.: Climate anomalies in Europe associated with ENSO extremes, *Int. J. Climatol.* 12: 25-31.

Fukuoka, A. 1951: A Study of 10-day Forecast (A Synthetic Report), Vol. XXII. *Geophys. Mag.* 22: 177-218.

Gillett, N. P., Graf, H F., Osborn, T.J., 2003: Climate change and the North Atlantic Oscillation, In: Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Visbeck, M., Ottersen, G. (Eds.), The North Atlantic Oscillation, climatic significance and enviromental impact., *AGU Geophysical Monograph* 134: 193-209.

Hannachi, A., Jolliffe, I. T., Stephenson, D. B., Trendafilov, N., 2006: In search of simple structures in climate: simplifying EOFs., *Int. J. Climatol.* 26: 7-28.

Hannachi, A., Jolliffe, I.T., Stephenson, D. B., 2007: Empirical orthogonal functions and related techniques in atmospheric science: A review, *Int. J. Climatol.* 27: 1119-1152.

Herceg-Bulić, I., Branković, Č., 2007: ENSO forcing of the Northern Hemisphere climate in a large ensemble of model simulations based on a very long SST record., *Clim. Dyn.* 28: 231-254.

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

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. *Int. J. Climatol.* 37: 87-108. doi: 10.1002/joc.4980.

Holton, J. R., Haynes, P. H., McIntyre, M. E., Douglass, A. R., Rood, R. B., Pfister, L., 1995: Stratosphere-troposphere exchange, *Rev. Geophys.* 33: 403-439.

Horel, J. D., Wallace, J. M., 1981: Planetary-scale atmospheric phenomena associated with the Southern Oscillation, *Mon. Weather Rev.* 103: 813-829.

http://users.ictp.it/~kucharsk/speedy_description/km_ver41_appendixA.pdf

https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/correlation/

https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html

https://www.metoffice.gov.uk/learning/learn-about-the-weather/how-weather-works/factors-that-influence-uk-winters

https://www.metoffice.gov.uk/research/climate/seasonal-to-decadal/gpc-outlooks/el-nino-la-nina/enso-impacts

https://www.weather.gov/jetstream/enso_patterns

Hurrell, J. W., 1995: W., Decadal trends in the North Atlantic oscillation: Regional temperatures and precipitation, *Science* 269: 676-679.

Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Visbeck, M., Ottersen, G., 2003: An overview of the North Atlantic Oscillation., In: Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Visbeck, M., Ottersen, G. (Eds.), The North Atlantic Oscillation, climatic significance and enviromental impact., *AGU Geophysical Monograph* 134: 1-35.

Kalnay, E. and Coauthors, 1996: The NCEP/NCAR Reanalysis 40-year Project, *Bull. Amer. Meteor. Soc*. 77: 437-471.

Kitoh, A., Doide, H., Kodera, K., Yukimoto, S., Noda, A., 1996: Interannual variability in the stratospheric- tropospheric circulation in a coupled ocean-atmosphere GCM., *Geophys. Res. Lett.* 23: 543-546.

Kodera, K., Chiba, M., Koide, H., Kitoh, A., Nikaidou, Y., 1996: Interannual variability of the winter stratosphere and troposphere in the Northern Hemisphere, *J. Meteorol. Soc. Jpn.* 74: 365-382.

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

Lau, N. C., Nath, M., 1996: The role of the atmospheric bridge in linking tropical Pacific ENSO events to extratropical SST anomalies, *J. Climate.* 9: 2036-2057.

Lau, N. C., Li, Y., 2011:Impact of ENSO on the atmospheric variability over the North Atlantic in late winter - Role of transient eddies, *J. Climate.* 25: 320-342.

Lorenz, E. N., 1956: *Empirical Orthogonal Functions and Statistical Weather Prediction*, Dep of Meteor, MIT, Cambridge, Massachusetts, 49.

Manzini, E., Giorgetta, M. A., Esch, M., Kornblueh, L., Roeckner, E., 2006: The influence of sea surface temperatures on the northern winter stratosphere: Ensemble simulations with the MAECHAM5 model, *J. Climate*. 19: 3863-3881.

Monahan, A. H., Fyfe, J. C., Ambaum, M. H., Stephenson, D. B., North, G. R., 2009: Empirical Orthogonal Functions: The Medium is the Message, *J. Climate.* 22(24): 6501-6514.

Neelin, J., Battisti, D., Hirst, A., Jin, F. F., Wakata, Y., Yamagata, T., Zebiak, S., 1998: ENSO theory, *J. Geophys. Res.* 103(C7): 14261-14290.

Newman, P. A., Nash, E. R., Rosenfield, J., 2001: What controls the temperature of the Arctic stratosphere during the spring?, *J. Geophys. Res.* 106: 19,999-20,010.

Ning, L., Bradley, R. S., 2015: NAO and PNA influences on winter temperature and precipitation over the eastern United States in CMIP5 GCM, *Clim. Dyn.* 46: 1257-1276.

Obukhov, A. M., 1947: Statistically homogeneous fields on a sphere, *Uspethi Mathematicheskikh Nauk* 2: 196-198.

Perlwitz, J., Graf, H. F., 1995: The statistical connection between tropospheric and stratospheric circulation of the Northern Hemisphere in winter, *J. Climate.* 8: 2281-2295.

Pozo-Vázquez, D., Esteban-Parra, M. J., Rodrigo, F. S., Castro-Diez, Y., 2001: The association between ENSO and winter atmospheric circulation and temperature in the North Atlantic region, *J. Climate*. 14: 3408-3420.

Rogers, J. C., 1984: The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere, *Mon. Weather Rev.* 112: 1999-2015.

Stephenson, D. B., Wanner, H., Brönnimann, S., Luterbacher, J., 2003: The History of Scientific Research on the North Atlantic Oscillation, In: Hurrell, J. W., Kushnir, Y., Visbeck, M., Ottersen, G. (Eds.), The North Atlantic Oscillation, climatic significance and enviromental impact., *AGU Geophysical Monograph* 134: 37-50.

Trenberth,K. E., Branstator,G. W., Karoly,D., Kumar,A., Lau, N. C., Ropelewski, C., 1998: Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures, *J. Geophys. Res.103:* 14291-14324.

van Loon, H., Labitzke. K., 1987: The Southern Oscillation part V. The anomalies in the lower stratosphere of the Northern Hemisphere in winter and a comparison with the Quasi-Biennial Oscillation, *Mon. Weather Rev.* 115: 357–369.

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

Walker, G. T., 1923: Correlation in seasonalvariation fo weather VII:A preliminary stusy of world weather, *Mem. Indian Meteorol. Dep*. 24: 75-131.