

Analiza toplinskih valova u Europi za simulacije modelom Speedy

Drmić, Zrinka

Master's thesis / Diplomski rad

2021

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

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:217:953338>

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

Download date / Datum preuzimanja: **2025-02-05**



Repository / Repozitorij:

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



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

Zrinka Drmić

ANALIZA TOPLINSKIH VALOVA U EUROPI
ZA SIMULACIJE MODELOM SPEEDY

Diplomski rad

Zagreb, 2021.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
PRIRODOSLOVNO-MATEMATIČKI FAKULTET
GEOFIZIČKI ODSJEK

DIPLOMSKI SVEUČILIŠNI STUDIJ FIZIKA-GEOFIZIKA

SMJER: METEOROLOGIJA I FIZIČKA OCEANOLOGRAFIJA

Zrinka Drmić

Diplomski rad

**Analiza toplinskih valova u Europi za
simulacije modelom Speedy**

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

Zagreb, 2021.

Ovaj je rad napravljen u sklopu projekta HRZZ UIP-2017-05-6396 „Klimatske promjene i varijabilnost u Hrvatskoj – globalnih utjecaja do lokalnih zelenih rješenja“ (CroClimGoGreen).

Sažetak

Toplinski valovi su razdoblja iznadprosječno vrućeg vremena na određenom području koja traju više uzastopnih dana. Učestalost i intenzitet toplinskih valova porasli su u posljednjih nekoliko desetljeća, a same pojave imaju veliki utjecaj na ljudsko zdravlje i gospodarstvo, osobito u urbanim područjima. Europu su pogodili osobito snažni toplinski valovi 2003. i 2010. godine. U dosadašnjim istraživanjima proučavani su uzroci i mehanizmi nastanka toplinskih valova, među kojima je i utjecaj anomalije površinske temperature mora.

U svrhu proučavanja utjecaja međugodišnje varijabilnosti površinske temperature Atlantskog oceana, korištena su dva ansambla simulacija modelom SPEEDY koji su dobiveni kao rezultat dvaju eksperimenata; CTRL, u kojem postoji međugodišnja varijabilnost površinske temperature mora (SST) te CLIM, gdje su za svaku godinu postavljene klimatološke vrijednosti SST-a. Signal koji se dobiva u slučaju eksperimenta CTRL je pretežito jači od signala eksperimenta CLIM. Analizirana je prostorna raspodjela i anomalija indeksa magnitude toplinskog vala (HWMId) te anomalije meteoroloških polja za proljetnu i ljetnu sezonu te su definirani indeksi na temelju anomalije SST-a koji su korelirani s ranije spomenutim veličinama. Dobiveni pozitivni koeficijenti korelacije na dijagramima raspršenja i na korelacijskim mapama za proljetno-ljetni i ljetno-ljetni slučaj upućuju na moguću vezu proljetnih anomalija SST-a u Atlantskom oceanu sa stvaranjem pogodnih uvjeta za pojavu, dužinu i jačinu ljetnih toplinskih valova u Europi te ukazuju na mogućnost primjene indeksa koji se temelji na anomalijama SST-a u sezonskoj prediktabilnosti toplinskih valova.

Ključne riječi: toplinski valovi, HWMId, međugodišnja varijabilnost, anomalija SST, sezonska prediktabilnost

European heat waves analysis based on Speedy model simulations

Abstract

Heatwaves are periods of unusual hot weather persisting for several consecutive days. Frequency and intensity of heatwaves increased in recent decades; these events have a great impact on public health and economy, especially in urban regions. Europe experienced exceptionally strong events in 2003 and 2010. Causes and mechanisms responsible for heatwaves were explored in previous studies, including impact of sea surface temperature anomaly (SSTA).

In attempt to investigate impact of interannual variability of sea surface temperature (SST) of the Atlantic ocean, two ensemble simulations by SPEEDY model were used. Ensembles were produced by two experiments; CTRL, where interannual variability of SST is included, and the other, CLIM, with climatological values of SST in every year. The signal observed in CTRL experiment are mainly stronger than those in CLIM experiment. Heatwave Magnitude Index (HWMId) spacial distribution as well as the anomalies of other meteorological variables for spring and summer season were analysed. Indices based on SSTA were defined and correlated with anomalies of variables mentioned above. Statistically significant, positive correlation coefficients were found both, in scatter diagrams and correlation maps (spring-summer and spring-spring cases). This result refers to possible relationship between spring North Atlantic SSTAs and formation of favourable conditions for European heatwave occurrence. There is a possible application of SSTA based indices in seasonal forecasting of heatwaves.

Keywords: heatwave, HWMId, interannual variability, SST anomaly, seasonal predictability

Popis kratica

ABL – atmosferski granični sloj (eng. *atmospheric boundary layer*)

CLIM – eksperiment s klimatološkim vrijednostima SST

CTRL – eksperiment sa izmjerenim vrijednostima SST

DHMZ – Državni hidrometeorološki zavod

ECMWF – Europski centar za srednjeročnu vremensku prognozu (eng. *European Centre for Medium-Range Weather Forecast*)

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

ERA15 – ECMWF-ova reanaliza 15-godišnjeg razdoblja

gh500 – geopotencijalna visina na 500 hPa plohi

HWMId – indeks magnitude toplinskog vala (eng. *Heatwave Magnitude Index daily*)

JJA – lipanj, srpanj, kolovoz (eng. *June, July, August*)

MAM – ožujak, travanj, svibanj (eng. *March, April, May*)

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

SOI – indeks južne oscilacije (eng. *Southern Oscillation Index*)

SPEEDY – eng. *Simplified Parametrizations, primitivE-Equation Dynamics*

SST – površinska temperatura mora

SSTA – anomalija površinske temperature mora

Temp0 – srednja dnevna prizemna temperatura zraka

Tmax – maksimalna dnevna prizemna temperatura zraka

Tmin – minimalna dnevna prizemna temperatura zraka

u850 – zonalna komponenta vjetrova na 850 hPa plohi

u200 – zonalna komponenta vjetrova na 200 hPa plohi

WMO – Svjetska meteorološka organizacija (eng. *World Meteorological Organization*)

Sadržaj

1. Uvod.....	1
1.1. Općenito o toplinskim valovima.....	1
1.2. Definicija toplinskog vala i sustav upozoravanja na opasnost od vrućine.....	2
1.3. Mehanizmi nastanka toplinskih valova.....	3
1.4. Međudjelovanje oceana i atmosfere.....	4
1.5. Motivacija i cilj istraživanja.....	5
2. Podaci i metode.....	6
2.1. Model SPEEDY.....	6
2.2. Metode.....	8
3. Rezultati i rasprava.....	10
3.1. Detekcija toplinskih valova i indeks HWMId.....	10
3.2. Srednja, maksimalna i minimalna mjesečna prizemna temperatura.....	15
3.3. Zonalna komponenta vjetra u850 i u200 te gh500.....	21
3.4. Anomalija srednje mjesečne površinske temperature mora.....	31
3.5. Korelacija indeksa SSTA i indeksa anomalija srednjih mjesečnih prizemnih temperatura za Europu.....	36
3.6. Korelacijske mape indeksa SSTA sa anomalijama Temp0, u200, gh500 i indeksa HWMId.....	37
4. Zaključak.....	40
Literatura.....	42
Dodaci.....	44

1. Uvod

1.1. Općenito o toplinskim valovima

Posljednjih desetljeća primijećena je pojava duljih razdoblja iznimne topline u ljetnoj sezoni koja se u pojedinim slučajevima nazivaju toplinskim valovima (eng. *heatwave*). To mogu biti razdoblja vrućeg i suhog ili pak vrućeg i vlažnog vremena, a mogu imati suptilan početak i završetak. Iz perspektive fizičke meteorologije, toplinski valovi mogu se svrstati u dvije skupine. Prva skupina su suhi toplinski valovi koji su često obilježeni razdobljem stabilnog vremena bez naoblake i velikom količinom dozračene energije Sunca te mogu biti praćena vjetrom. Suhi toplinski valovi obično se pojavljuju u područjima s kontinentalnom ili sredozemnom klimom, ili na mjestima gdje se zrak adijabatički zagrijava. Upravo su suhi toplinski valovi karakteristični za Europu. Druga skupina su vlažni toplinski valovi koje obilježavaju vrlo topli, vlažni vremenski uvjeti tijekom dana i noći, često sa slojem noćnih oblaka što onemogućava gubitak danju akumulirane topline s površine. Ova skupina toplinskih valova javlja se u umjerenim klimama srednjih geografskih širina i maritimnim klimama. Klimatski razredi u Europi i Sjevernoj Africi koji se povezuju s pojavama iznimno visokih temperatura su Csa(sredozemna klima s vrućim ljetom), Csb(sredozemna klima s toplim ljetom), Cfa(umjereno topla vlažna klima s vrućim ljetom), Cfb(umjereno topla vlažna klima s toplim ljetom), Dfa(snježno-šumska klima s vrućim ljetom) i Dfb(snježno-šumska klima s toplim ljetom) [1] .

Toplinski valovi znatno utječu na zdravlje građana, osobito osjetljivijih skupina, ali i na poljoprivredu, prometnu i energetska infrastrukturu, telekomunikacije te ostale privredne grane. Posebno su osjetljiva gradska područja gdje zbog učinka urbanog toplinskog otoka dolazi do znatno jačeg zagrijavanja i povećanja temperature u odnosu na izvangradska područja. Europa je od početka 21. stoljeća iskusila nekoliko vrlo intenzivnih toplinskih valova. Primjerice, procjenjuje se da tijekom toplinskog vala 2003. u Zapadnoj Europi preminulo između 25 i 70 tisuća ljudi, s time da je pogođenije bilo sredozemno područje od kontinentalnog. Najpogođenije su bile osobe starije životne dobi i osobe s respiratornim tegobama. [2] Od posljedica toplinskog vala 2010. u Istočnoj Europi preminulo je više desetaka tisuća ljudi, od čega oko 11 tisuća u Moskvi. Tamo je glavni toplinski val trajao 44 dana sa dnevnim hodom prizemnih temperatura između 24° C i 31° C (prosječni srpanjski dnevni raspon temperature zraka u Moskvi je 13.5-23.1°C), a dodatni utjecaj na smrtnost imali su šumski požari u okolnim područjima zbog kojih su

dnevne razine lebdećih čestica PM10 (čestice promjera manjeg od 10 μm nastale kao produkt izgaranja te imaju utjecaj na dišni sustav) i ozona bile iznimno više od uobičajenih. [3] Tijekom spomenutih toplinskih valova 2003. i 2010., koji se karakteriziraju kao vrlo jaki, u polovici Europe zabilježene su najviše temperature zraka u posljednjih 500 godina [4].

1.2. Definicija toplinskog vala i sustav upozoravanja na opasnost od vrućine

Svjetska meteorološka organizacija (WMO) označava toplinski val kao razdoblje u kojem je osmotreno neuobičajeno vruće vrijeme u regiji koje traje barem 3 dana tijekom toplog dijela godine, a tijekom kojega su zabilježeni termalni uvjeti iznad određenog praga koji se temelji na lokalnim klimatološkim obilježjima [5]. Toplinski valovi mogu se okarakterizirati pomoću sljedećih značajki: magnituda (veličina koja opisuje koliko je događaj klimatološki ekstreman), trajanje, geografski opseg te ozbiljnost (ukazuje na moguće štetne i druge utjecaje događaja). Iako ne postoji jedinstvena definicija toplinskog vala, u znanstvenoj literaturi koriste se različite inačice gornje definicije, ovisno o specifičnom cilju istraživanja. Neki od primjera definicija navedeni su niže:

1. Toplinski val je razdoblje od minimalno 3 uzastopna dana s maksimalnim dnevnim temperaturama zraka iznad dnevnog praga za referentno razdoblje 1980.-2010. Prag je definiran kao 90. percentil maksimalne dnevne temperature centriran u 30-dnevnom prozoru. [6]
2. Toplinski val definira se kada je maksimalna dnevna temperatura zraka veća od 90. percentila za referentno razdoblje 1980.-2015., centriranog u 15-dnevnom prozoru, te traje više od 3 uzastopna dana [7].
3. Toplinski val se javlja ako je anomalija kompozita srednje dnevne temperature jednaka ili veća $+3^{\circ}\text{C}$ barem 5 uzastopnih dana na području od interesa [8].
4. Toplinski val je razdoblje od minimalno 3 uzastopna dana za vrijeme kojih maksimalna dnevna temperatura prelazi prag toplinskog vala definiranog za pojedini okrug Ujedinjenog kraljevstva; prag je vrijednost u rasponu od 25°C do 28°C [9].

Toplinski stres je posljedica metaboličkih čimbenika i čimbenika okoline koji uzrokuju toplinsko opterećenje organizma. Razina toplinskog stresa može se procijeniti rasponom biometeoroloških indeksa koji se temelje na jednoj ili više mjerenih veličina, npr. temperatura, vlažnost zraka, brzina vjetra ili se procjena može temeljiti na izlazima

numeričkih modela. Ova procjena u kombinaciji sa zdravstvenim podacima može se koristiti za određivanje iznosa temperaturnog praga za koji se izdaje javno upozorenje na pojavu po zdravlje opasnih toplinskih valova. Ako nema zdravstvenih podataka, kao vrijednost praga uzimaju se biometeorološki indeksi ili izlazi modela vezani za klimatološki 95. ili 99. percentil temperature za lokaciju [1].

S obzirom na to da trenutno ne postoji jedinstvena definicija toplinskog vala, već su pojedine države usvojile vlastite kriterije za izdavanje upozorenja. U Republici Hrvatskoj uveden je sustav upozoravanja na opasnost od vrućine, a upozoravanje se provodi u razdoblju od 1. svibnja do 15. rujna. Sustav je razvijen u suradnji Državnog hidrometeorološkog zavoda (DHMZ) i javnozdravstvenih institucija i organizacija u sklopu Protokola o postupanju i preporukama za zaštitu od vrućina. Razina opasnosti procjenjuje se na temelju prognoze minimalne i maksimalne temperature zraka za današnji i četiri naredna dana te se iskazuje opisno (nema opasnosti, umjerena opasnost, velika opasnost i vrlo velika opasnost) i grafički (zelena, žuta, narančasta i crvena boja). [15]

1.3. Mehanizmi nastanka toplinskih valova

U istraživanjima se spominje veći broj mogućih uzroka i mehanizama nastanka toplinskih valova. Zhang i sur. u [7] navode kao moguće utjecaje na nastanak toplinskih valova atmosfersku cirkulaciju na velikoj skali (npr. Sjevernoatlantska oscilacija i planetarni valovi srednjih geografskih širina) i termalne uvjete oceana i kopna (El Nino-južna oscilacija, zatopljenje Sjevernog Atlantika [17], varijacije u vlažnosti euroazijskog tla). Spominju se i istraživanja koja povezuju antropogeno globalno zagrijavanje sa rastućim brojem toplinskih valova u Europi, s naglaskom na Arktičkoj amplifikaciji. Nadalje, toplinski valovi često su povezani s anomalnim cirkulacijskim uzorcima koji su karakterizirani slabljenjem zonalnih mlaznih struja, kvazirezonantnom amplifikacijom planetarnih valova te dugotrajnim *blocking* situacijama iznad euroazijskog područja srednjih geografskih širina što rezultira produženim razdobljima vrućeg vremena. Također, učestali toplinski valovi u Europi koincidiraju sa smanjenjem količine arktičkog leda i euroazijskog snježnog pokrova, osobito u proljeće i ljeto. Autori u ovom istraživanju ispituju vezu između smanjivanja arktičkog leda i euroazijskog snježnog pokrova sa učestalim toplinskim valovima u Europi preko modulacije *blocking* situacija nad Europom.

Hafez i sur. u svojem istraživanju [8] proučavaju vezu između toplinskih valova u Zapadnoj i Sjevernoj Europi i klimatskih indeksa NAO, SOI i El Nino 3.4 u ljeto 2015.

Pokazano je da su navedena područja tada bila pod utjecajem različitih povezanih atmosferskih procesa te da je kombinacija pozitivne faze ENSO-a i negativne faze NAO-a dovela do razvoja vrlo stabilnog vremena i nagomilavanja topline nad Europom.

McCarthy i sur. [10] ispituju mogući doprinos tripolnog uzorka anomalije površinske temperature mora sjevernog Atlantika u kasno proljeće dugoročnoj prediktabilnosti signala za prevladavajući visoki tlak i smanjenu količinu oborine nad Sjevernom Europom. García-Herrera i sur. [11] u pregledu snažnog toplinskog vala u Europi 2003. dokazuju doprinos anomalija površinske temperature Sredozemnog mora na nastanak tog događaja. Krüger i sur. [12] dokazuju važnost negativnih anomalija površinske temperature Sjevernog Atlantika u proljeće za pojavu visokih temperatura zraka u Europi ljeti, preko utjecaja na valovitost mlazne struje koja formira perzistentni greben nad Europom čija je posljedica dugotrajna prizemna toplina.

Russo i sur. [6] ukazuju na povećanu vjerojatnost ekstremnih toplinskih valova u Europi u iduća dva desetljeća, što je moguća posljedica porasta koncentracije stakleničkih plinova uzrokovanog antropogenim utjecajem. Dodatno, s porastom srednje globalne temperature, toplinski valovi postat će mnogo uobičajeniji događaji te će se moći pojaviti u bilo kojem dijelu Europe.

1.4. Međudjelovanje oceana i atmosfere

Ocean ima znatno veći toplinski kapacitet od atmosfere, stoga je vrijeme uspostave toplinske ravnoteže za ocean mnogo dulje nego za atmosferu što ga čini tromijom komponentom klimatskog sustava. Također, ocean može upiti i uskladištiti mnogo više energije od kopna, koje se brzo zagrijava i brzo hladi. Količina topline koju ocean razmjeni sa atmosferom tijekom jednog sezonskog ciklusa je veća i do 100 puta od količine topline razmjenjene između kopna i atmosfere. Posljedično su temperaturne amplitude u blizini mora relativno malene u odnosu na temperaturne amplitude na kopnu, osobito u unutrašnjosti kontinenta te se može reći da ocean djeluje kao *ublaživač*. Izravno prinudno djelovanje na ocean u srednjim i visokim geografskim širinama preko ciklona i anticiklona pobuđuje promjenu SST-a modulacijom prizemnog vjetera, temperature i vlažnosti zraka te tokova topline između mora i zraka. Ciklone i anticiklone, unatoč tome što su kratkoperiodični atmosferski sustavi, mogu prouzrokovati dugotrajne anomalije SST-a zbog velikog toplinskog kapaciteta oceana (tzv. *pamćenje* oceana); takve anomalije SST-a nemaju pravilan sezonski ciklus. Iz teorijskih modela moguće je zaključiti da atmosferske promjene imaju tendenciju prethoditi oceanskim promjenama, što ide u prilog

pretpostavki da međugodišnja i međudekadska varijabilnost u srednjim umjerenim širinama prvenstveno reflektira spori odziv oceana na prinudno djelovanje atmosferskih sustava koje se događa na mnogo kraćim vremenskim skalama. [16]

1.5. Motivacija i cilj istraživanja

Dosadašnjim istraživanjima uočena je povećana učestalost pojave toplinskih valova u zadnjih nekoliko desetljeća, što se dovodi u vezu s klimatskim promjenama. Toplinski valovi su meteorološki fenomeni koji u značajnoj mjeri utječu na ljudsko zdravlje, gospodarstvo i infrastrukturu, osobito u urbanim sredinama. Proučavani su mogući uzroci i mehanizmi nastanka toplinskih valova te je, između ostalog, zabilježena veza anomalija površinske temperature mora i pojave toplinskih valova u pojedinim godinama.

Cilj ovog istraživanja bio je utvrditi utječe li međugodišnja varijabilnost proljetnog i ljetnog SST-a Atlantskog oceana na pojavu i intenzitet toplinskih valova u Europi, stoga je istraživanje provedeno pomoću dva eksperimenta, jednog u kojemu postoji međugodišnja varijabilnost SST-a i drugog u kojem ta varijabilnost izostaje. Pronalaskom dovoljno značajne korelacije između anomalije SST-a i meteoroloških polja svojstvima karakterističnih za toplinske valove, javlja se mogućnost sezonske prediktabilnosti toplinskih valova.

2. Podaci i metode

2.1. Model SPEEDY

U ovom radu korištena su meteorološka polja dobivena simulacijama modelom SPEEDY. Model SPEEDY (eng. Simplified Parametrizations, primitivE-Equation Dynamics) je pojednostavljeni model opće cirkulacije atmosfere razvijen u Međunarodnom centru za teorijsku fiziku Abdus Salam (ICTP) u Trstu. Model je srednje razine složenosti, bazira se na spektralnoj dinamičkoj jezgri i setu pojednostavljenih fizičkih parametrizacijskih shema te je hidrostatički i upotrebljava sigma koordinatu. Osnovne prognostičke varijable su vrtložnost, divergencija, apsolutna temperatura i logaritam prizemnog tlaka, a model računa i razvoj dodatnih varijabli. U modelu se koristi preskočna vremenska shema s vremenskih filterom. Razlučivost modela odgovara trokutastom spektralnom odsijecanju kod valnog broja 30 (T30), sa standardnom gausijanskom mrežom od 96 puta 48 točaka, odnosno 3.75° geografske širine puta 3.75° geografske dužine. Model koristi 8 vertikalnih slojeva sa granicama na sigma vrijednostima od 0, 0.05, 0.14, 0.26, 0.42, 0.60, 0.77, 0.90 i 1 (polurazine, eng. *half-levels*). Prognostičke varijable, izuzev logaritma prizemnog tlaka, specificirane su na sigma razinama između graničnih razina na sigma vrijednostima 0.025, 0.095, 0.20, 0.34, 0.51, 0.685, 0.835 i 0.95 (pune razine, eng. *full levels*). U praksi, dva najviša sloja predstavljaju stratosferu, a najniži sloj predstavlja atmosferski granični sloj. Izlazni podaci naknadno su obrađeni na razinama tlaka od 30, 100, 200, 300, 500, 700, 850 i 925 hPa.

Skup shema za fizičku parametrizaciju razvijen je prema osnovnim načelima korištenim u složenijim općim cirkulacijskim modelima, uz primjenu određenog broja pojednostavljujućih pretpostavki prigodnih za model sa grubom vertikalnom rezolucijom. Procesi predstavljeni shemama su:

Za konvekciju se koristi pojednostavljena shema za tok mase kada je prisutna uvjetna nestabilnost i kada vlažnost u atmosferskom graničnom sloju prelazi dani prag. Tok mase kroz podnicu oblaka (na vrhu ABL-a) obilježen je relaksiranjem vlažnosti ABL-a prema vrijednosti praga na vremenskoj skali od šest sati. Izvlačenje zraka događa se jedino na najvišoj razini, koja se određuje preko kriterija uvjetne nestabilnosti, dok se uvlačenje zraka događa u donjoj polovici troposfere; zrak u uzlaznoj struji je zasićen.

Kondenzacija je parametrizirana na velikoj skali, ondje se specifična vlažnost relaksira prema odgovarajućoj vrijednosti kada relativna vlažnost prijeđe prag u ovisnosti o

sigma koordinati; tada se sadržaj latentne energije uklonjene iz atmosfere pridodaje statičkoj energiji suhog zraka.

Oblaci su parametrizirani na način da se naoblaka i debljina oblaka definiraju dijagnostički preko vrijednosti relativne vlažnosti stupca zraka, uključujući sve troposferske slojeve osim ABL-a, i količine oborine.

Schema za kratkovalno zračenje koristi dvije spektralne skupine, od kojih jedna predstavlja blisko infracrveno područje spektra. Zračenje se reflektira na vrhu oblaka i na površini, a albedo oblaka proporcionalan je ukupnoj naoblaci. Kratkovalna propusnost slojeva modela je funkcija mase sloja, specifične vlažnosti i naoblake.

Schema za dugovalno zračenje koristi četiri spektralne skupine od kojih je jedna skupina *atmosferski prozor*, a ostale skupine predstavljaju spektralna područja apsorpcije vodenom parom i ugljičnim dioksidom. Propusnost za svaki sloj definirana je kao funkcija mase i vlažnosti sloja. Utjecaj oblaka opisan je kao pad u propusnosti spektralnog područja za *atmosferski prozor*, u ovisnosti o naoblaci. Silazna emisija sa svakog sloja računa se kao otežana funkcija temperature na punoj razini i interpolirane temperature na polurazini ispod. Kod uzlazne emisije koriste se temperatura na punoj razini i polurazini ispod.

Površinski tokovi količine gibanja i energije definirani su preko aerodinamičkih formula s različitim koeficijentima razmjene između tla i mora. Koeficijenti za tokove senzibilne i latentne topline ovise o jednostavnom indeksu stabilnosti, dok je koeficijent za tok količine gibanja iznad površine tla funkcija topografske visine. Površinska temperatura definira se iz površinske ravnoteže energije.

Vertikalnu difuziju čine tri doprinosa; prvi je preraspodjela statičke energije suhog zraka i vlage između dva najniža sloja te taj član simulira plitku konvekciju u područjima uvjetne nestabilnosti. Drugi član predstavlja difuziju vodene pare u stabilnim uvjetima koja se događa u nižoj troposferi. Treći član opisuje difuziju statičke energije suhog zraka u slučaju kada stopa ohlađivanja dostigne ili prijeđe suhoadijabatiču granicu.

Tendencije fizikalnih parametrizacija u vremenskom koraku t izračunavaju se iz varijabli u koraku $t-1$ i integriraju do koraka $t+1$. Kod parametrizacije prvo se računaju vrijednosti u točkama za primarne varijable (u i v komponente vektora vjetra, temperatura, specifična vlažnost, geopotencijal i površinski tlak) iz njihovih spektralnih prikaza, a zatim se definiraju dodatne dijagnostičke varijable (specifična vlažnost zasićenog zraka, relativna vlažnost, statička energija suhog zraka i statička energija vlažnog zraka). Sve varijable definirane su na punim razinama, a dodatno, neke varijable je potrebno definirati na polurazinama zbog definiranja tokova.

Kako bi mogao odrediti tokove količine gibanja, topline i vlage na površini te tok dolaznog Sunčevog zračenja na vrhu atmosfere, model zahtjeva poznavanje određenih rubnih uvjeta. Na površini, uz topografsku visinu i *land-sea mask* (polje koje sadrži informaciju o udjelu kopna u svakoj točki mreže), tražena su klimatološka polja sljedećih varijabli: temperatura površine mora, udio morskog leda, temperatura dubokog sloja tla (oko 1 m dubine), vlažnost u plitkom sloju tla i sloju korijenja, visina snježnog pokriva, albedo površine tla bez vegetacije te udio površine tla prekrivenog vegetacijom. Za posljednja dva polja koriste se godišnje srednje vrijednosti, dok se za sve ostale koriste mjesečne srednje vrijednosti. Sve klimatološke vrijednosti dobivene su usrednjavanjem odgovarajućih podataka iz reanalize (ERA15) za razdoblje 1981.-1990. Europskog centra za srednjeročnu vremensku prognozu (ECMWF). Navedeno razdoblje, umjesto cijelog razdoblja (1979.-1993.) koje pokriva ERA15, odabrano je radi bolje ravnoteže između toplih i hladnih ENSO događaja u poljima SST-a. Model omogućava superpoziciju vremenski varirajuće anomalije SST-a i klimatološkog SST-a, anomalija se može uzeti iz ulazne datoteke ili izračunati spregnutim oceanskim modelom. [13], [14]

2.2. Metode

U izradi rada korištena su dva eksperimenta, prvi je eksperiment CTRL koji je karakteriziran promjenjivim međugodišnjim (izmjerenim) SST-om, dok drugi eksperiment CLIM sadržava nepromjenjiva (klimatološka) polja SST-a te ondje izostaje učinak prinudnog djelovanja oceana. Takvim izborom eksperimenata nastojalo se provjeriti utjecaj međugodišnje varijabilnosti SST-a na pojavu toplinskih valova u Europi. Napravljen je ansambl srednjak simulacija modelom SPEEDY za dnevne vrijednosti meteoroloških polja u razdoblju 1978.-2016. Za SST su korištene mjesečne vrijednosti iz razdoblja 1855.-2010.

Detektirani su toplinski valovi u ljetnoj sezoni (JJA) u razdoblju 1978.-2015. na širem području Europe (27°W-50°E, 30°N-75°N). Toplinski val je detektiran kada dnevne maksimalne prizemne temperature prelaze 90. percentil klimatološke vrijednosti za razdoblje 1978.-2015. dulje od tri uzastopna dana. Određeno je trajanje i područje te je izračunat indeks magnitude toplinskog vala (indeks HWMId) za pojedine događaje u eksperimentima CTRL i CLIM. Indeks HWMId je zbroj dnevnih magnituda, $M_d(T_d)$, uzastopnih dana tijekom toplinskog vala. Korišten je izraz za HWMId (eng. *Heatwave*

Magnitude Index daily) iz istraživanja Zhang i sur. [7], pri čemu je dnevna magnituda definirana kao:

$$M_d(T_d) = \begin{cases} \frac{T_d - T_{25p}}{T_{75p} - T_{25p}} & \text{za } T_d > T_{25p} \\ 0 & \text{za } T_d \leq T_{25p} \end{cases} \quad (1)$$

gdje je T_d maksimalna dnevna temperatura na d -ti dan toplinskog vala, T_{25p} i T_{75p} su 25. i 75. percentil vremenskog niza sastavljenog od maksimalnih temperatura iz referentnog razdoblja 1978.-2015. HWMId je na isti način definiran i za minimalnu dnevnu temperaturu [6] tijekom toplinskog vala, s tim da se umjesto maksimalne dnevne temperature u relaciji (1) koristi minimalna dnevna temperatura.

Događaji su poredani po veličini HWMId te su odabrano 10 najjačih događaja (u godinama 1978., 1981., 1983., 2003., 2006., 2008., 2009., 2010., 2011. i 2015.). Izračunan je vremenski niz anomalija usrednjenog HWMId za područje Europe u razdoblju 1978.-2015., anomalije je određena prema referentnom razdoblju 1981.-2010. Nadalje, na temelju grafičkih prikaza raspodjele HWMId u Europi, odabrani su događaji kod kojih su primijećene sličnosti u obliku polja HWMId (1978. i 1981.; 2003., 2006. i 2008.; 2009. i 2010.) te su analizirana pojedina meteorološka polja nad Europom u tim godinama. Analiza je provedena za ljetne mjesece (lipanj, srpanj i kolovoz; JJA) te, dodatno, za proljetne mjesece u nekim slučajevima (ožujak, travanj, svibanj; MAM). Korištene su srednje mjesečne vrijednosti meteoroloških polja (srednja, maksimalna i minimalna dnevna temperatura zraka, u komponenta brzine vjetra na 200 i 850 hPa te geopotencijalna visina na 500 hPa) te njihove anomalije, u odnosu na referentno razdoblje 1981.-2010. Analizirane su anomalije SST za proljetnu i ljetnu sezonu u sjevernom dijelu Atlantskog oceana te su određivani indeksi mjesečnih anomalija SST-a usrednjenih na odabranom području. Indeksi mjesečnih anomalija za proljetnu i ljetnu sezonu su korelirani sa srednjom temperaturom nad Europom i prikazani dijagramom raspršenja i određen je koeficijent korelacije. Također, proljetni i ljetni indeksi su korelirani sa srednjom dnevnom temperaturom ($temp0$), geopotencijalnom visinom ($gh500$), brzinom vjetra ($u200$) i HWMId nad Europom te je rezultat prikazan korelacijskim mapama.

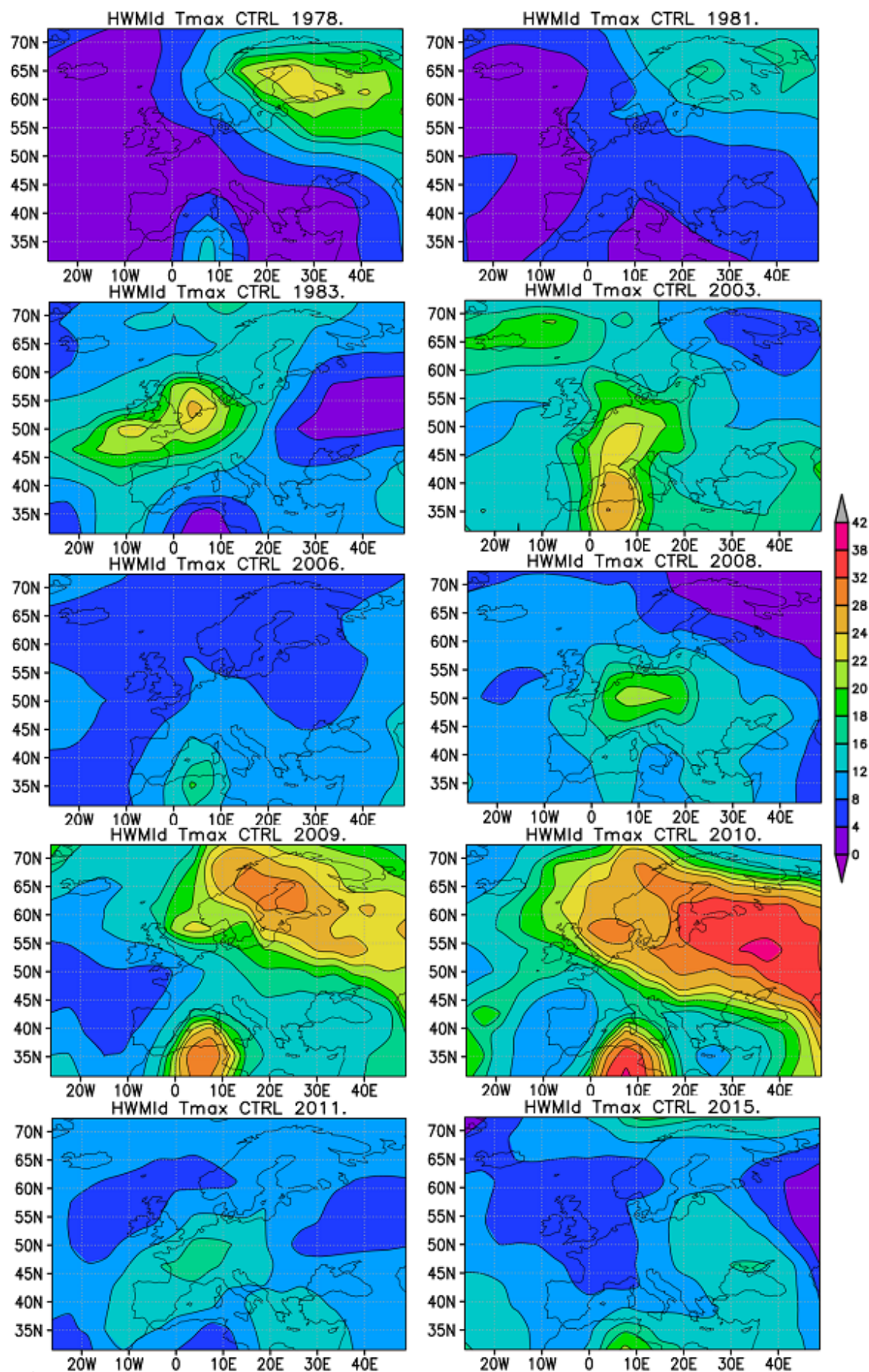
Za obradu podataka korišteni su programski paketi CDO (*Climate Data Operators*), GNU Octave te LibreOffice Calc.

3. Rezultati i rasprava

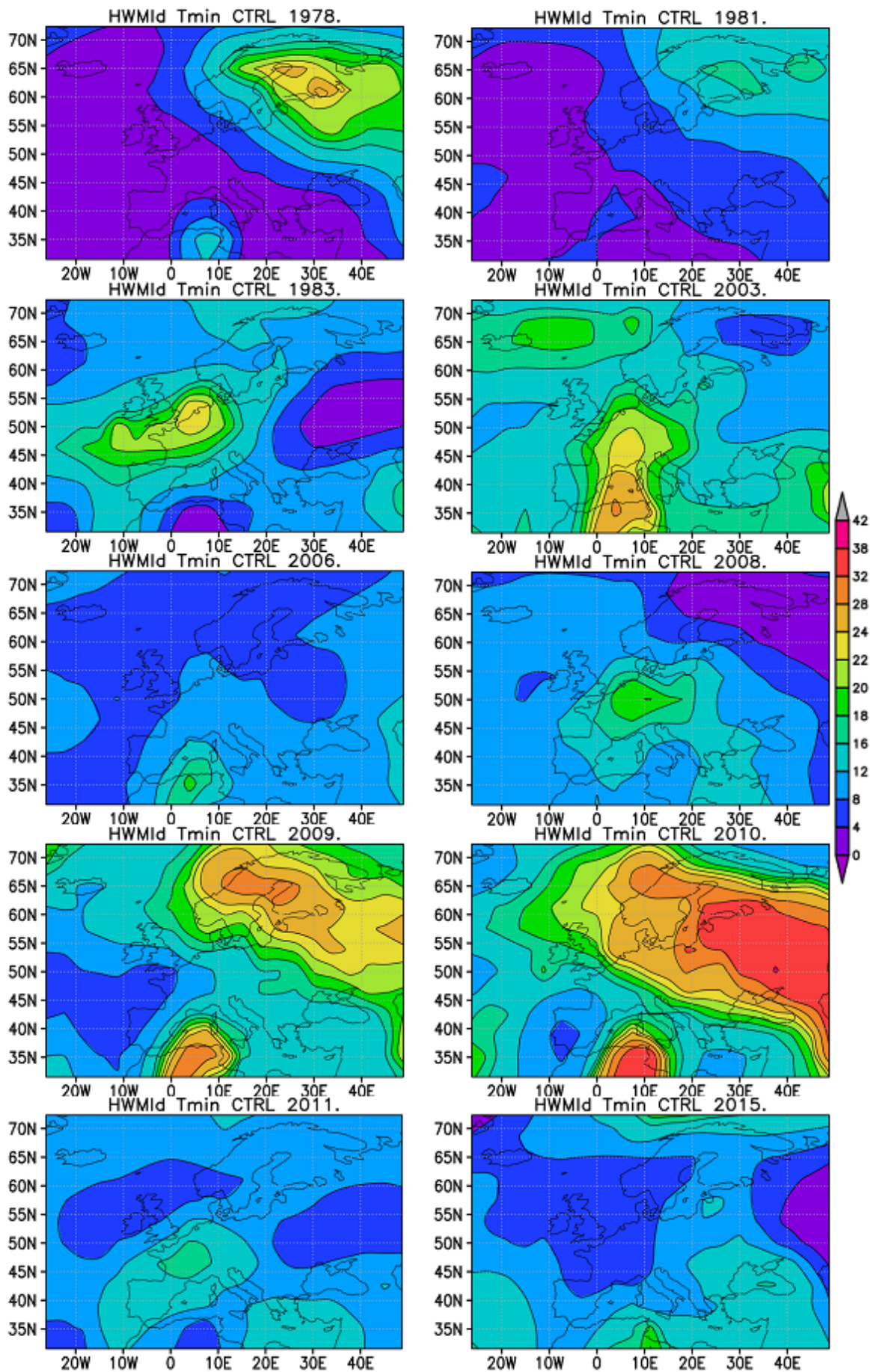
3.1. Detekcija toplinskih valova i indeks HWMI_d

Detektirano je više desetaka toplinskih valova, na temelju kriterija spomenutog u metodama, u razdoblju 1978.-2015. te je odabrano 10 najizraženijih toplinskih valova prema kriteriju najvećeg indeksa HWMI_d (1978., 1981., 1983., 2003., 2006., 2008., 2009., 2010., 2011. i 2015.), za maksimalnu i minimalnu dnevnu temperaturu. Prema obliku polja i magnitudi, grafički prikazi za minimalnu i maksimalnu temperaturu za isti događaj su vrlo slični, HWMI_d za minimalne dnevne temperature je malo manji po iznosu u odnosu na HWMI_d za maksimalne dnevne temperature. Uspoređujući iznose indeksa HWMI_d za eksperimente CTRL (Slika 1. i 2.) i CLIM (slika 3. i 4.), indeksi za eksperiment CTRL su veći od iznosa za eksperiment CLIM za iste godine, osim za događaj iz 1978. godine. S obzirom na to da je eksperiment CTRL postavljen tako da preko varijabilne anomalije SST-a ocean prinudno djeluje na atmosferu, može se zaključiti da temperatura mora utječe na magnitudu toplinskog vala, izuzev u slučaju događaja iz 1978., gdje je moguće prevladao neki drugi utjecaj. Prema obliku polja, događaji iz 1978., 1981., 2009. i 2010. u eksperimentu CTRL su slični, maksimum polja je lociran na sjeveroistoku Europe, s još jednim maksimumom na jugu Europe i sjeveru Afrike, osim u slučaju 1981. kada južni maksimum izostaje, no u tom događaju je i HWMI_d znatno manji nego u ostale 3 godine. Nadalje, događaji iz 2003. i 2008. su slični po obliku polja, gdje su maksimumi polja protežu Srednjom i dijelom Južne Europe. U ostalim godinama, maksimumi polja se nalaze na sjeveru Europe, u Francuskoj i u Istočnoj Europe, ti su događaji nešto manje magnitude od ranije spomenutih, osim u slučaju jačeg toplinskog vala iz 1983. sa maksimumom iznad Sjevernog mora. U eksperimentu CLIM sličnosti u oblicima polja su manje izražene, primjerice, sličnosti između polja 1978. i 1981. te 2009. i 2010., koje su dobro vidljive u eksperimentu CTRL, u eksperimentu CLIM izostaju. Iako je magnituda indeksa HWMI_d u eksperimentu CLIM u pravilu manja nego u eksperimentu CTRL, maksimumi polja u istim godinama u oba eksperimenta zadržavaju približno istu lokaciju.

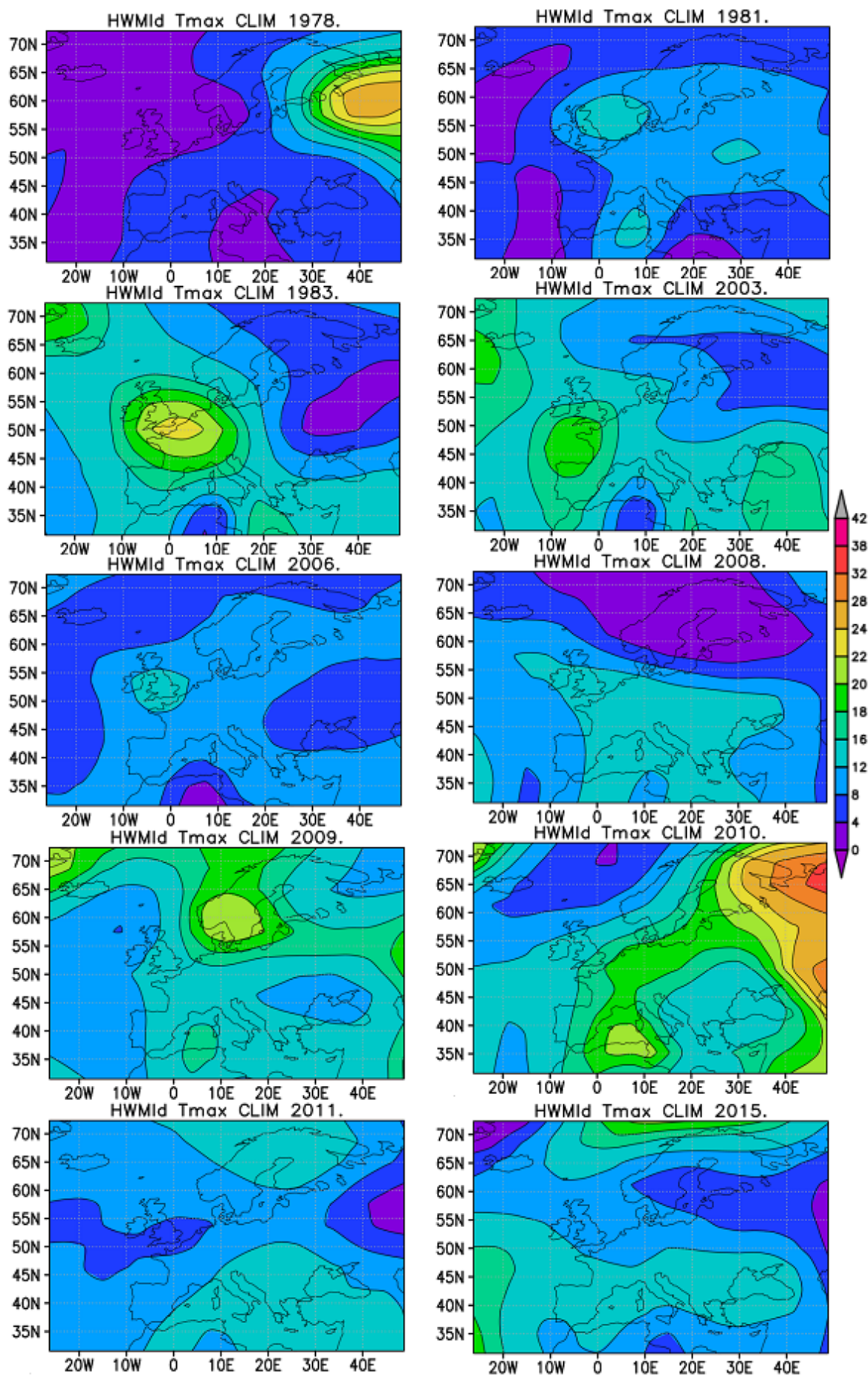
Kako bi se proučio trend pojave i magnitude toplinskih valova u Europi, izračunan je vremenski niz anomalija prostorno usrednjenog (30°-65°N, 0°-40°E) indeksa HWMI_d u razdoblju 1978.-2015., a referentno razdoblje za računanje anomalije je 1981.-2010. Vremenski niz za oba eksperimenta temeljen na maksimalnoj i minimalnoj dnevnoj temperaturi prikazan je na slici 5. Krivulje za oba eksperimenta imaju sličan oblik, do 1983. CLIM krivulja poprima nešto veće iznose,



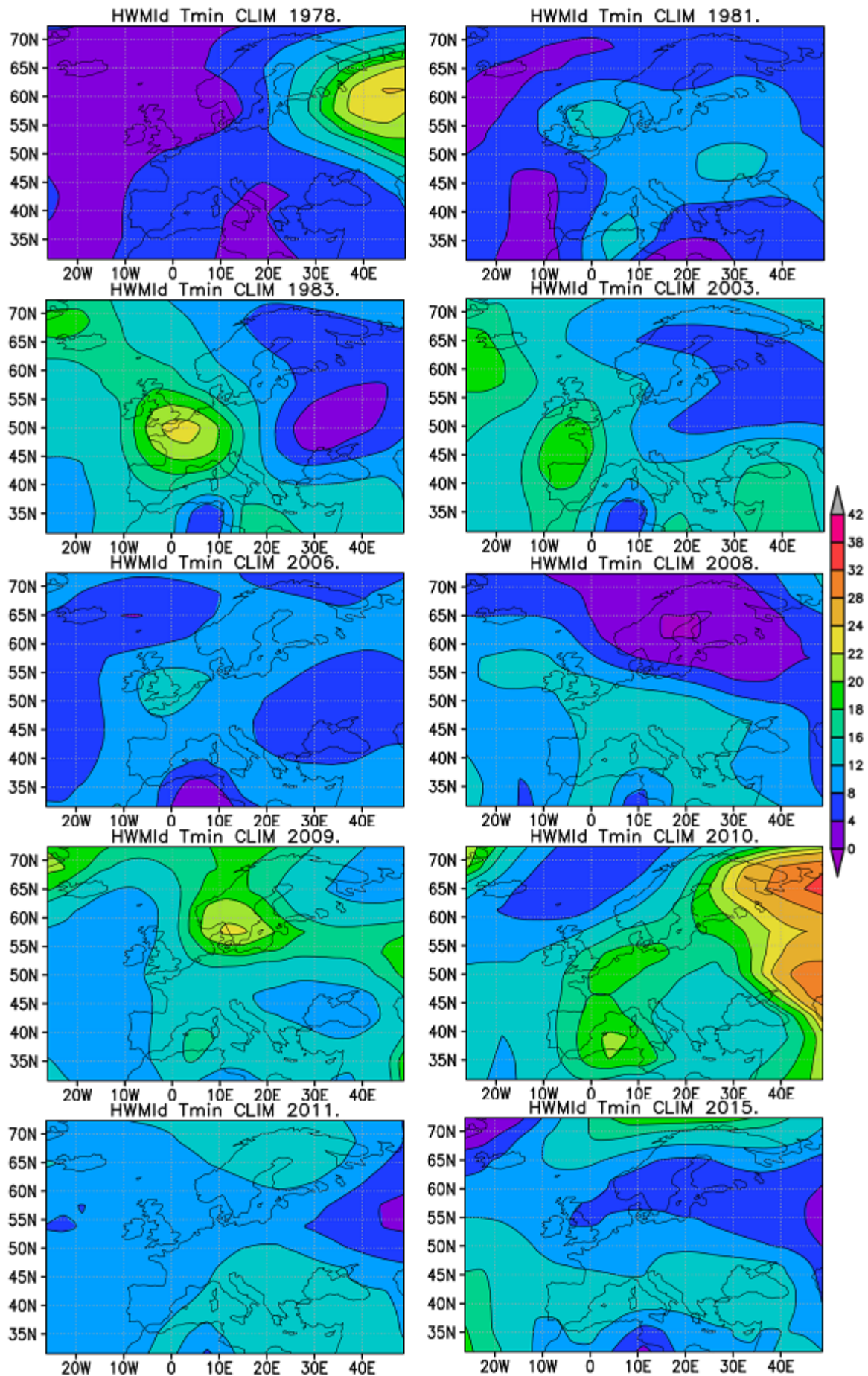
Slika 1. Prostorna raspodjela indeksa HWMId za Tmax u eksperimentu CTRL.



Slika 2. Prostorna raspodjela indeksa HWMid za Tmin u eksperimentu CTRL.

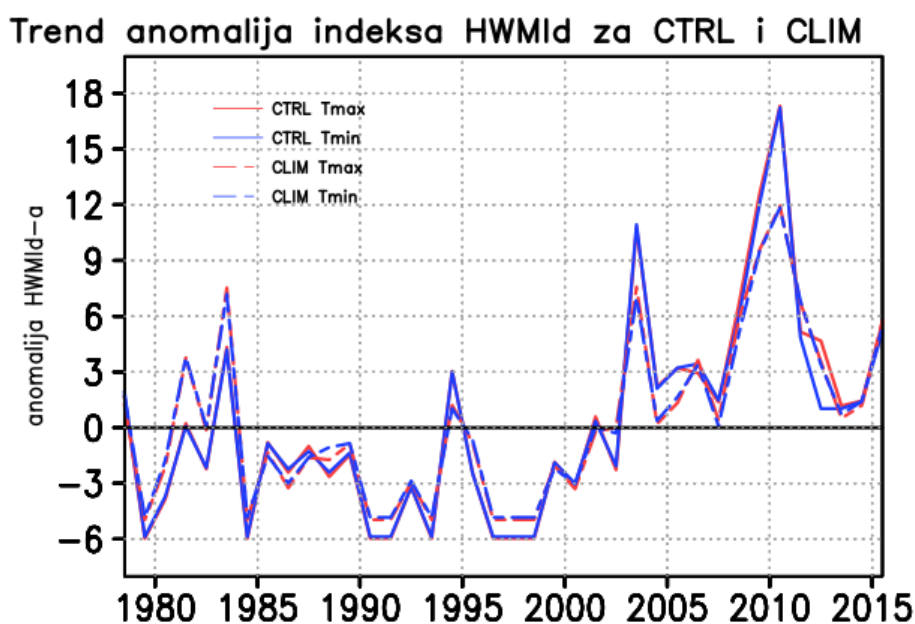


Slika 3. Prostorna raspodjela indeksa HWMId za Tmax u eksperimentu CLIM.



Slika 4. Prostorna raspodjela indeksa HWMid za Tmin u eksperimentu CLIM.

no nakon tog razdoblja CTRL krivulja gotovo bez iznimke poprima veću amplitudu, jednako vrijedi za maksimalnu i minimalnu dnevnu temperaturu. Nakon 2002. anomalija više ne poprima negativne vrijednosti, a 2003. i 2010. poprima posebno visoke vrijednosti (oko +11 i +17 za maksimalne dnevne temperature u eksperimentu CTRL); tih godina su zabilježeni vrlo jaki toplinski valovi u Europi, 2003. je najpogođenija bila Južna Europa i Francuska, a 2010. Istočna Europa i Rusija, kao što je spomenuto u uvodu. Vremenski niz anomalija sličan ovome izložili su Zhang i sur. u svojem istraživanju (7) gdje razlikuju razdoblje s većom učestalošću, magnitudom i međugodišnjim varijacijama toplinskih valova (tzv. *high-HW period*), 2003.-2015., od razdoblja s manjom učestalošću, magnitudama i međugodišnjim varijacijama toplinskih valova (tzv. *low-HW period*), 1982.-1997.



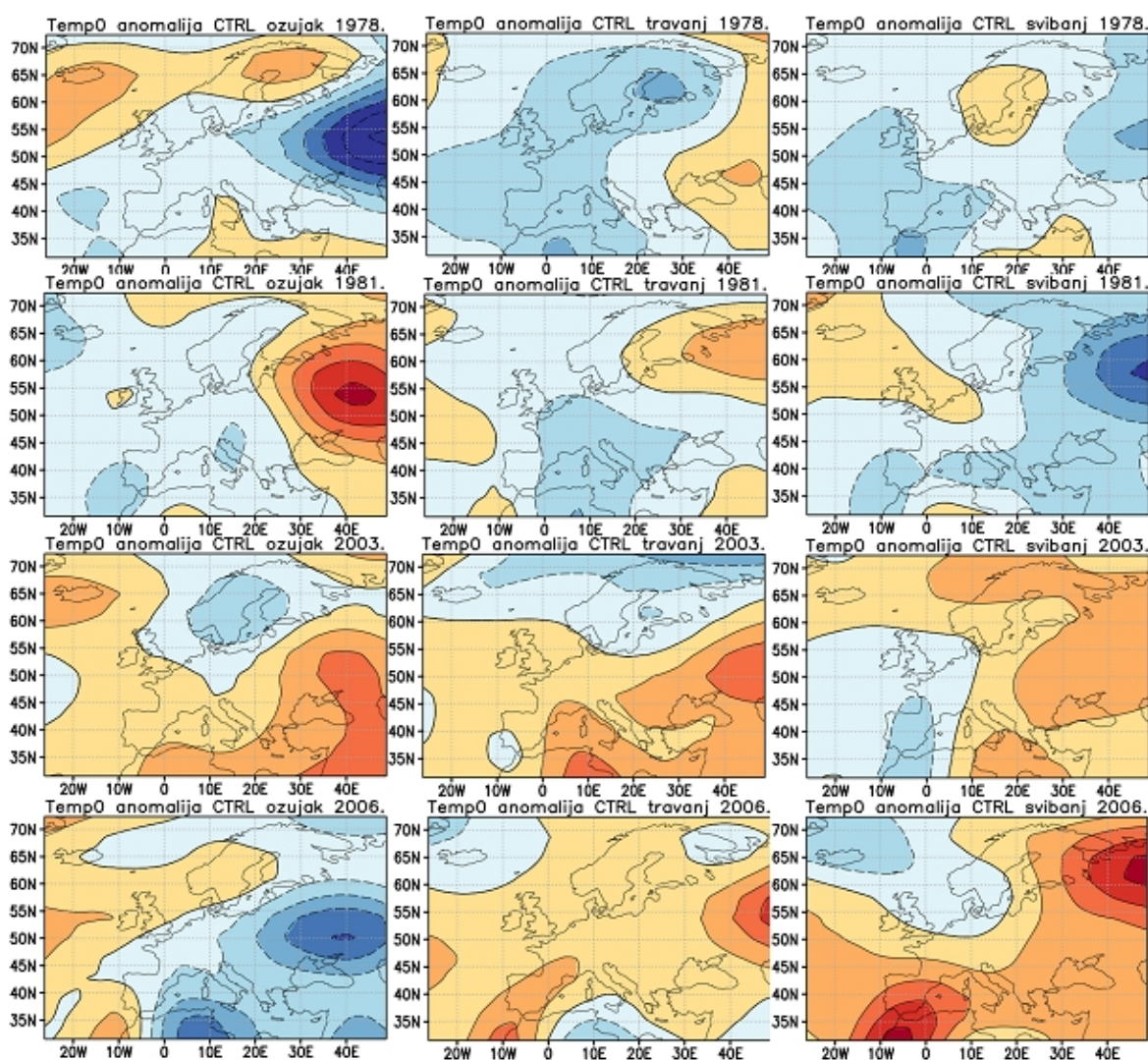
Slika 5. Vremenski niz anomalija prostorno usrednjenog (30° - 65° N, 0° - 40° E) indeksa HWMId u razdoblju 1978.-2015., referentno razdoblje za računanje anomalije je 1981.-2010. HWMId u eksperimentima CTRL i CLIM baziran na Tmax i Tmin.

S obzirom na to da u oba eksperimenta vremenski niz anomalija poprima slične vrijednosti, moguće je zaključiti da temperatura mora imati utjecaj na iznos anomalija u određenoj mjeri, ali ne i na trend porasta učestalosti i intenziteta toplinskih valova.

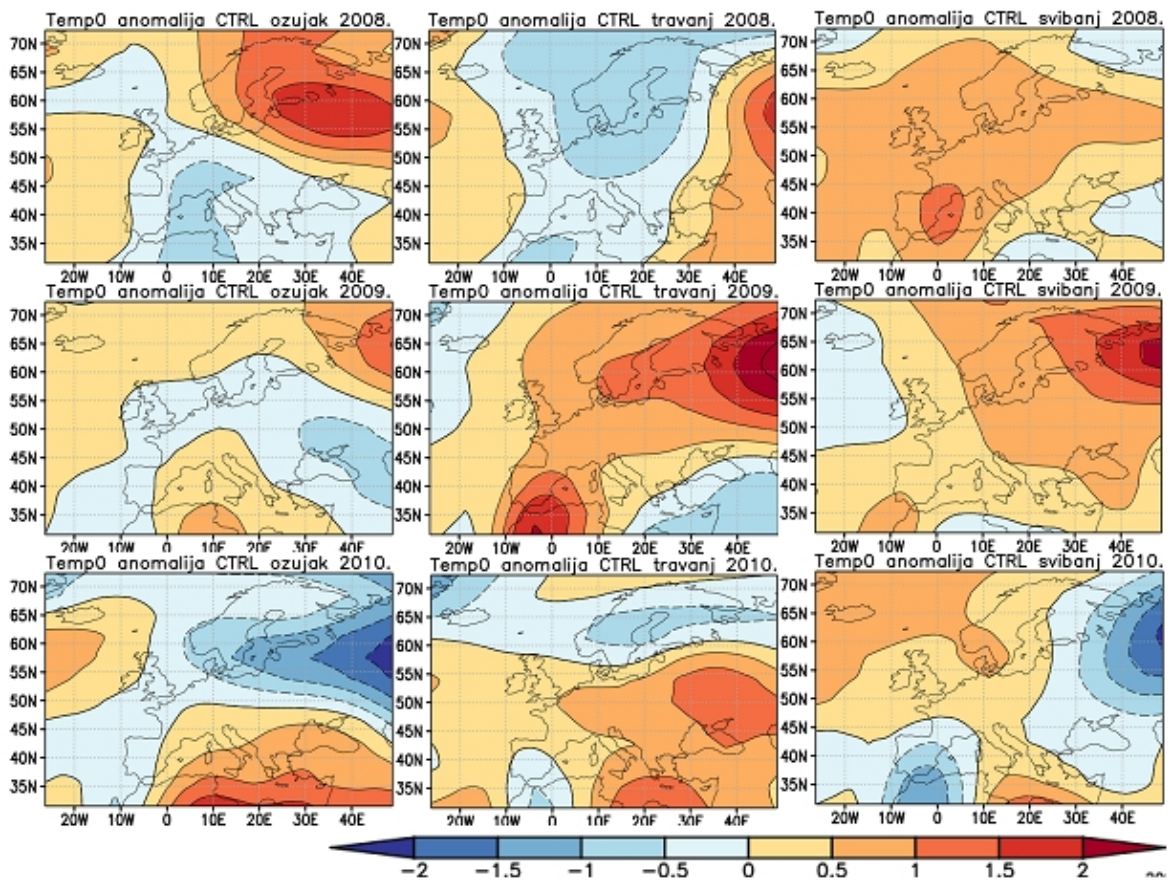
3.2. Srednja, maksimalna i minimalna mjesečna prizemna temperatura

Za daljnju analizu toplinskih valova odabrano je 7 događaja (1978., 1981., 2003., 2006., 2008., 2009. i 2010.) kod kojih je primijećena sličnost u obliku polja u prikazima

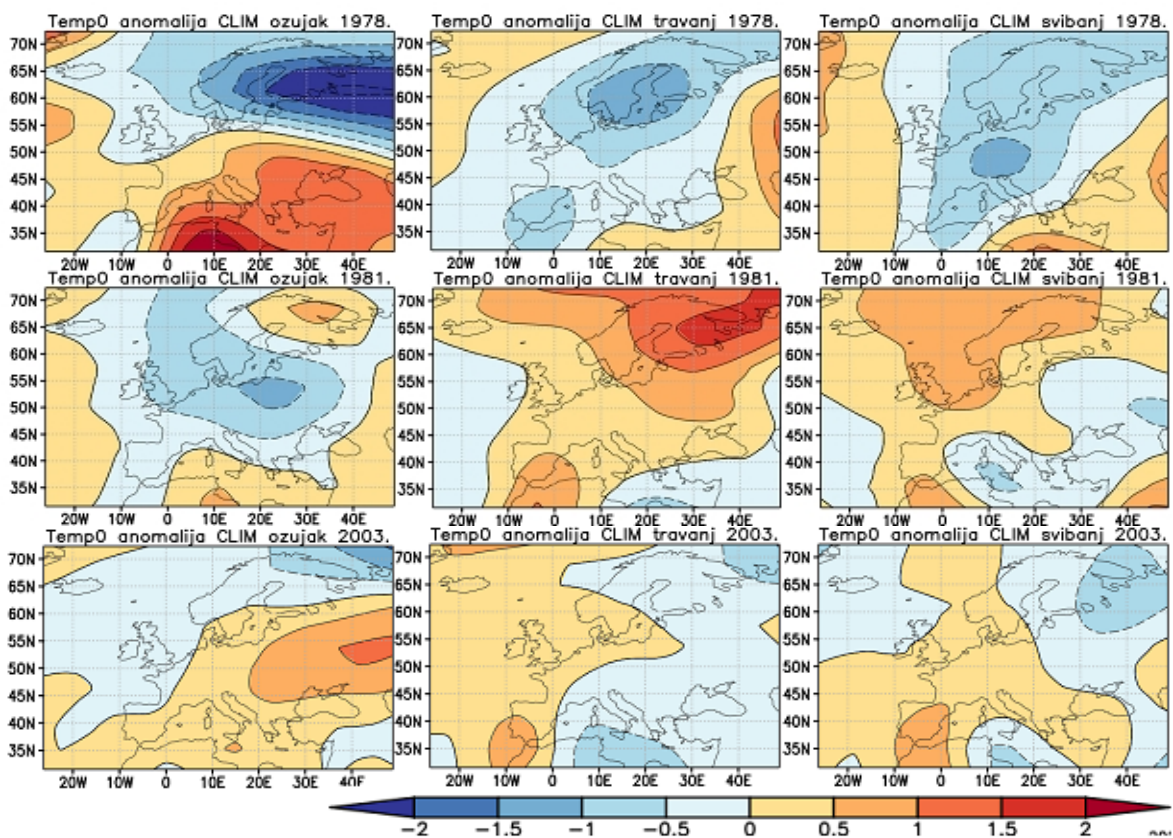
geografske raspodjele indeksa HWMI_d. U analizi su korištene srednje mjesečne vrijednosti za dobivene usrednjavanjem dnevnih vrijednosti srednje (Temp0), maksimalne (T_{max}) i minimalne (T_{min}) prizemne temperature na području Europe kao i za HWMI_d. Anomalije su računane u odnosu na referentno razdoblje 1981.-2010. te su prikazane za ljetne mjesece (JJA), a dodatno su računane i prikazane anomalije srednje prizemne temperature za proljetne mjesece (MAM). U proljetnoj sezoni za eksperiment CTRL (Slika 6.) u svim godinama osim 1978. je prisutna pozitivna anomalija Temp0, u barem 2 mjeseca. Svibanj 2010. ima izraženu negativnu anomaliju Temp0 na području istočne Europe, dok je travanj iznadprosječno topao, slična situacija je u svibnju 1981. U eksperimentu CLIM za sezonu MAM (Slika 7.) anomalije Temp0 su nešto slabije izražene, no i dalje su prisutni maksimumi ili barem pozitivne anomalije u dijelu sezone u svim godinama, a zamjetnija pozitivna anomalija (+2° C) je locirana na sjeveru Afrike u ožujku 1978. dok se u isto vrijeme na sjeveroistoku Europe nalazi minimum anomalije Temp0 (-2° C).



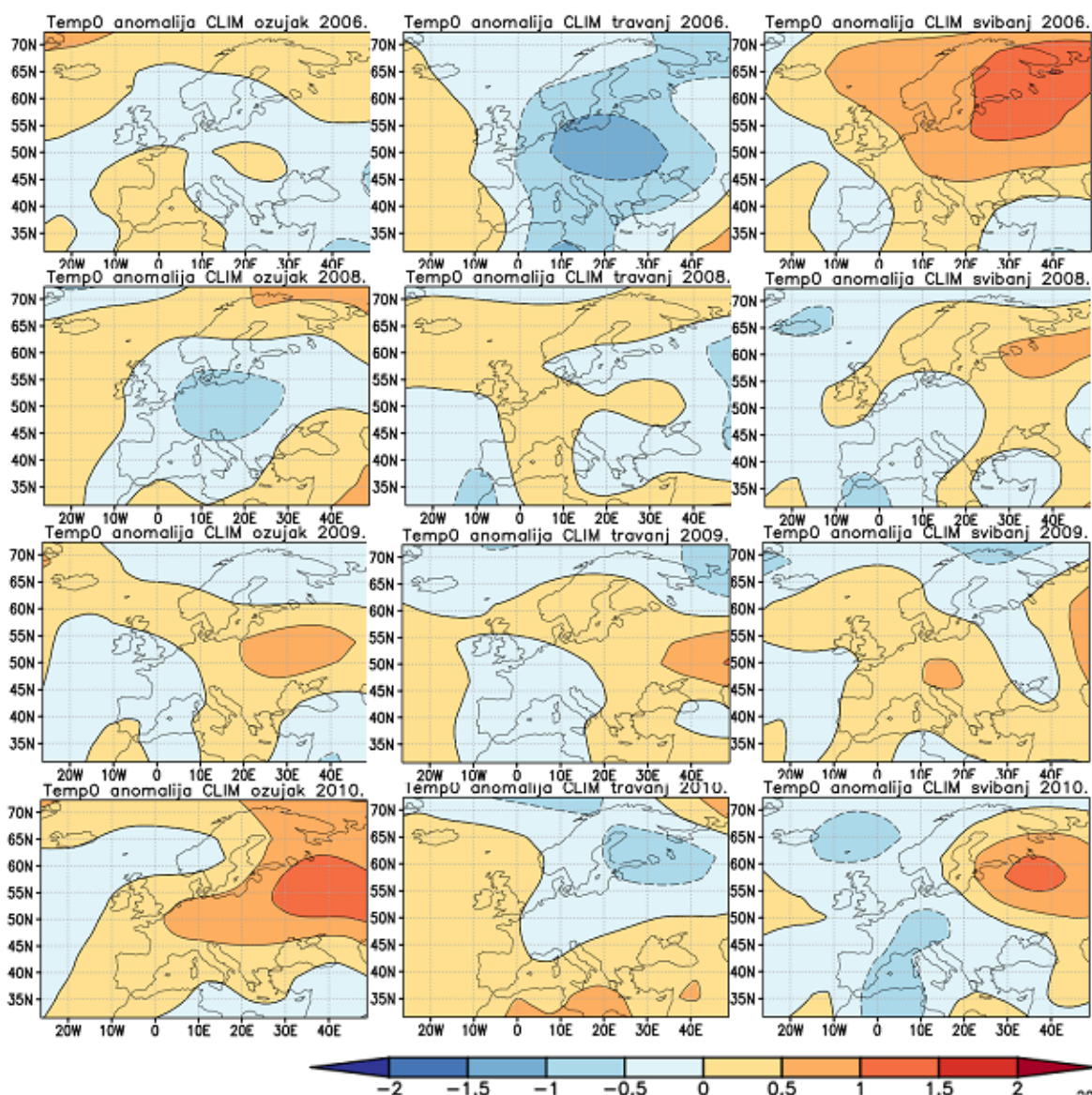
Slika 6. Anomalija Temp0 u proljetnoj (MAM) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika 6. (nastavak) Anomalija Temp0 u proljetnoj (MAM) sezoni za eksperiment CTRL.

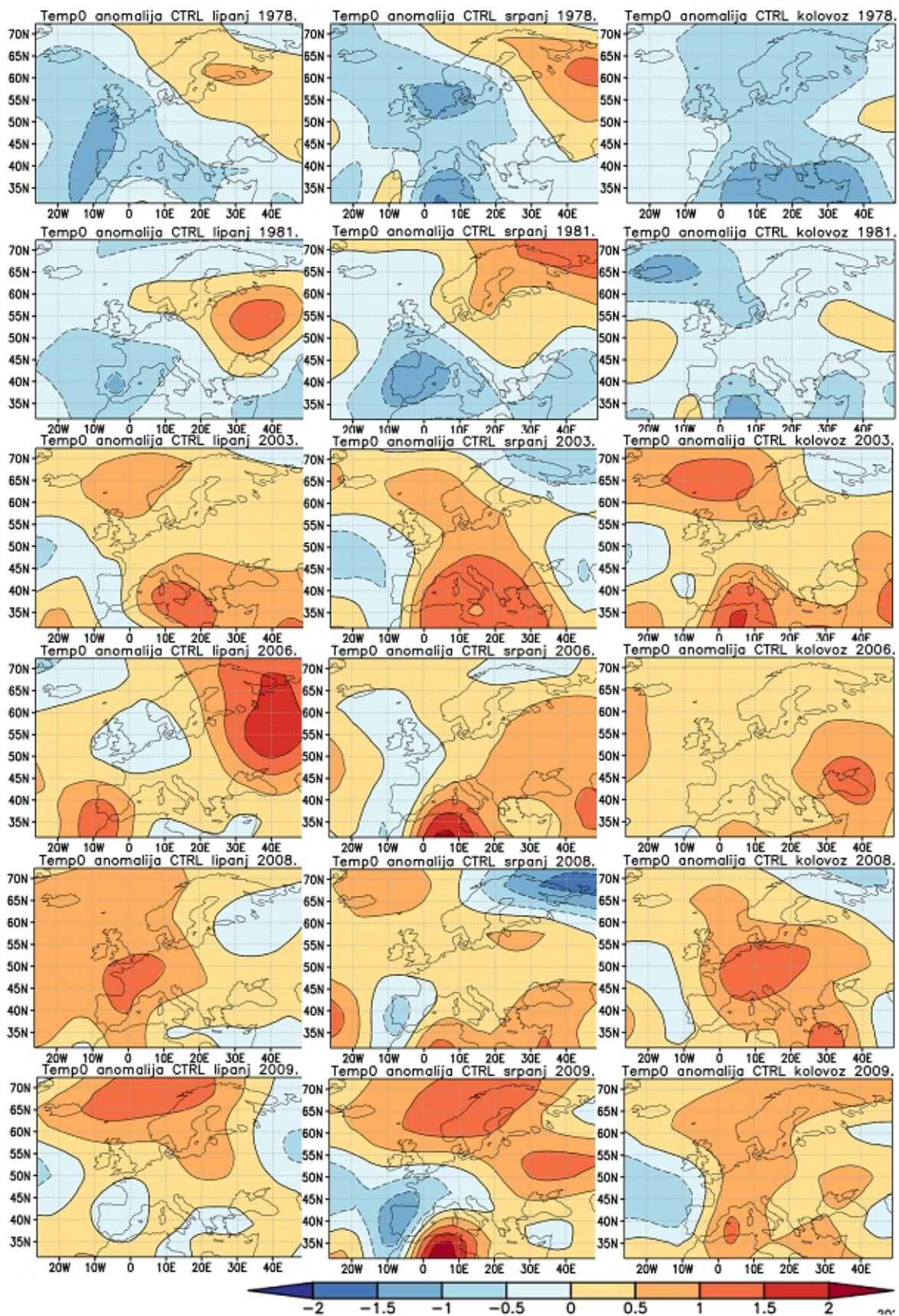


Slika 7. Anomalija Temp0 u proljetnoj (MAM) sezoni za eksperiment CLIM.

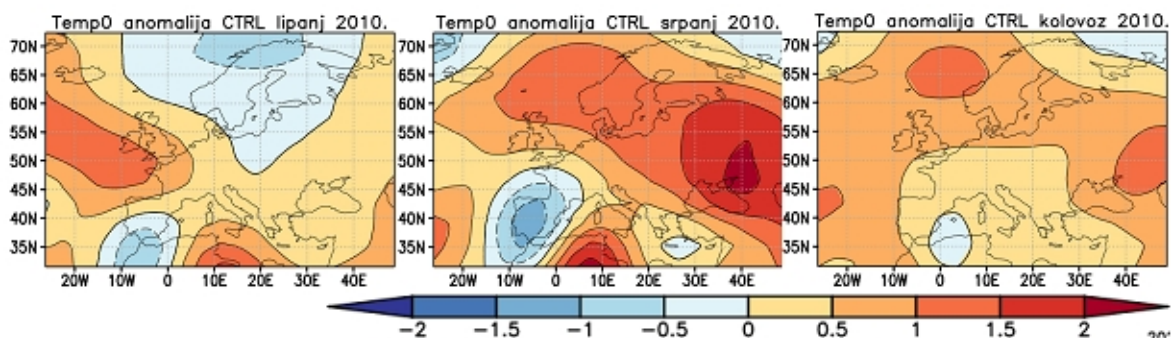


Slika 7. (nastavak) Anomalija Temp0 u proljetnoj (MAM) sezoni za eksperiment CLIM.

Raspodjela pozitivne anomalije Temp0 za JJA u eksperimentu CTRL (Slika 8.) odgovara raspodjeli indeksa HWMId za pripadajuće godine. Primjerice, detektirani toplinski val 1978. trajao je od 25. lipnja do 7. srpnja te su maksimumi temperature i oblik polja za pozitivnu anomaliju Temp0 u lipnju i srpnju slični raspodjeli HWMId za taj događaj. Isto se uočava i u godinama detektiranih intenzivnih toplinskih valova 2003. i 2010. Toplinski val 2003. trajao je od 4. do 18. kolovoza, no dulja vruća razdoblja su se javljala i tijekom srpnja, što se očituje u pozitivnoj anomaliji Temp0 (+1° C) nad Južnom Europom i Sredozemljem u srpnju i kolovozu. Toplinski val 2010. u Istočnoj Europi trajao je od 3. do 23. srpnja što se dobro podudara sa razmjerno velikom pozitivnom anomalijom (+2° C) Temp0 u srpnju nad područjem istočne Europe. Jednaki uzorci kao kod Temp0 uočavaju se i kod Tmax i Tmin, s kvantitativno manjom pozitivnom anomalijom.

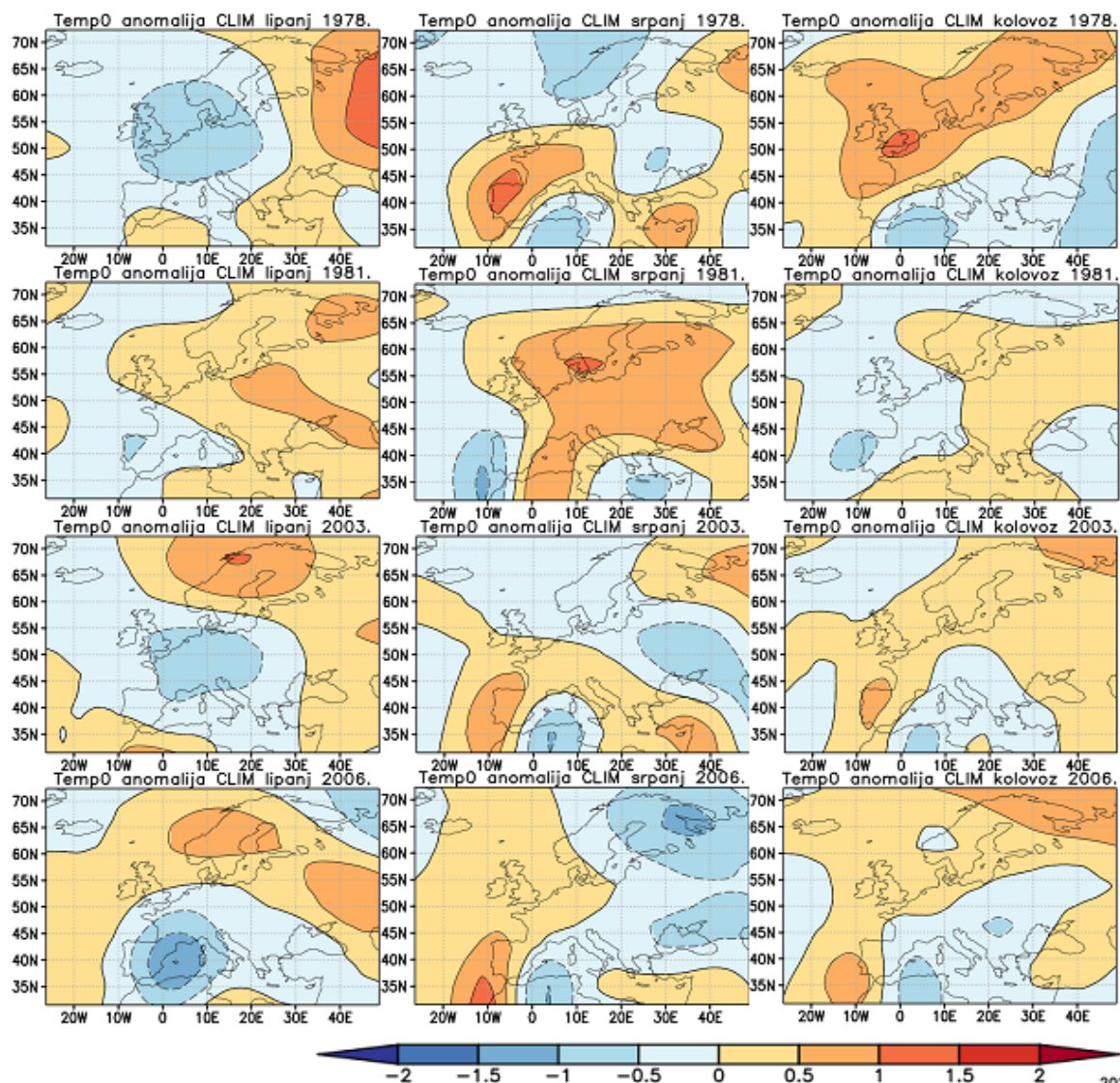


Slika 8. Anomalija Temp0 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.

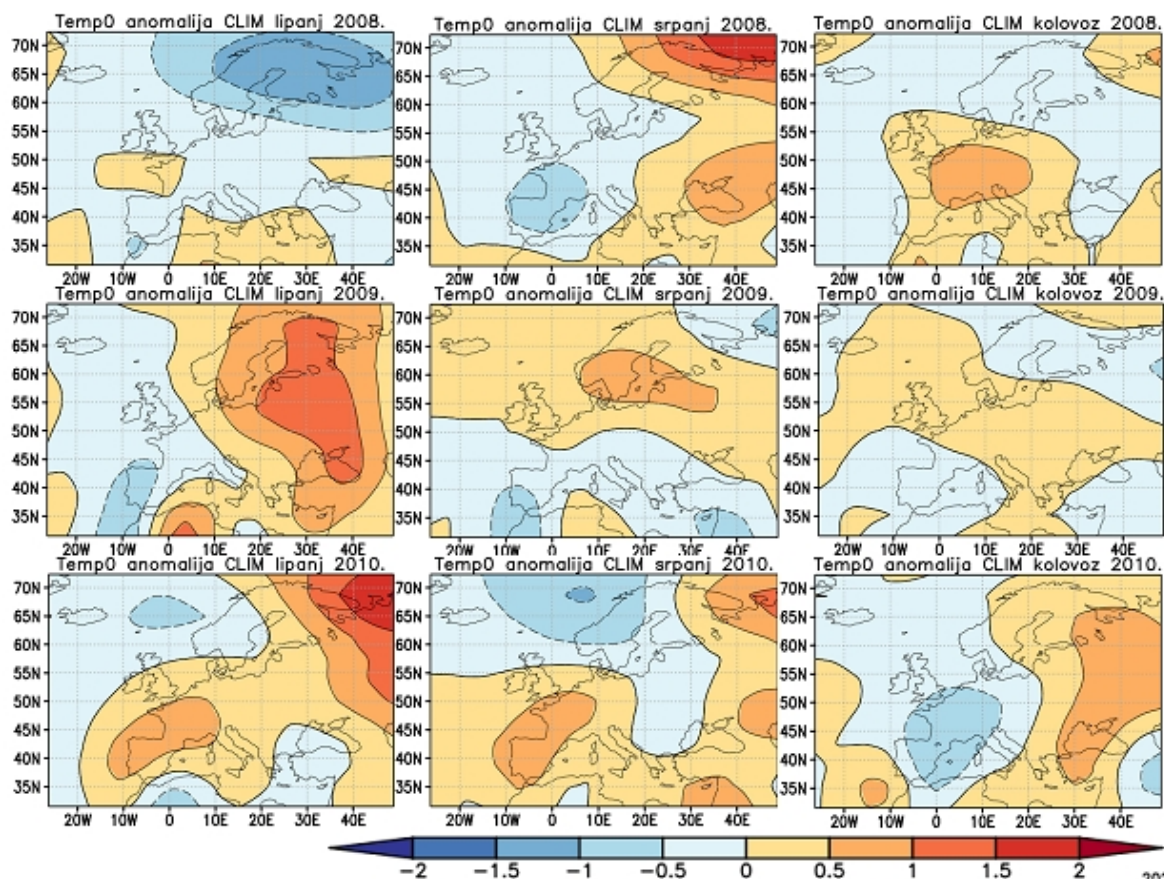


Slika 8. (nastavak) Anomalija Temp0 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.

Anomalije Temp0 za JJA u eksperimentu CLIM (Slika 9.) su manjeg iznosa nego u CTRL eksperimentu. Oblici polja anomalije Temp0 uglavnom dobro prate geografsku raspodjelu HWMid-a za eksperiment CLIM. Iz ovoga slijedi da međugodišnja varijacija SST-a utječe na srednje mjesečne Temp0 u JJA na način da su pozitivne i negativne anomalije iznosom veće.



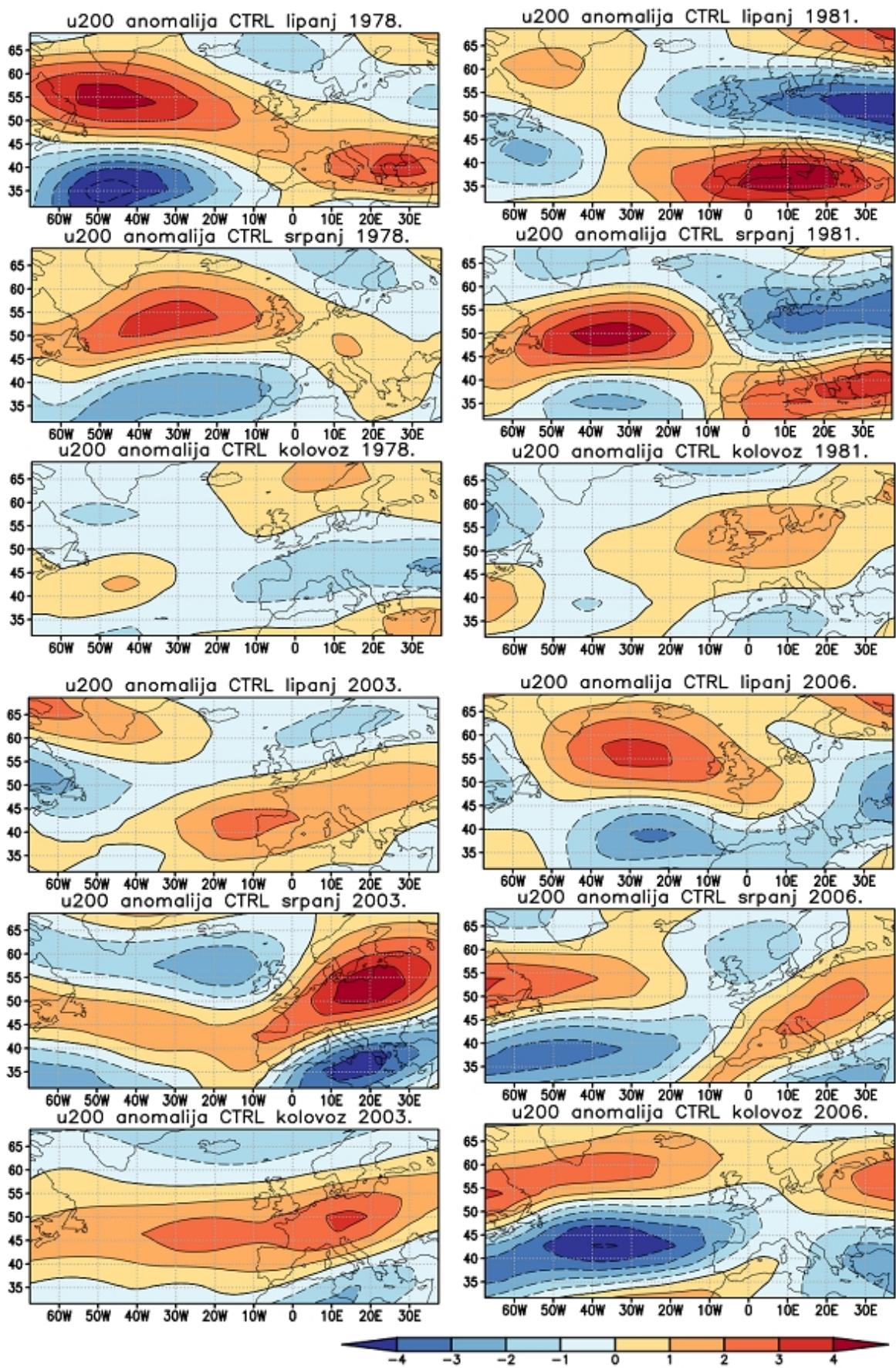
Slika 9. Anomalija Temp0 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.



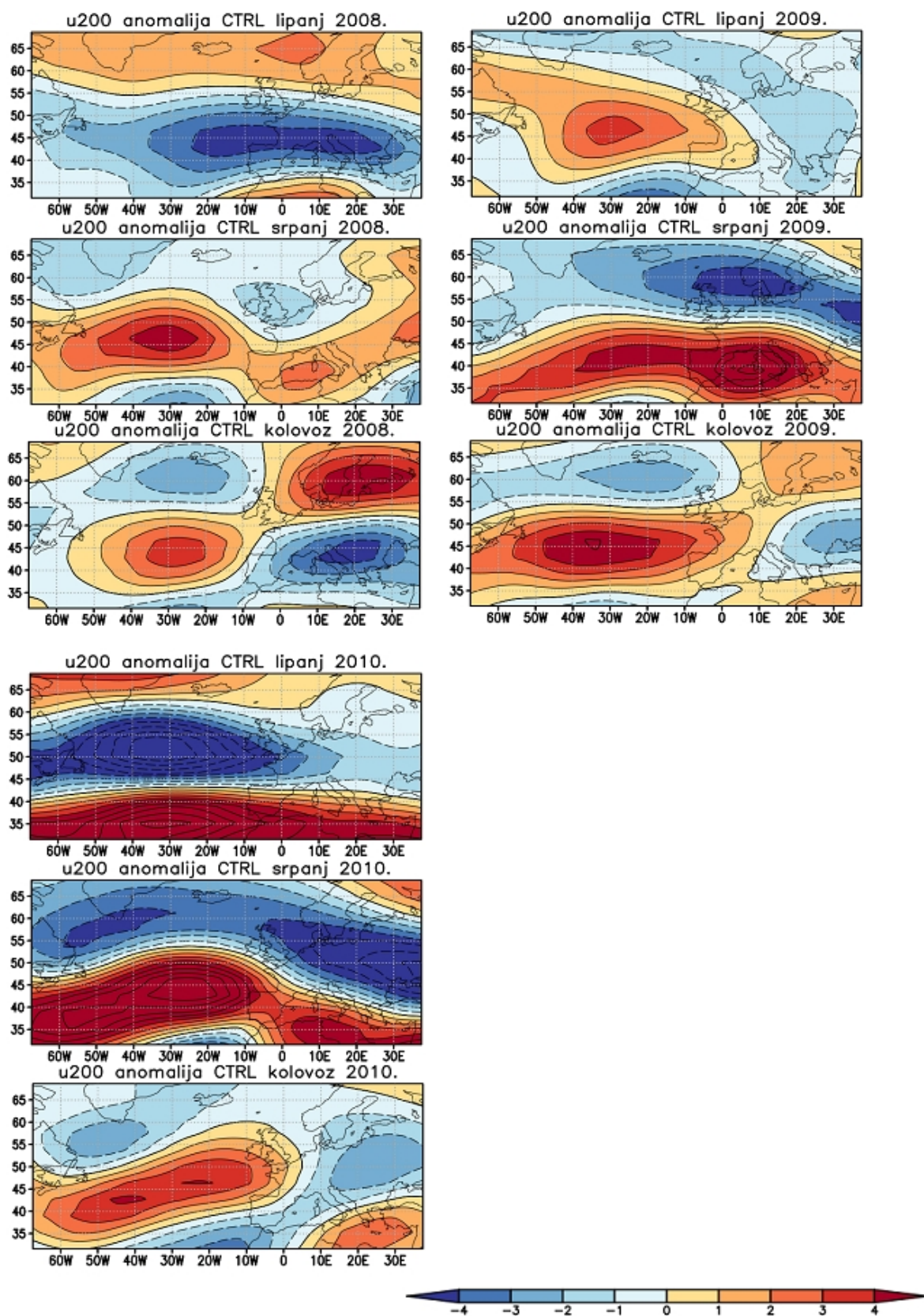
Slika 9. (nastavak) Anomalija Temp0 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.

3.3. Zonalna komponenta vjetra u850 i u200 te gh500

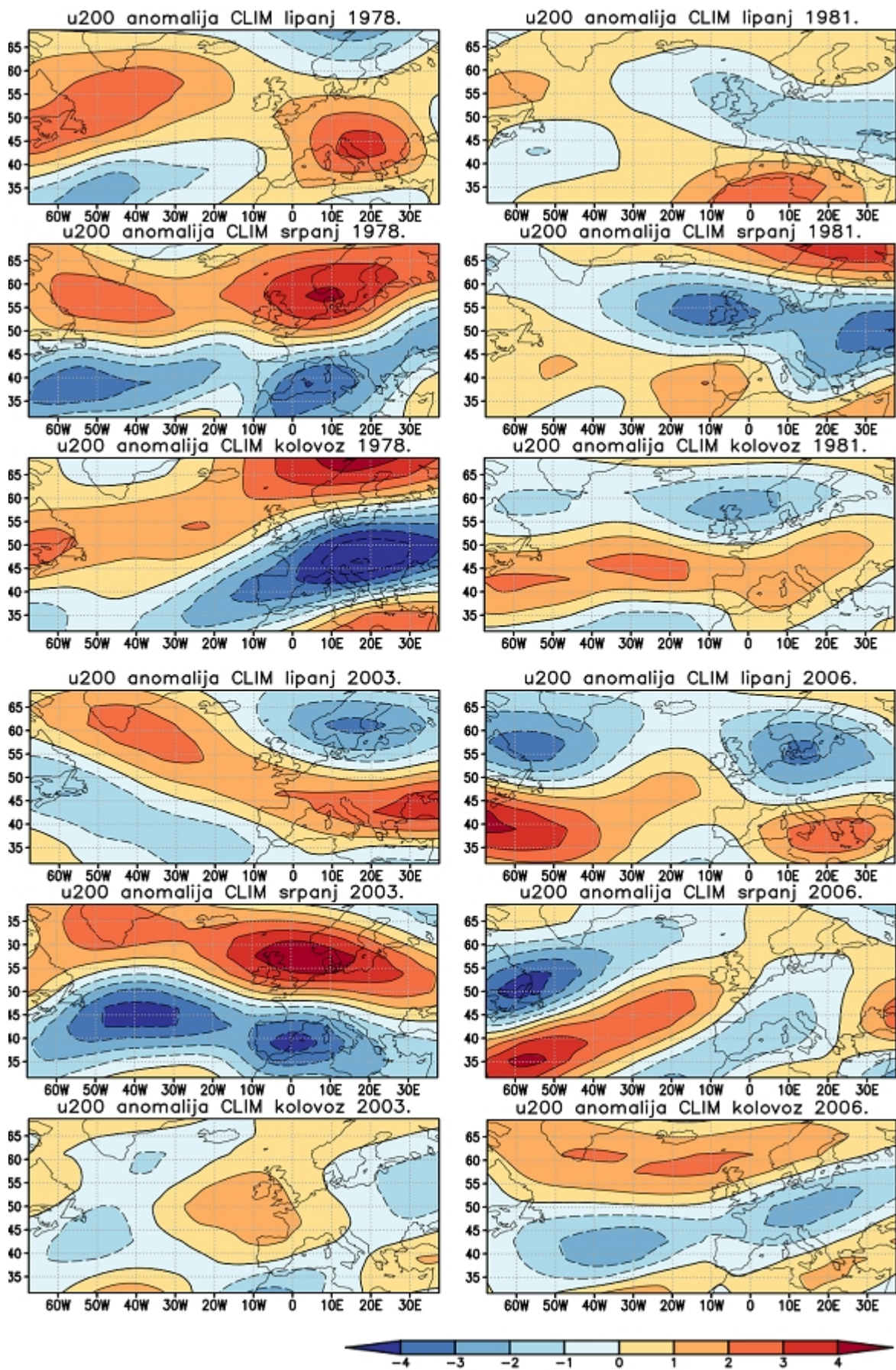
Zonalna komponenta vjetra analizirana je na izobarnim plohama od 850 hPa (u850) i 200 hPa (u200) za odabrane godine iz prošlog odjeljka, u ljetnoj (JJA) sezoni. Izračunate su i prikazane anomalije srednjih mjesečnih vrijednosti veličine u200 (Slika 10. za CTRL i Slika 11. za CLIM eksperiment) i u850 (u Dodatku A) u odnosu na referentno razdoblje 1981.-2010. za područje Europe i Sjevernog Atlantika. Oblici polja su relativno slični za anomalije u200 i u850 u istim terminima i za isti eksperiment, a razlika se primjećuje u iznosu anomalije, gdje se pokazalo da su anomalije u200 uglavnom veće. Oblici polja u eksperimentima CTRL i CLIM su, uglavnom, slični, a odstupanja se vide u meridionalnom ili zonalnom pomaku polja anomalija.



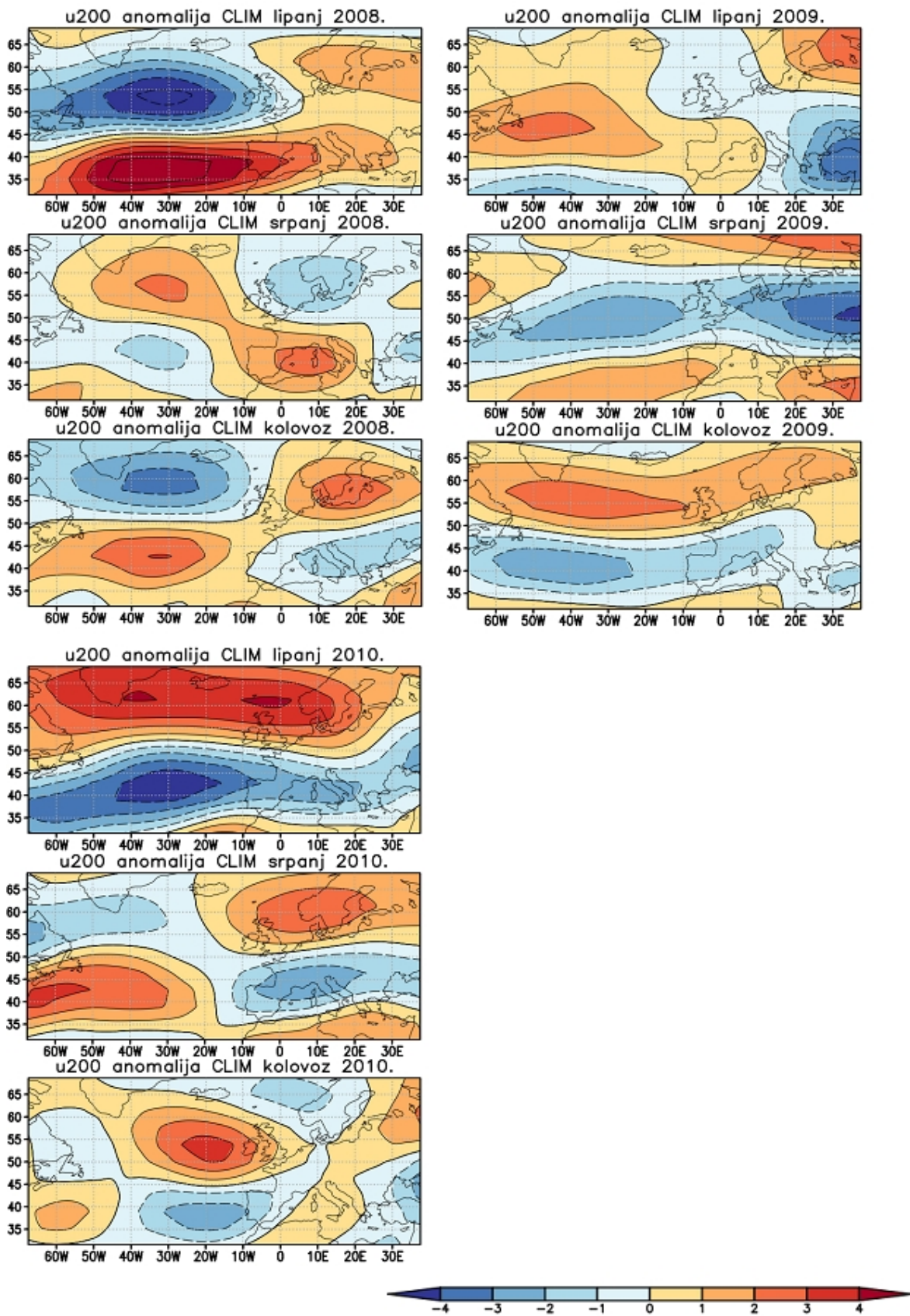
Slika 10. Anomalija u200 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika 10. (nastavak) Anomalija u200 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



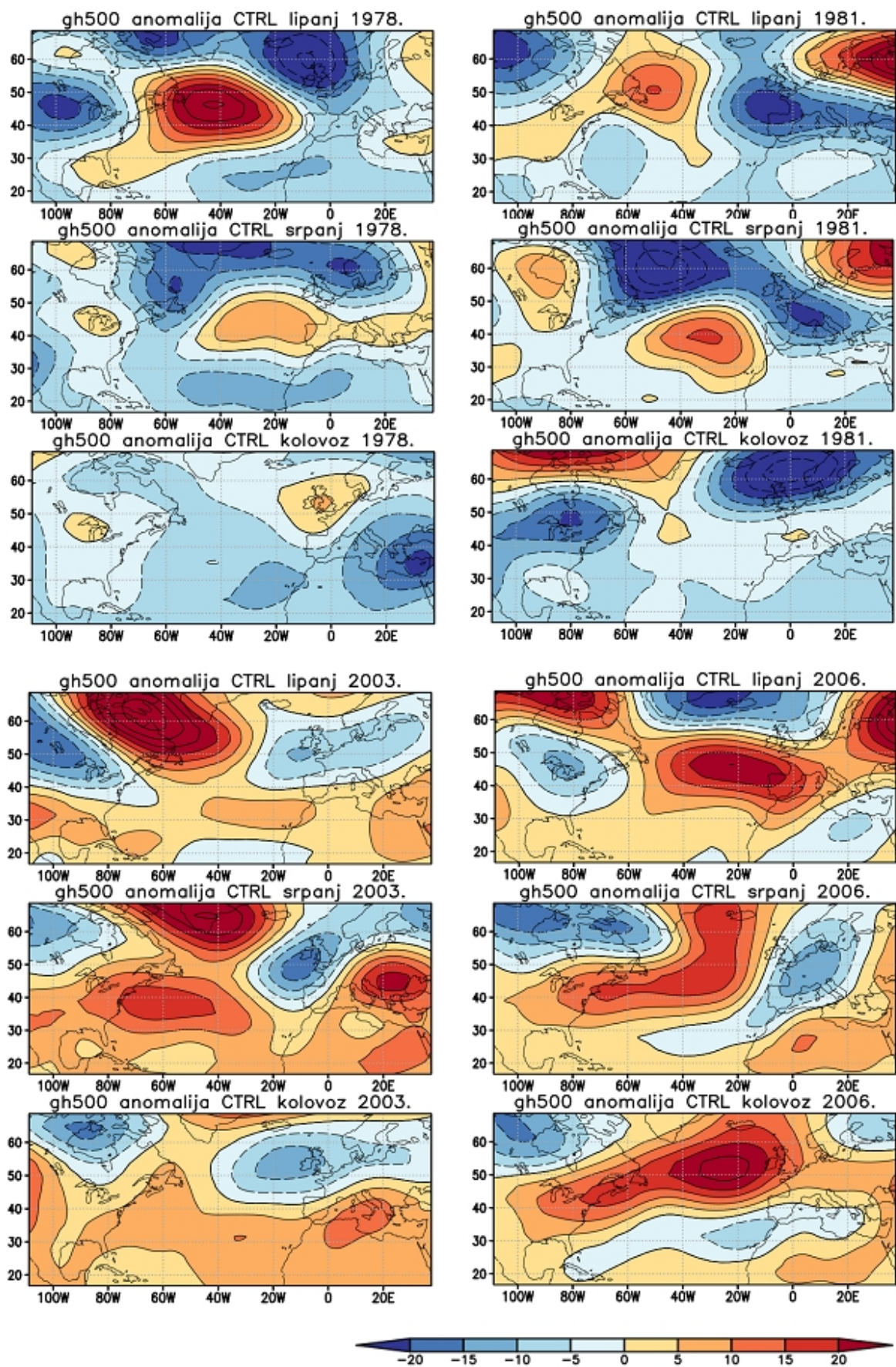
Slika 11. Anomalija u200 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.



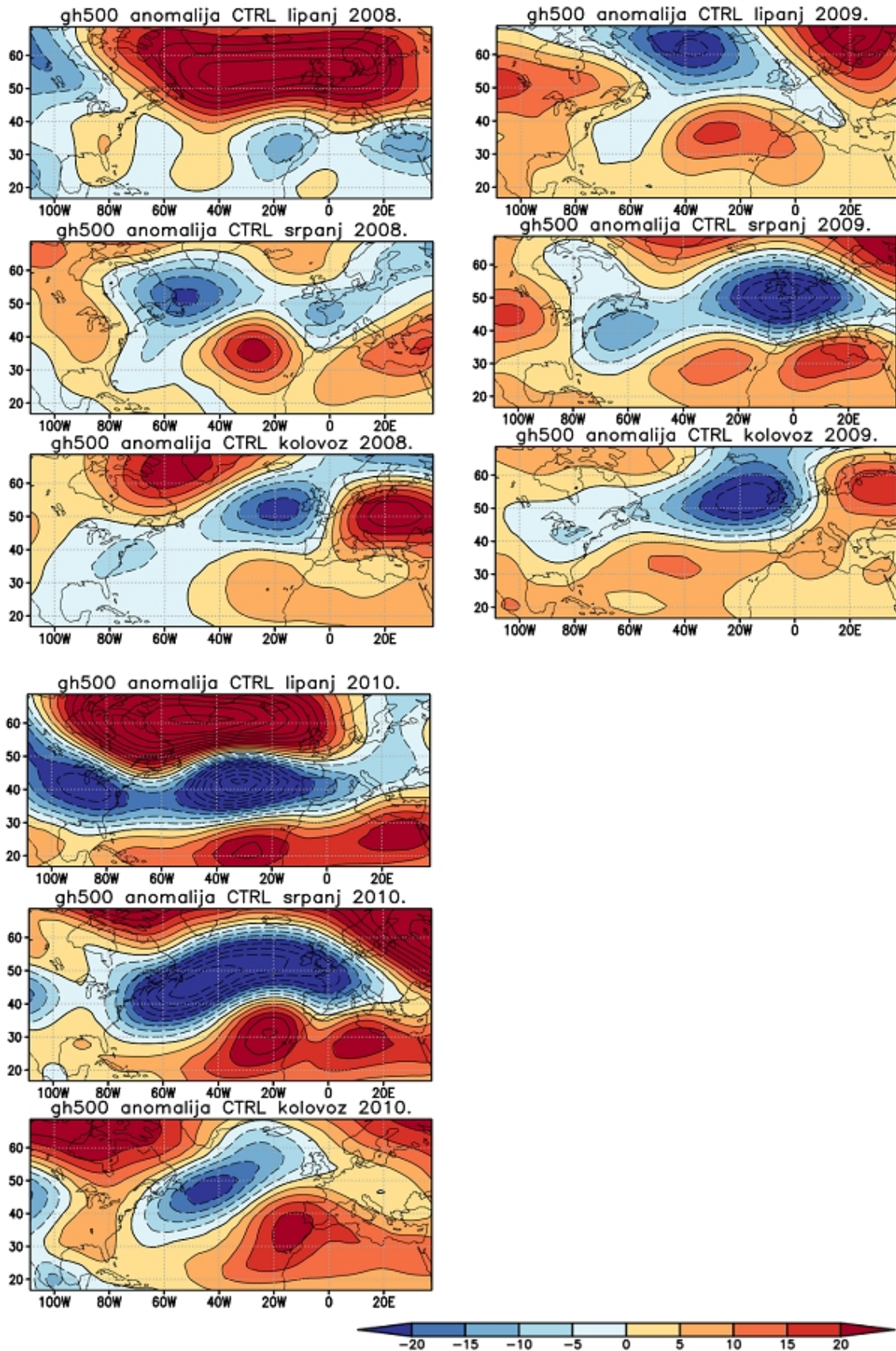
Slika 11. (nastavak) Anomalija u200 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.

Najveći iznosi anomalija odnose se na 2010. godinu, osobito u lipnju i srpnju; te je godine zabilježen vrlo jak i dugotrajan toplinski val u Istočnoj Europi. U eksperimentu CTRL, lipanjsko polje pozitivne anomalije u200 i u850 sa središtem nad Atlantskim oceanom (na 35° W), pozicionirano je južno od 40° N, a iznos anomalije u središtu polja je +9 m/s. Između 45° N i 60° N formiralo se polje negativne anomalije u200 s iznosom u središtu od -8 m/s. U srpnju polje pozitivne anomalije prodire sjevernije u Atlantski ocean i Europu, a u Istočnoj Europi formira se minimum (-6 m/s), odnosno pojačano istočno strujanje koje je onemogućilo dotok vlažnog zraka i eventualno prekidanje dugotrajne suše. Situacija u kolovozu je slična, s razlikom značajno manjih iznosa anomalija. Lipanjska situacija u eksperimentu CLIM je gotovo obrnuta po poziciji polja, dok u srpnju i kolovozu relativno dobro prati eksperiment CTRL, izuzev iznosa anomalija koji su i do upola manji u eksperimentu CLIM. Po obliku polja u srpnju, situaciji u 2010. slična je 2009., s manjim iznosima anomalija. Također, 2003. u srpnju te 2006. i 2008. u lipnju i kolovozu primjećuje se negativna anomalija nad Južnom Europom i Sredozemljem što je moguće doprinijelo stvaranju povoljnih uvjeta za nastanak toplinskih valova u Središnjoj i Južnoj Europi (2003. je zabilježeno nekoliko vrlo jakih toplinskih valova u većem dijelu Europe). U kolovozu 2008., slično kao i u srpnju 2003. vidljiva je kvadripolna formacija polja anomalija u200 u eksperimentima CTRL i CLIM, gdje su osim minimuma nad Sredozemljem i Sjevernim Atlantikom uočljivi maksimumi nad Sjevernom Europom i Atlantikom srednjih sjevernih geografskih širina.

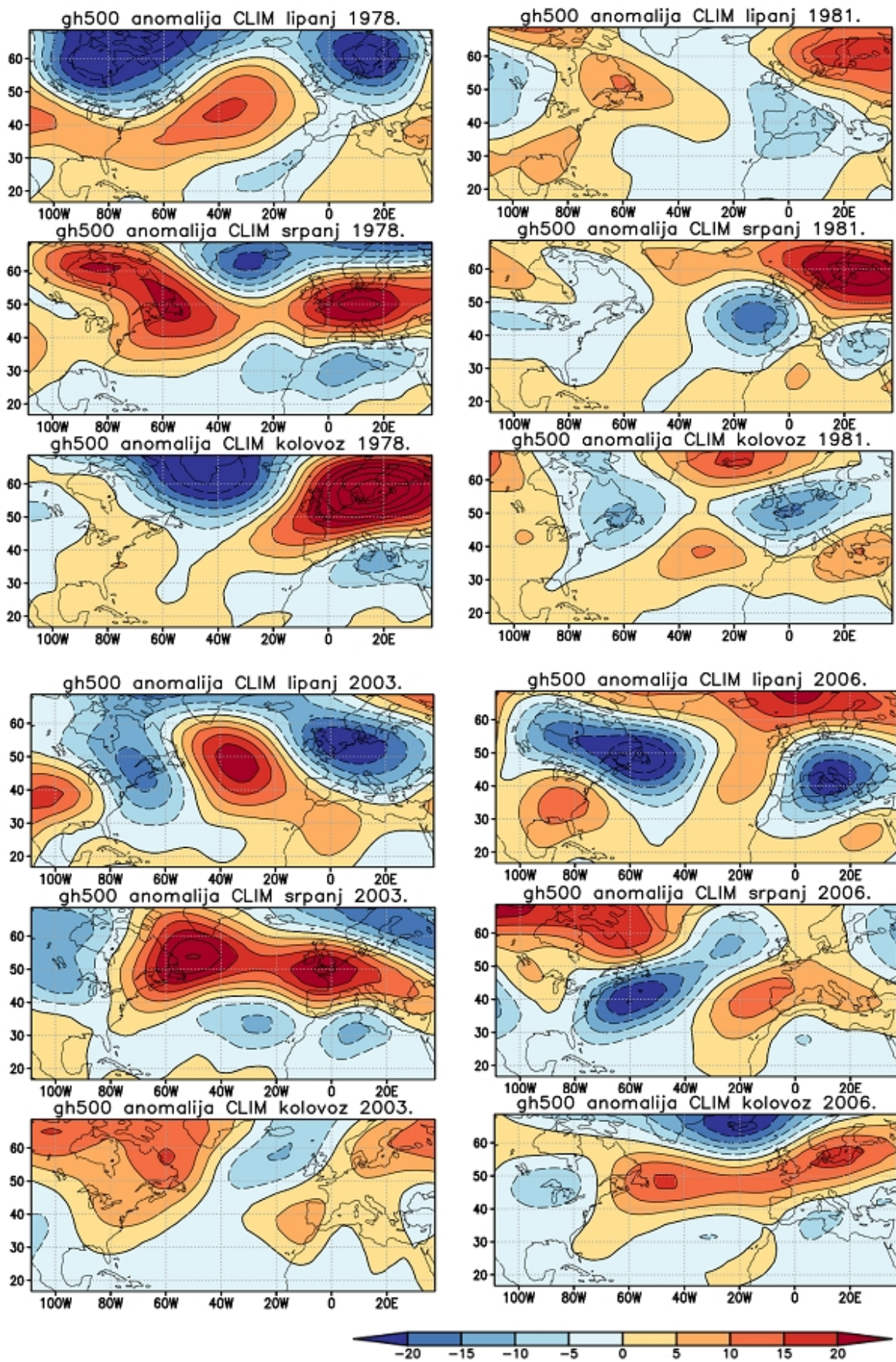
U nastavku su analizirane anomalije srednje mjesečne geopotencijalne visine na 500 hPa izobarnoj plohi (gh500), u odnosu na referentno razdoblje 1981.-2010. Anomalije su izračunate za eksperimente CTRL i CLIM, za godine kao i ranije, te su prikazane redom na Slikama 12. i 13. Najveća anomalija u eksperimentu CTRL nađena je za 2010. godinu kada je u lipnju formirano prostrano pozitivno polje nad Sjevernom Europom i Sjevernim Atlantikom sa anomalijom u središtu od +55 m, dok se polje negativne anomalije smjestilo između 50°N i 35°N (minimum od -45 m), a južno od tog polja se nalazi slabije pozitivno polje. Slična situacija vidljiva je i u lipnju 2008., s nešto manjim iznosima i bez meridionalnog tripola. U srpnju i kolovozu 2008. nad Sjevernom Europom i Atlantikom vidljiv je kvazizonalni tripol, vidljiv u oba eksperimenta, a sličan uzorak primjećen je i u lipnju 1981., 2003. i 2006., s razlikom u vidu pomaka polja istočno ili zapadno. Takve tripolne formacije mogle bi ukazivati na Rossbyjeve planetarne valove, s tim da se čini kao da se lipanjski tripoli u eksperimentu CTRL sa odmicanjem vremena raspadaju, dok su u eksperimentu CLIM nešto stabilniji. Oblici polja u eksperimentima CTRL i CLIM se



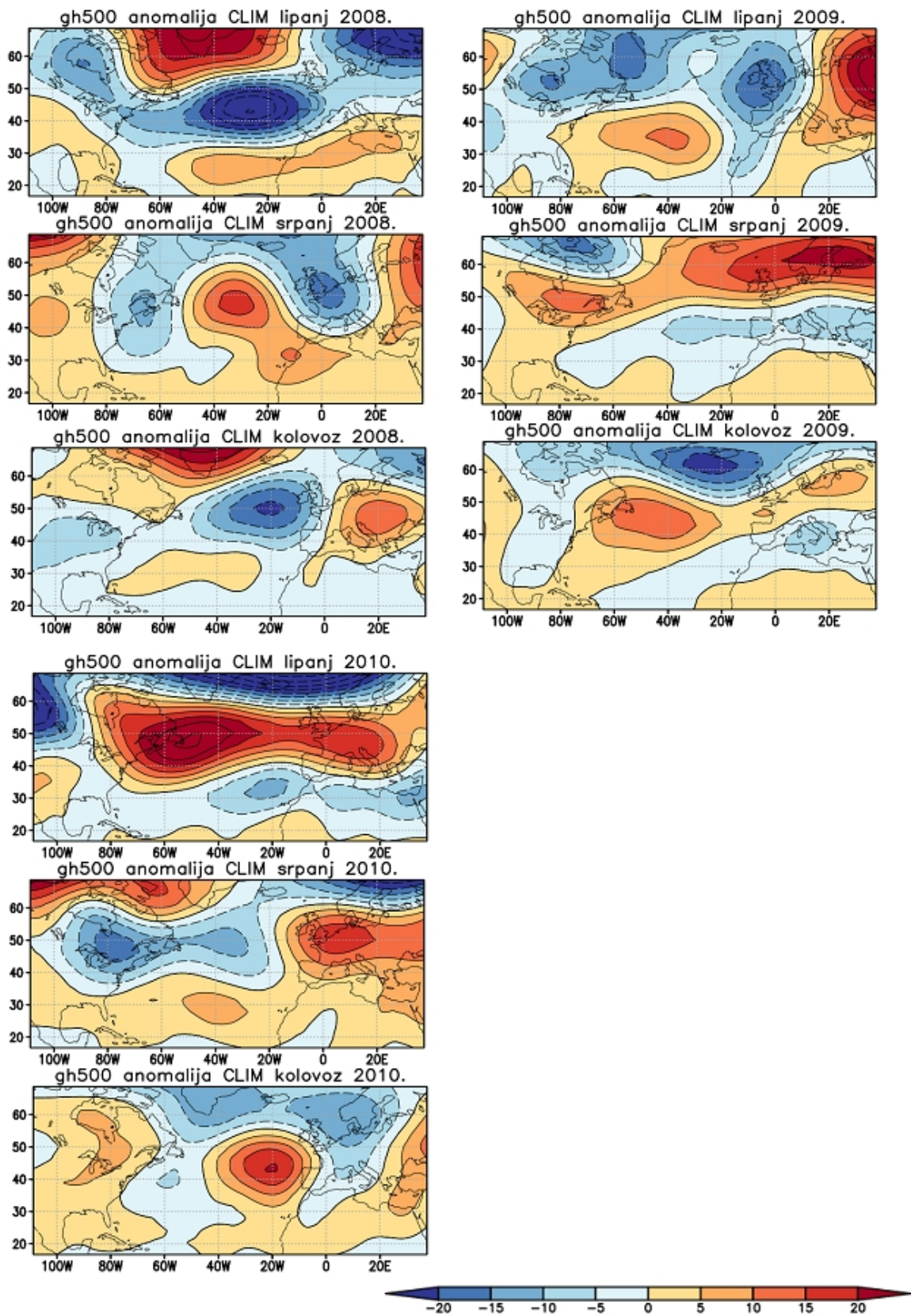
Slika 12. Anomalija gh500 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika 12. (nastavak) Anomalija gh500 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika 13. Anomalija gh500 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.



Slika 13. (nastavak) Anomalija gh500 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.

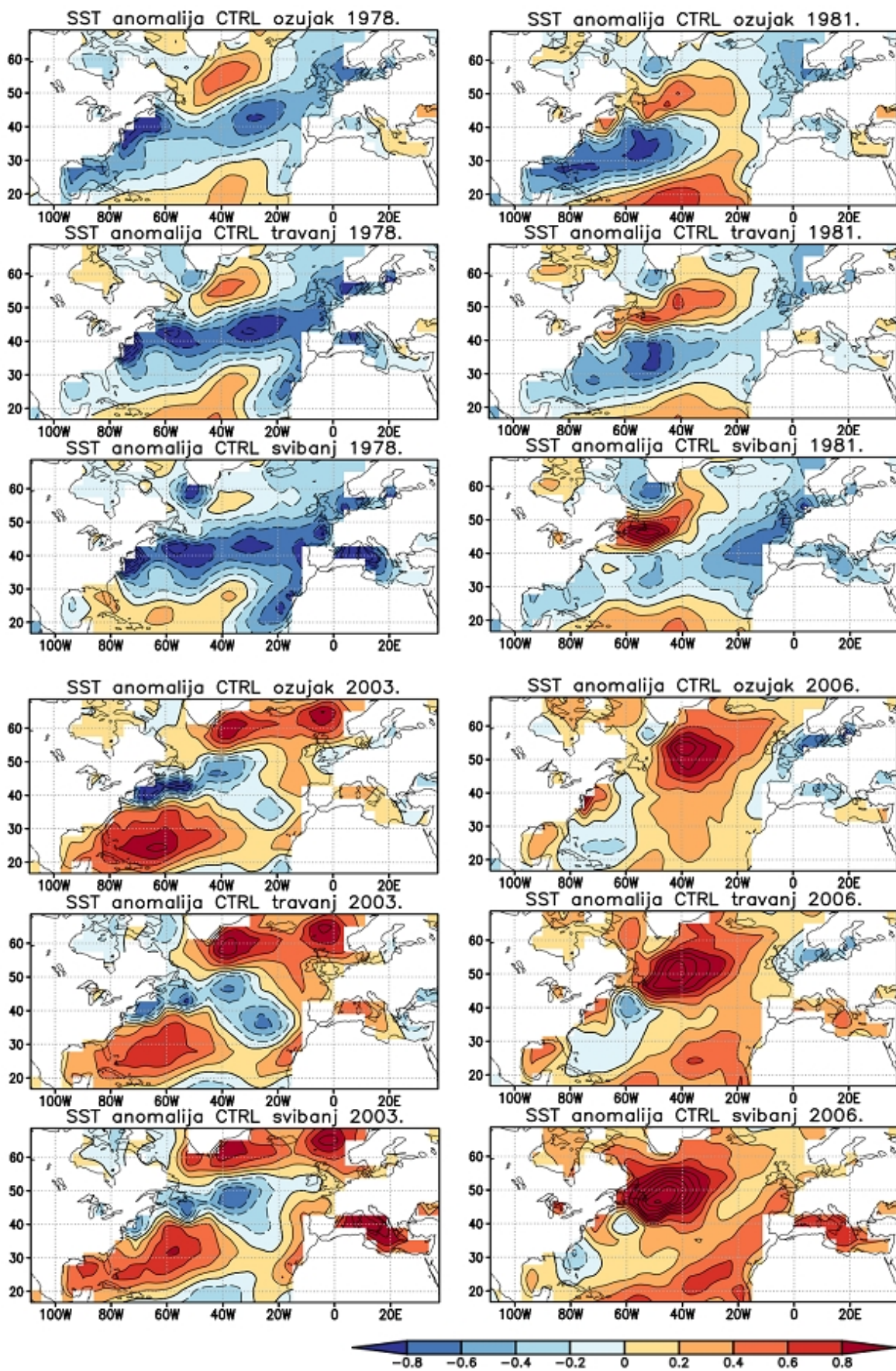
relativno dobro podudaraju, sa iznimkom nekih termina, primjerice srpnja i kolovoza 1978. te srpnja 2009. Iznosi anomalija u pravilu su nešto manji u eksperimentu CLIM, no povremeno se javljaju iznimke, pogotovo kada se radi o negativnoj anomaliji.

3.4. Anomalija srednje mjesečne površinske temperature mora

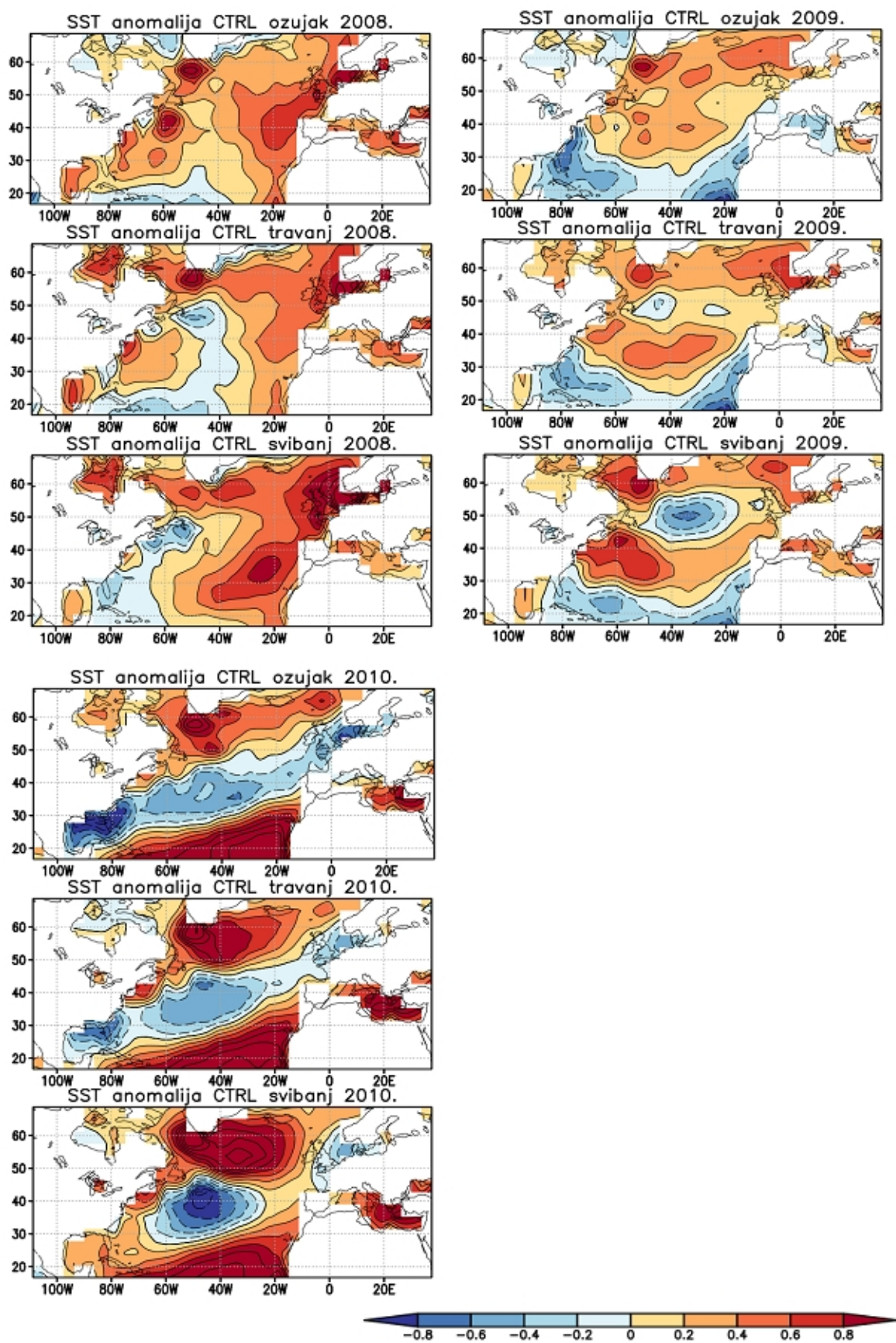
Anomalija srednjih mjesečnih SST-a određena je na području Atlantskog oceana između 65° N i 25° N, za proljetnu (MAM) i ljetnu (JJA) sezonu u godinama koje su se ranije pokazale relevantnima (1978., 1981., 2003., 2006., 2008., 2009. i 2010.). U analizi anomalija SST-a obuhvaćena je i proljetna sezona radi pretpostavke da proljetna situacija ima utjecaja na stvaranje uvjeta za nastanak, jačanje i produljeno trajanje toplinskih valova u Europi u ljetnoj sezoni. S obzirom na to da CLIM eksperiment u svojim postavkama nema međugodišnju varijabilnost SST-a, ovdje se analiziraju anomalije iz seta podataka CTRL eksperimenta te se spomen SSTA u daljnjem tekstu odnosi na CTRL eksperiment.

Proljetne anomalije prikazane su na Slici 14. U većini godina primjećuje se meridionalna izmjena anomalnih područja, sjeverno od 40° - 50° N nalazi se polje pozitivne anomalije, zatim između tog područja i 25° - 35° N nalazi se polje negativne anomalije te južno od tog područja opet polje pozitivne anomalije SST-a. Ovisno o godini, anomalije se pomiču istočno ili zapadno te kvantitativno variraju, najjače anomalije opažene su 2006. ($+1.8^{\circ}$ C, svibanj), kada je negativno anomalno područje vrlo malo, i 2010. (-1.0° C, svibanj), kada su sva tri anomalna područja izražena i dobro formirana.

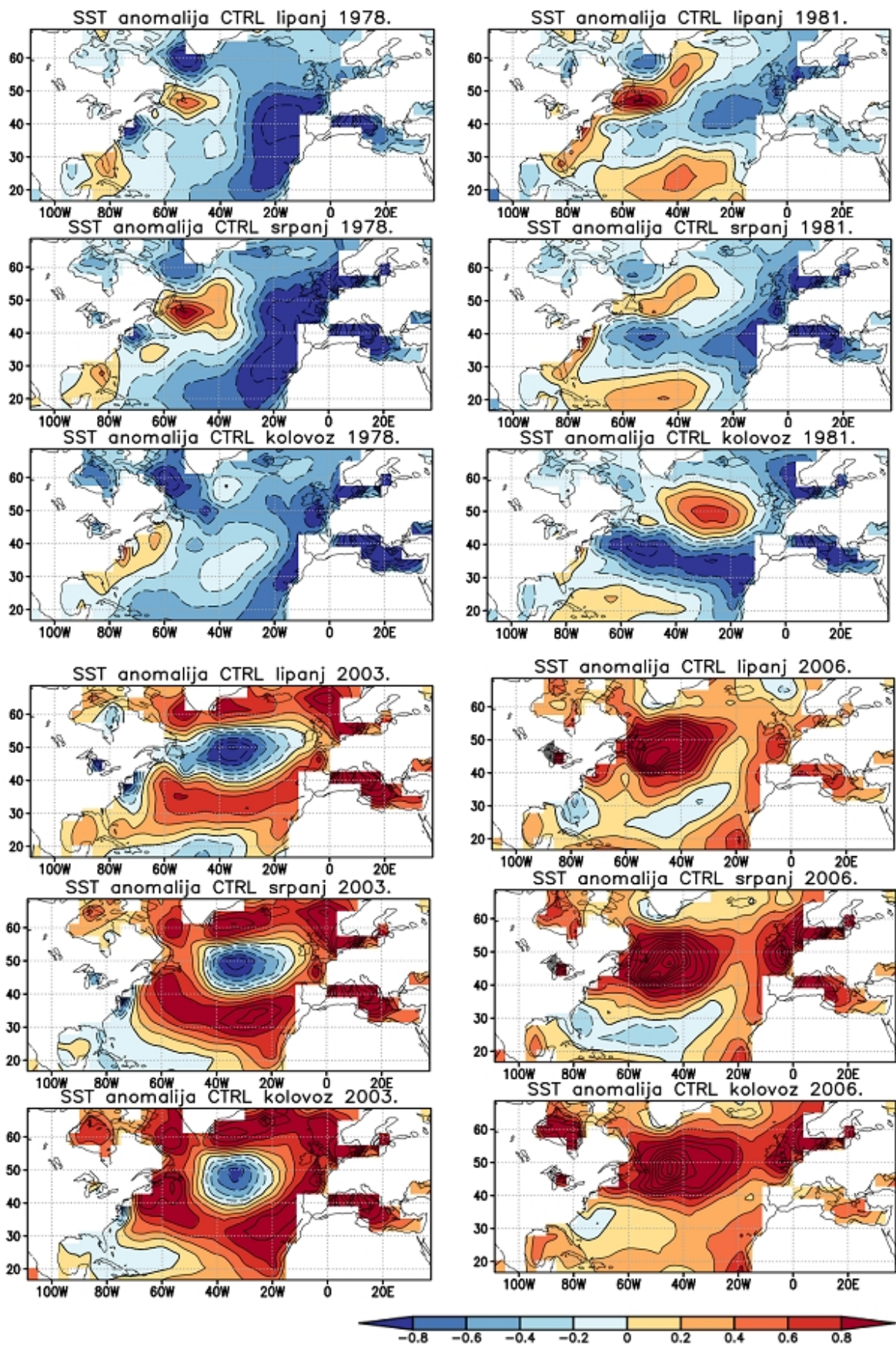
Ljetne anomalije se (Slika 15.), kao i proljetne, meridionalno izmjenjuju, no njihovim rasporedom u pojedinim godinama (2003., 2009., 2010.) dominira negativno polje eliptičnog oblika, koje se na tom području održava cijelu ljetnu sezonu, osim 2010. kada već u srpnju slabi. Iznos pozitivne anomalije u srpnju 2006. doseže $+2.2^{\circ}$ C, a te je godine zabilježena i najveća proljetna pozitivna anomalija. Također, u proljeće 2006., negativna anomalija je površinski i kvantitativno vrlo malena i pomaknuta na zapad, a anomalna polja u ljetu 2006. zadržavaju sličan raspored. 2010. anomalna polja zadržavaju proljetni oblik do srpnja, kada se gubi kvazitripolna podjela. U JJA i MAM sezonama 1978. javlja se veće negativno polje uz obale Europe i Afrike, što je jedini takav slučaj među promatranima, no čini se, na temelju analize prizemne temperature, da je toplinski val te godine imao drugačiji mehanizam nastanka u usporedbi sa ostalim godinama.



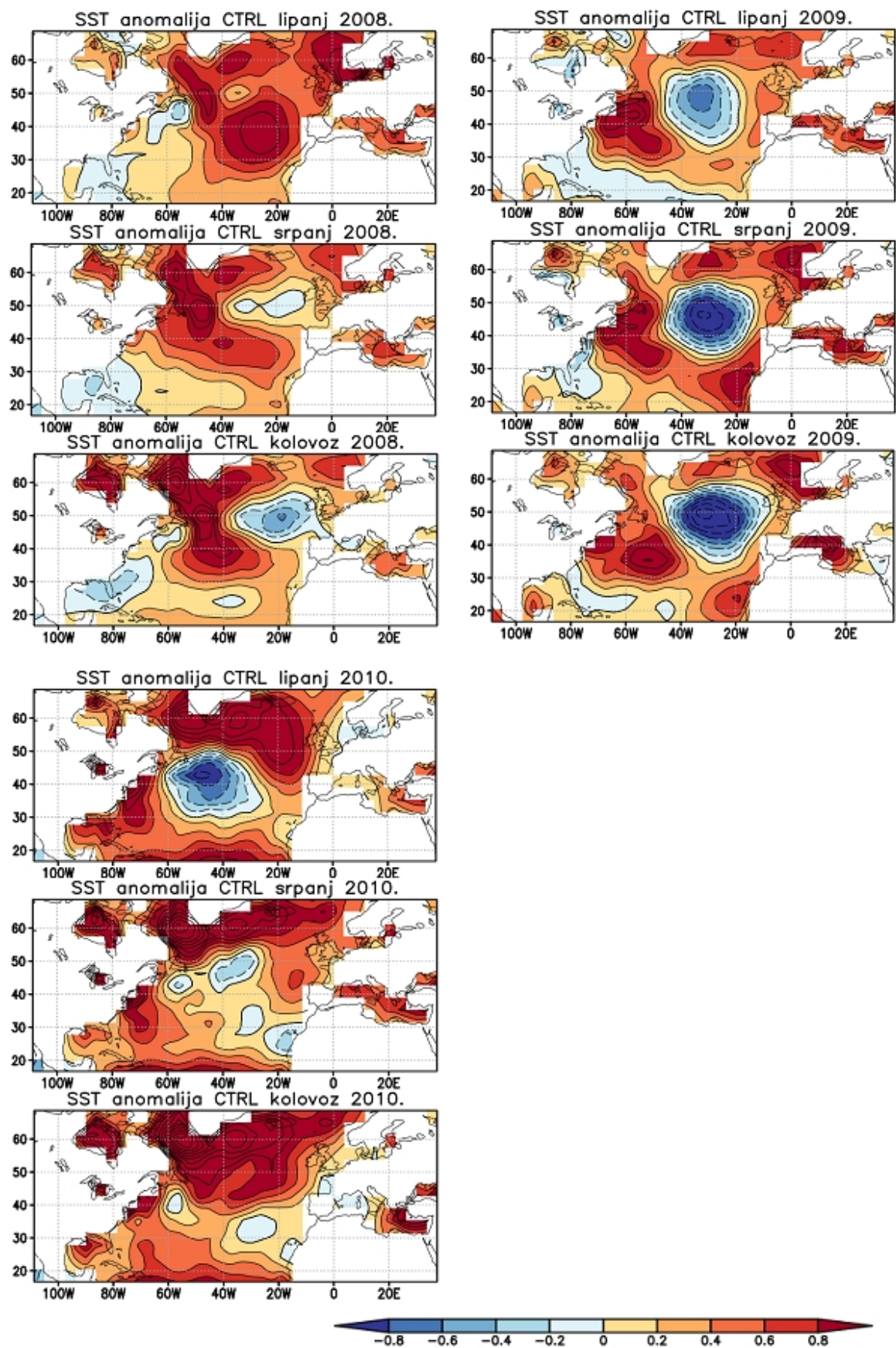
Slika 14. Proletjne (MAM) anomalije SST-a u Sjevernom Atlantskom oceanu.



Slika 14. (nastavak) Proletjne (MAM) anomalije SST-a u Sjevernom Atlantskom oceanu.



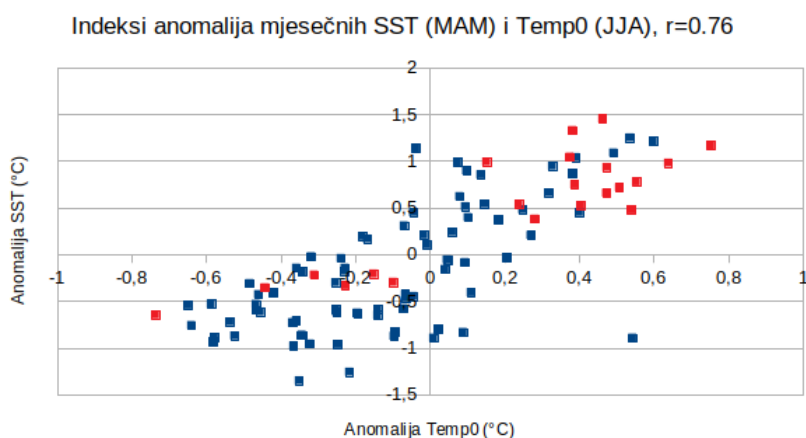
Slika 15. Ljetne (JJA) anomalije SST-a u Sjevernom Atlantskom oceanu.



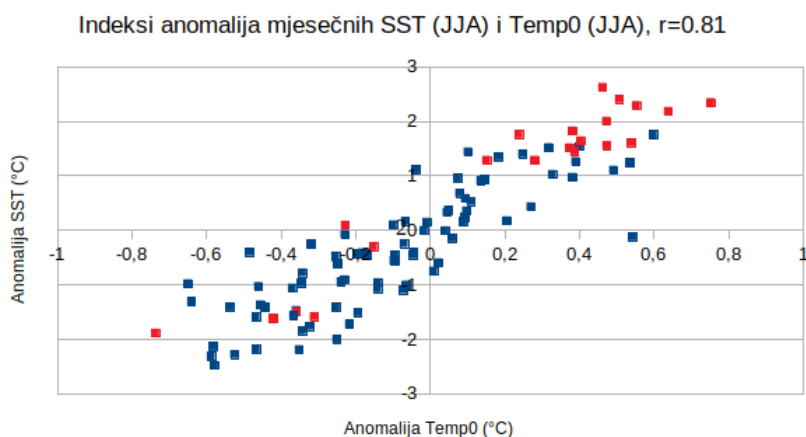
Slika 15. (nastavak) Ljetne (JJA) anomalije SST-a u Sjevernom Atlantskom oceanu.

3.5. Korelacija indeksa SSTA i indeksa anomalija srednjih mjesečnih prizemnih temperatura za Europu

U ovom odjeljku nastoji se proučiti veza proljetnih i ljetnih SSTA u Atlantskom oceanu sa srednjom mjesečnom prizemnom temperaturom u JJA sezoni u Europi. Srednja mjesečna anomalija SST-a površinski je usrednjavana na tri područja u Atlantskom oceanu, u skladu sa područjima pozitivnih i negativnih anomalija koja su diskutirana u prethodnom odjeljku. Korišteni su podaci iz CTRL eksperimenta. U MAM sezoni područja usrednjavanja su: 55-65° N i 60-10° W, 30-50° N i 60-20° W te 20-30° N i 75-30° W. Indeks proljetnog srednjeg mjesečnog SSTA definiran je kao zbroj indeksa dobivenih usrednjavanjem pojedinih područja te je računat za svaki mjesec posebno. Indeks anomalija srednjih mjesečnih vrijednosti prizemnih temperatura za Europu dobiven je površinskim usrednjavanjem anomalija Temp0 na području 70°-35° N i 15° W-45° E, za svaki mjesec JJA sezone. Vrijednosti su računat za svaku godinu iz razdoblja 1978.-2010. Indeks ljetnog srednjeg mjesečnog SSTA određen je na isti način kao i proljetni, s razlikom u području usrednjavanja: 55-70°N i 60-10°W, 30-50°N i 60-30°W te 20-35°N i 60-10°W, kako bi područja anomalija bila bolje obuhvaćena. Indeksi su prikazani na dijagramu raspršenja, indeks anomalije Temp0 na x-osi, a indeks SSTA na y-osi te je izračunat Pearsonov koeficijent korelacije koji u slučaju MAM indeksa SSTA iznosi $r=0.76$ (Slika 16.), dok za JJA indeks SSTA iznosi $r=0.81$ (Slika 17.). Točke koje predstavljaju mjesec toplinskih valova 1978. i 1981. nalaze se u donjem lijevom kvadrantu, dok se točke koje predstavljaju ostale godine nalaze u gornjem desnom kvadrantu, a sve su označene crvenom bojom. Iznosi koeficijenata upućuju na moguću povezanost anomalija SST-a u Atlantskom oceanu u proljeće sa anomalijama Temp0 u nadolazećoj ljetnoj sezoni te se otvara mogućnost sezonske prediktabilnosti pojave i jačine toplinskih valova u Europi.



Slika 16. Dijagram raspršenja MAM indeksa anomalije SST-a i JJA indeksa Temp0 za 1978.-2010.

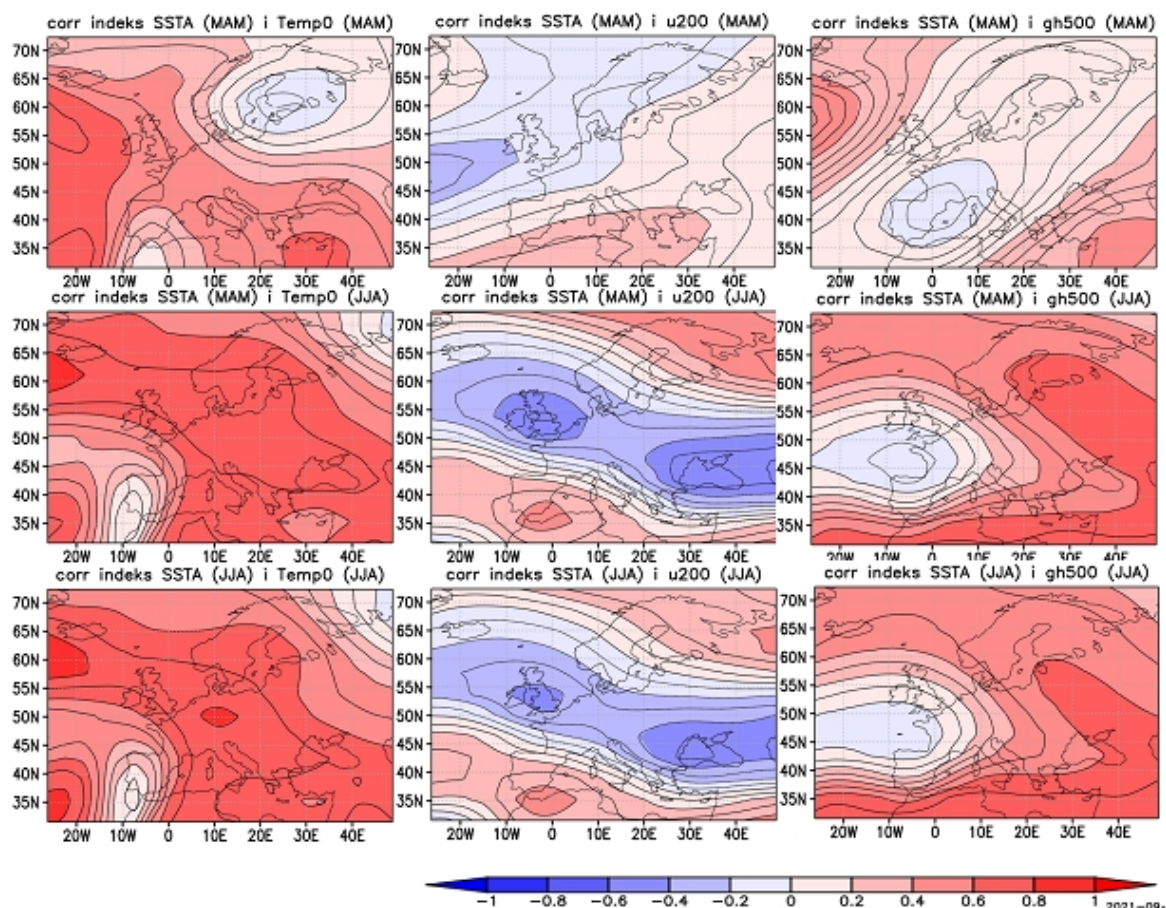


Slika 17. Dijagram raspršenja JJA indeksa anomalije SST-a i JJA indeksa Temp0 za 1978.-2010.

3.6. Korelacijske mape indeksa SSTA sa anomalijama Temp0, u200, gh500 i indeksa HWMId

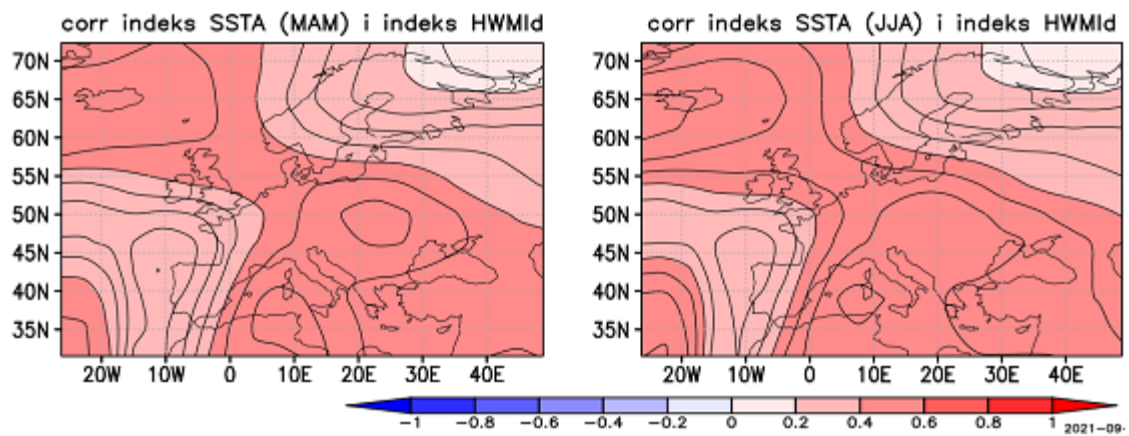
Izrađivanjem korelacijskih mapa istražuje se prostorna povezanost indeksa SSTA u MAM i JJA sezoni sa ranije analiziranim anomalijama meteoroloških polja (Temp0, gh500 i u200) i anomalijama indeksa HWMId, također, u sezonama MAM i JJA, za razdoblje 1978.-2010. Anomalije su određivane u odnosu na razdoblje 1981.-2010., a korišteni su podaci iz CTRL eksperimenta. Korišteni su indeksi SSTA kao u prošlom odjeljku. Korelacijske mape za Temp0, u200 i gh500 prikazane su na Slici 18. Promatrajući MAM-MAM korelaciju indeksa SSTA i anomalije Temp0, u većem dijelu Europe koeficijent korelacije je pozitivan i, uglavnom, veći od +0.4, izuzev područja Baltika gdje iznosi 0 ili -0.1. U slučaju MAM indeksa SSTA i JJA anomalije Temp0, pozitivne vrijednosti koeficijenta korelacije protežu se cijelom Europom, s većim područjem (središnja, sjeverna i jugoistočna Europa) iznosa +0.7 te minimumom od +0.1 nad Pirinejskim poluotokom. Korelacijska mapa obaju JJA vrijednosti slične je raspodjele kao i MAM-JJA, s time da se u središnjoj Europi javlja maksimum od +0.8. Na korelacijskim mapama indeksa SSTA i anomalije gh500 uočava se minimum nad Zapadnom Europom u svim kombinacijama sezona, na MAM-MAM i MAM-JJA korelacijskim mapama to je minimum s vrlo malim negativnim koeficijentom korelacije (-0.05, -0.1), dok je na JJA-JJA mapi iznos minimuma 0.0. U Istočnoj Europi i Sjevernoj Africi iznos koeficijenta korelacije je, osim u MAM-MAM slučaju, 0.6-0.7. Na korelacijskim mapama indeksa SSTA i anomalije u200 u MAM-MAM slučaju nad zapadnim dijelom Europe je polje negativnog koeficijenta korelacije (do -0.2), a nad istočnim dijelom polje pozitivnog koeficijenta (do +0.2). Raspodjela polja u

MAM-JJA i JJA- JJA slučajevima je slična, sa poljem negativnog koeficijenta koje se proteže od sjeverozapada do jugoistoka Europe (-0.4), a polja pozitivnog koeficijenta se nalaze nad jugozapadom i sjeveroistokom Europe (+0.5).



Slika 18. Korelacijske mape indeksa anomalije SST-a i Temp0, u200 i gh500.

Korelacijske mape indeksa SSTA i anomalije indeksa HWMId (Slika 19.) su u potpunosti pozitivnog koeficijenta korelacije, polja u JJA-JJA slučaju zadržavaju sličan oblik kao i u MAM- JJA slučaju te se uočava sličnost raspodjele polja s raspodjelom u slučaju korelacije indeksa SSTA sa anomalijom Temp0, što nije neočekivano jer je indeks HWMId izveden pomoću maksimalne dnevne temperature zraka. Maksimum je smješten u Središnjoj Europi (+0.5), odnosno nad Sredozemljem (+0.55). Na analiziranom uzorku od 33 godine, statistički značajan koeficijent korelacije iznosi 0.35, na razini $p < 0.05$, te se u statističku vezu može dovesti proljetni i ljetni indeks SSTA sa anomalijom indeksa HWMId, čime se otvara mogućnost postojanja sezonske prediktabilnosti ljetnih toplinskih valova na temelju analize proljetnih meteoroloških polja.



Slika 19. Korelacijske mape indeksa anomalije SST-a i indeksa HWMId.

4. Zaključak

Toplinski valovi su razdoblja iznadprosječno vrućeg vremena u toplom dijelu godine koja traju barem nekoliko uzastopnih dana. Budući da su toplinski valovi pojave koje značajno utječu na različite segmente života, a znanstvena istraživanja pokazuju da oni postaju sve učestaliji i intenzivniji uslijed klimatskih promjena, značajan su predmet istraživačkog interesa. Svrha ovog rada bila je proučiti utjecaj površinske temperature Atlantskog oceana na toplinske valove. Korištena su dva ansambla simulacija modelom SPEEDY koji su dobiveni kao rezultat dvaju eksperimenata; CTRL, u kojem postoji međugodišnja varijabilnost površinske temperature mora (SST) te CLIM, gdje su za svaku godinu postavljene klimatološke vrijednosti SST-a.

Prema zadanim kriterijima detektirano je više desetaka toplinskih valova u Europi u razdoblju 1978.-2015., određen je indeks HWMId te su odabrane godine s najvećim indeksima. Primijećen je trend porasta učestalosti i intenziteta toplinskih valova od početka 21. st. u odnosu na prethodno razdoblje. Razlika između eksperimenata CTRL i CLIM je uglavnom u jačini signala.

Nadalje, prema oblicima polja, odabrano je 7 godina za daljnju analizu anomalija meteoroloških polja nad Europom i Atlantskim oceanom. Anomalije su izračunate u odnosu na razdoblje 1981.-2010. Diskutirane su proljetne i ljetne vrijednosti u svrhu eventualnog utjecaja proljetne sezone na ljetne toplinske valove, što bi ukazalo na moguću primjenu sa aspekta sezonske prediktabilnosti. Raspodjela polja srednje mjesečne prizemne temperature se dobro podudara s raspodjelom indeksa HWMId. U odnosu na CTRL, signal u eksperimentu CLIM je nešto slabiji i ponekad prostorno izmješten, što ukazuje na moguću utjecaj međugodišnje varijabilnosti SST-a na intenzitet toplinskih valova. Sličan učinak vidljiv je i u analizi anomalija zonalnog vjetera (u_{200} i u_{850}) te geopotencijala (gh_{500}). Te veličine tvore polja anomalija suprotnih predznaka, a u nekim se situacijama manifestiraju kao jasna dipolna i tripolna polja. U godinama s posebno jakim toplinskim valovima anomalije dosežu najveće apsolutne vrijednosti.

Analizirane su anomalije SST-a u Atlantskom oceanu za sezone MAM i JJA te su uočene dipolna i tripolna polja. Na temelju prostornog položaja tih anomalija, određene su koordinate za površinsko usrednjavanje te je definiran indeks na temelju SSTA-a koji je izračunat za sezone MAM i JJA. Taj je indeks koreliran s ljetnim vrijednostima (JJA)

indeksa Temp0. Dijagrami raspršenja su ukazali na grupiranje podataka te je pretpostavljena linearna veza između tih indeksa. Dobivena je korelacija u iznosu $r=0.76$ za kombinaciju MAM SSTA- JJA Temp0, dok je koeficijent korelacije $r=0.81$ dobiven za kombinaciju JJA SSTA – JJA Temp0, što je statistički značajno na razini $p<0.05$. Ovaj rezultat pokazuje da proljetne SSTA utječu na proljetne temperature nad Europom, ali one imaju i produljen utjecaj na ljetnu sezonu. Ovaj rezultat je važan s aspekta eventualne primjene u sezonskim prognozama jer ukazuje da iznimno visoke temperature Atlantika pogoduju razvoju intenzivnijih toplinskih valova nad Europom.

U ovom radu prikazane su i korelacijske mape koje pokazuju povezanost MAM i JJA indeksa SSTA s MAM i JJA anomalijama Temp0, gh500, u200 i indeksa HWMId. Najveći iznosi koeficijenta korelacije su dobiveni za vezu s SSTA-Temp0 (s iznosom koeficijenta korelacije koji poprima vrijednosti do 0.8 za slučaj JJA-JJA). U potpunosti pozitivna korelacija uočava se na korelacijskoj mapi s SSTA-HWMId, gdje se najveći iznos koeficijenta korelacije postiže na području Središnje i Južne Europe (+0.5). Ovakav rezultat upućuje na moguću vezu proljetnih anomalija SST-a u Atlantskom oceanu sa stvaranjem pogodnih uvjeta za pojavu, dužinu i jačinu ljetnih toplinskih valova u Europi te ukazuje na mogućnost primjene indeksa koji se temelji na anomalijama SST-a u sezonskoj prediktabilnosti toplinskih valova.

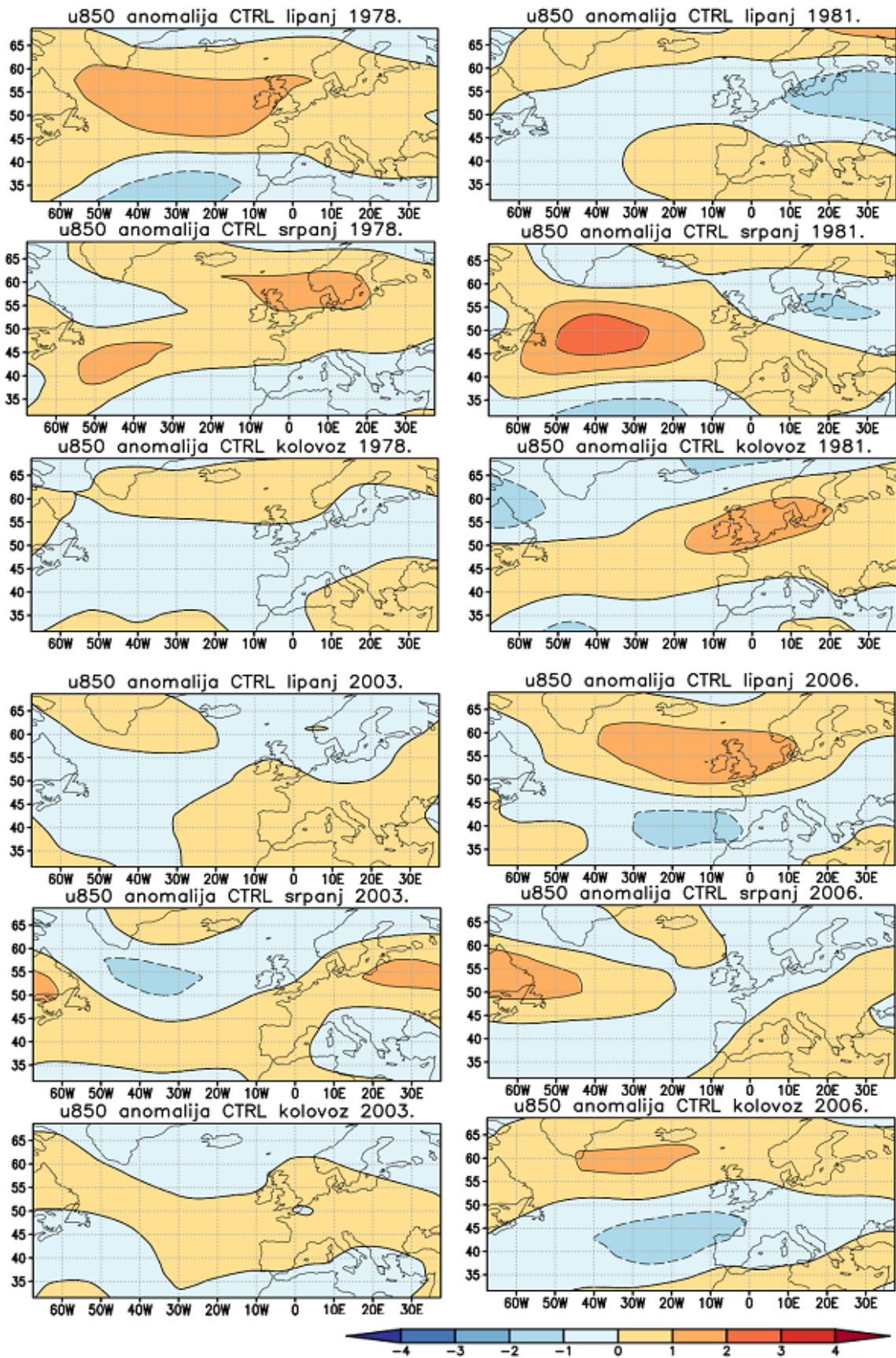
Ovaj je rad pokazao da površinska temperatura Atlantika ima utjecaj na toplinske valove u Europi. Ovaj je rezultat važan s aspekta sezonskih prognoza toplinskih valova, a posebno ako se uzmu u obzir klimatske projekcije budućih klimatskih uvjeta. Pouzdana prognoza pojave intenzivnih valova od velike je važnosti jer su takve situacije povezane sa značajnim materijalnim štetama, a imaju i iznimno nepovoljan utjecaj na ljudsko zdravlje te povećavaju smrtnost. Ovi su rezultati dobiveni na temelju simulacija relativno jednostavnim modelom te bi svakako bilo vrijedno provesti ovakva istraživanja i pomoću složenijih modela kako bi se ispitala robustnost ovih rezultata kao i detaljnije analizirala fizikalna povezanost SST-a i toplinskih valova.

LITERATURA

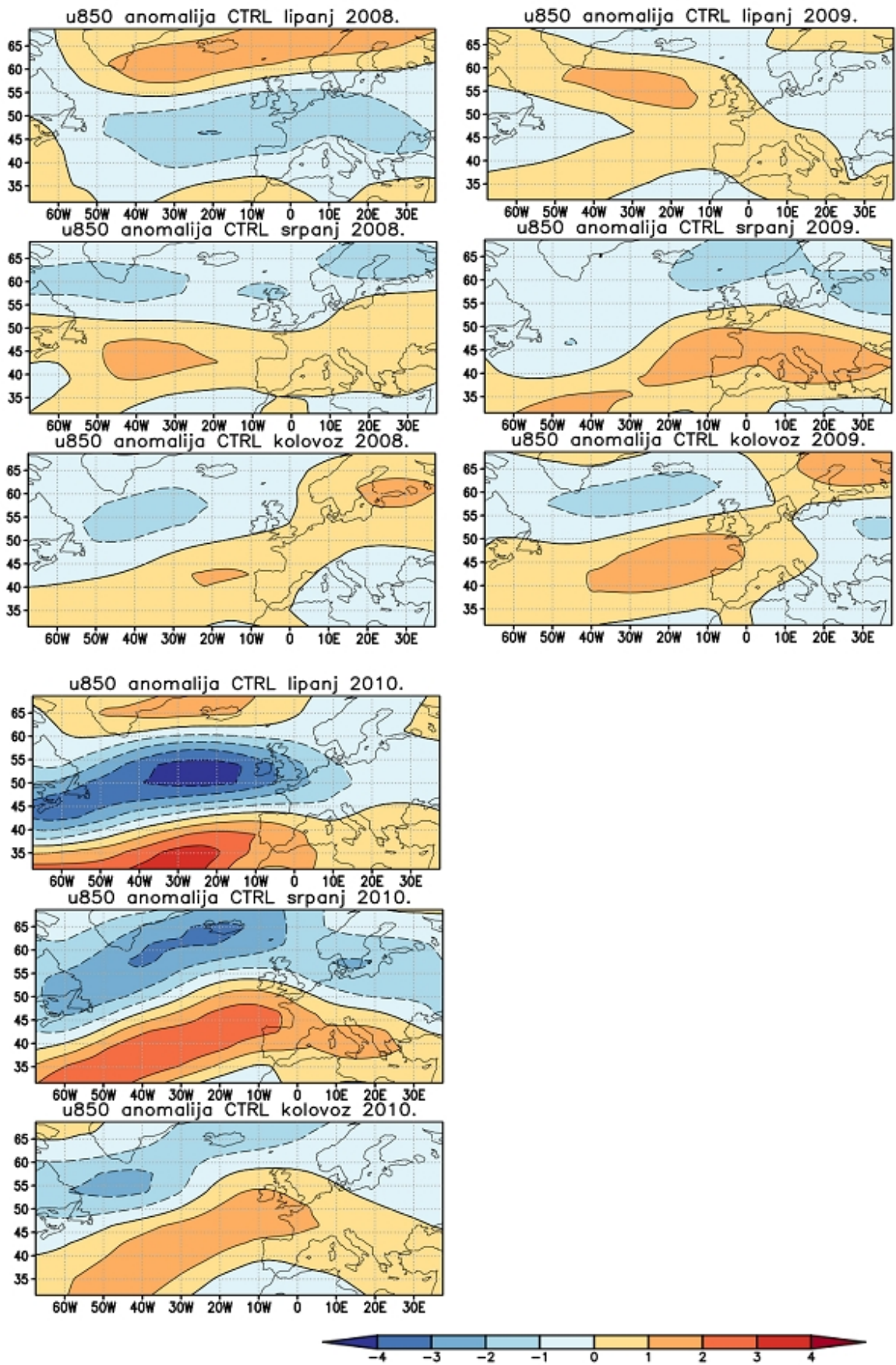
- [1] G.R. McGregor, P. Bessemoulin, K. Ebi and B. Menne. Heatwaves and Health: Guidance on Warning-System Development. World Meteorological Organization (WMO) ; World Health Organization (WHO) - WMO, 2015 (WMO-No. 1142)
- [2] D'Ippoliti, D., Michelozzi, P., Marino, C. *et al.* The impact of heat waves on mortality in 9 European cities: results from EuroHEAT project. *Environ Health* **9**, 37 (2010)
- [3] Shaposhnikov D., Revich B, Bellander T, Bedada GB, Bottai M, Kharkova T, Kvasha E, Lezina E, Lind T, Semutnikova E, Pershagen G. Mortality related to air pollution with the Moscow heat wave and wildfire of 2010. *Epidemiology*. 2014 May; 25(3):359-54.
- [4] Barriopedro, D., Fischer, E.M., Luterbacher, J., Trigo, R.M. and Herrera, G.R. (2011) The Hot Summer of 2010: Redrawing the Temperature Record Map of Europe. *Science* , 332, 220-224.
- [5] World Meteorological Organization Commission for Climatology. 2018. Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/documents/GUIDELINESONTHEDEFINTIONANDMONITORINGOFEXTREMEWEATHERANDCLIMATEEVENTS_09032018.pdf (pristup 5. svibnja 2021.).
- [6] Russo, S., Sillmann, J., Fischer, Erich M. Top ten European heatwaves since 1950 and their occurrence in the coming decades. *Environmental Research Letters* 10 124003 (2015)
- [7] Zhang, R., Sun, C., Zhu, J. *et al.* Increased European heat waves in recent decades in response to shrinking Arctic sea ice and Eurasian snow cover. *npj Clim Atmos Sci* **3**, 7 (2020)
- [8] Hafez, Y. On the Relationship between Heat Waves over the Western and Central Europe and NAO, SOI, El-Nino 3.4 in Summer 2015. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, **5**, 31-45.
- [9] McCarthy, M., Armstrong, L., Armstrong, N. A new heatwave definition for the UK. *Weather*, 74: 382-387. (2019.)
- [10] McCarthy, M., Christidis, N., Dunstone, N., Fereday, D., Kay, G., Klein Tank, A., Lowe, J., Petch, J., Scaife, A. and Stott, P. Drivers of the UK summer heatwave of 2018. *Weather*, 74: 390-396. (2019.)
- [11] García-Herrera, R., Díaz, J., Trigo, R.M., Luterbacher, J. and Fischer, E.M. (2010) A Review of the European Summer Heat Wave of 2003. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 40, 267-306.

- [12] Krüger, J., Pilch Kedzierski, R., Bumke, K., and Matthes, (2010.) K. Impact of North Atlantic SST and Jet Stream anomalies on European Heat Waves. *Weather and Climate Dynamics*. 10.5194/wcd-2020-32.
- [13] Molteni F (2003) Atmospheric simulations using a GCM with simplified physical parametrizations. I. Model climatology and variability in multi-decadal experiments. *Clim Dyn* 20: 175-191
- [14] Kucharski F, Molteni F, and Bracco A (2006) Decadal interactions between the western tropical Pacific and the North Atlantic Oscillation. *Clim Dyn* 26: 79-91
- [15]https://meteo.hr/objave_najave_natjecaji.phpsection=onn¶m=objave&el=priopcenja&daj=pr13062019 (pristup 6. svibnja 2021.)
- [16] Marshall, J., i Plumb, A. R., 2008., *Atmosphere, Ocean, and Climate Dynamics: An Introductory Text*. 1st ed. SAD: Academic Press
- [17] Sutton, R. T. & Hodson, D. L. Atlantic ocean forcing of North American and European summer climate. *Science* 309, 115–118 (2005).

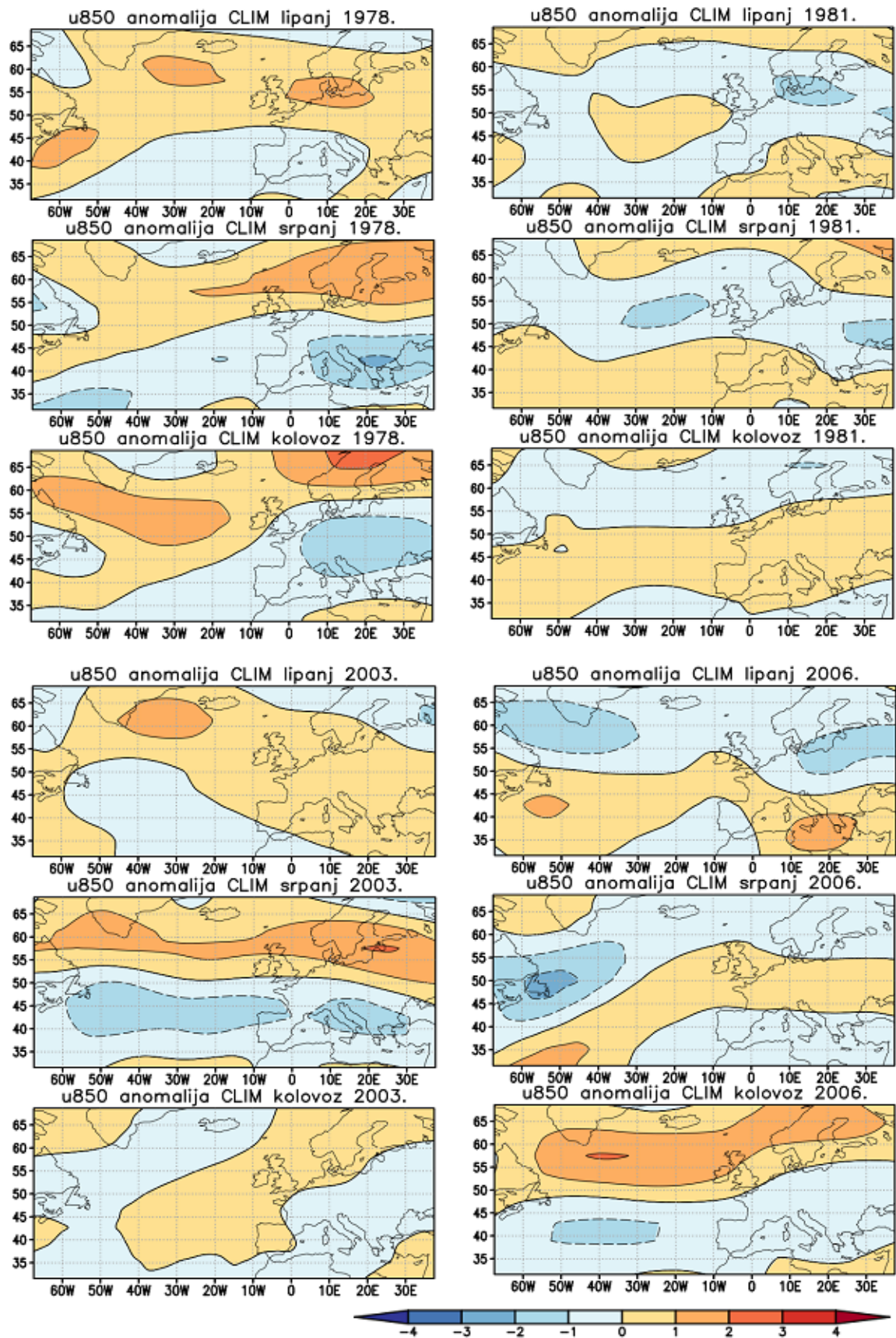
Dodatak A



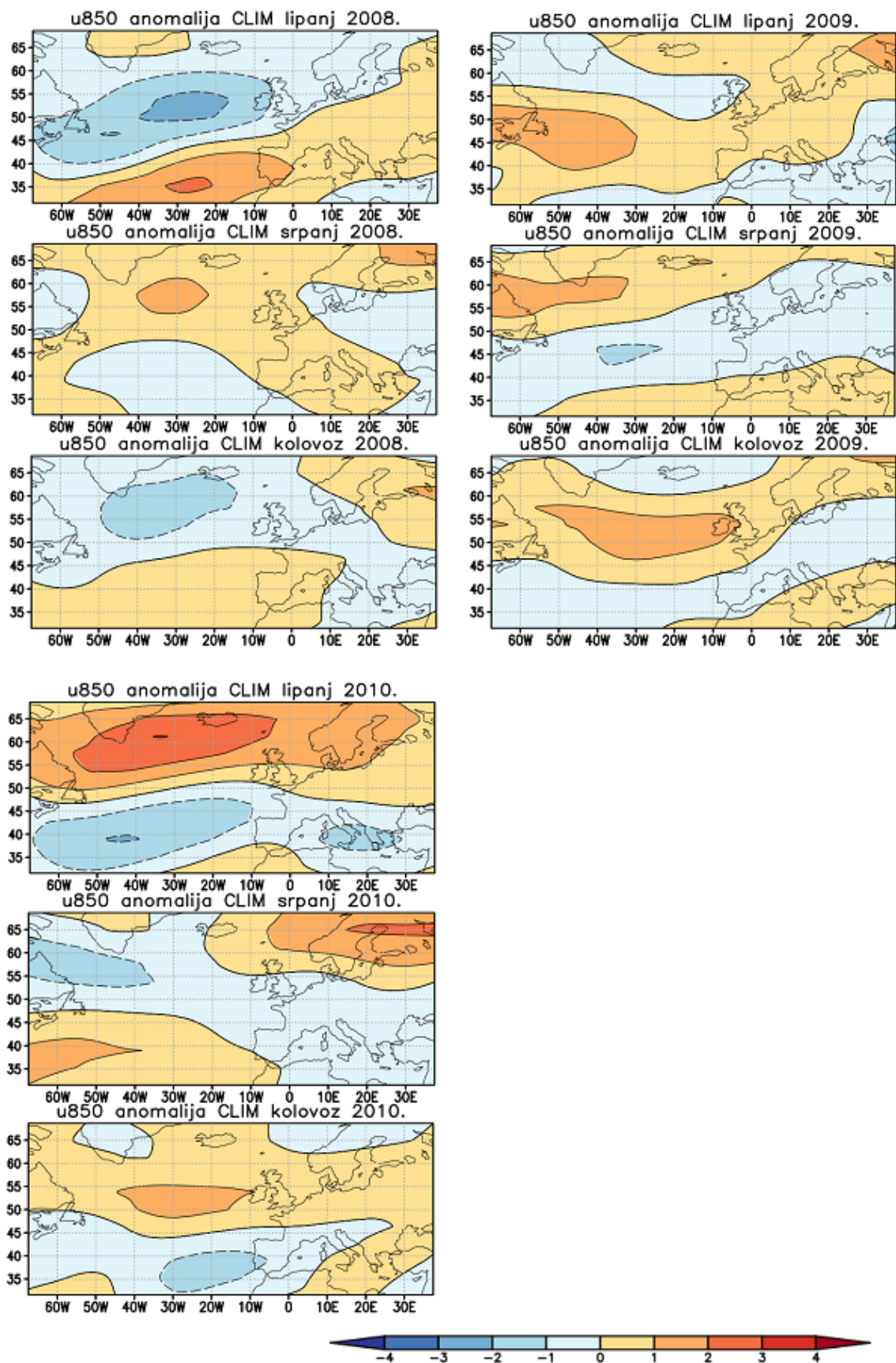
Slika A1. Anomalija u850 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika A1. (nastavak) Anomalija u850 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CTRL.



Slika A2. Anomalija u850 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.



Slika A2. (nastavak) Anomalija u850 u ljetnoj (JJA) sezoni za eksperiment CLIM.