

# Primerjava indeksov Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom

Katarina Kosovelj\*

## Povzetek

Walkerjeva cirkulacija nad Pacifikom je del splošne cirkulacije ozračja v tropih, v zonalni smeri (v smeri vzhod-zahod). Sestavljajo jo vzhodni vetrovi pri tleh, dviganje zraka nad zahodnim Pacifikom, zahodni vetrovi v zgornji plasti troposfere in spuščanje zraka nad vzhodnim Pacifikom. Njena jakost se neprestano spreminja. Dober opis in natančne napovedi jakosti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom so pomembni, ker spremembe v Walkerjevi cirkulaciji vplivajo na klimo po vsem svetu.

Jakost Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom opišemo z različnimi numeričnimi indeksi, ki temeljijo na različnih lastnostih Walkerjeve cirkulacije. V pričujočem članku primerjam deset takšnih indeksov. Primejam njihovo časovno variabilnost in medsebojne korelacije za letna povprečja ter mesečna povprečja, filtrirana za periode daljše ali krajše od 10 let. Poleg tega za letna povprečja primerjam še trende različnih dolžin, s poudarkom na variabilnosti 20-letnih trendov.

Indeksi se med seboj na splošno dobro ujemajo. Korelacije so največje med indeksi, ki temeljijo na fizikalno tesno prepletenih procesih (npr. vetru in horizontalnem gradientu zračnega tlaka). Kratkoročna variabilnost je povezana predvsem z El Niño-Južno oscilacijo (ENSO). Dolgoročno je opazna oscilacija s periodo približno 35 let, ki se ponovi tudi pri 20-letnih trendih, a za njeno natančnejšo oceno bi potrebovali daljši časovni niz podatkov. Jakost trendov Walkerjeve cirkulacije je močno odvisna od izbranega začetnega in končnega leta ter dolžine izbranega časovnega intervala.

**Ključne besede:** splošna cirkulacija ozračja, Walkerjeva cirkulacija nad Pacifikom, indeksi Walkerjeve cirkulacije, podnebne spremembe

**Keywords:** general circulation of the atmosphere, Walker circulation over Pacific, indices of Walker circulation, climate change

## Uvod

Walkerjeva cirkulacija je del splošne cirkulacije ozračja v tropski troposferi, v zonalni smeri (v smeri vzhod-zahod). Sestavljena je iz več med seboj povezanih cirkulacijskih celic nad omejenimi območji, ki obkrožajo Zemljo približno nad Ekvatorjem. Del te cirkulacije je Walkerjeva cirkulacija nad Pacifikom. Sestavljajo jo vzhodni vetrovi pri tleh, dviganje zraka nad zahodnim Pacifikom, zahodni vetrovi v zgornji plasti troposfere in spuščanje zraka nad vzhodnim Pacifikom. Walkerjeva cirkulacija nad Pacifikom je tesno povezana z oceansko cirkulacijo. Vzhodniki potiskajo toplo površinsko vodo proti zahodnemu Pacifiku, kar ustvarja temperaturni gradient med vzhodnim in zahodnim Pacifikom. Topla površina morja namreč greje zrak nad oceanom, hkrati pa pospešuje izhlapevanje. Oboje predstavlja vir energije za konvekcijo (vzgonsko dvigovanje pregretega zraka) nad zahodnim Pacifikom, kar znižuje zračni tlak nad tem območjem. Po drugi strani spuščanje zraka in hladna površina morja nad vzhodnim Pacifikom povečujeta zračni tlak. Gradient zračnega tlaka med vzhodnim in zahodnim Pacifikom pa poganja vzhodne vetrove in hkrati tudi oceanske tokove (e.g. Bjerknes, 1969).

Jakost Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom se neprestano spreminja. Najbolj znana, čeprav še zdaleč ne edina spremenljivost Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom, je El Niño-Južna oscilacija (ang. El Niño-Southern Oscillation – ENSO). ENSO sestavljata oceanski in atmosferski del, pri čemer atmosferski del predstavlja oscilacija v jakosti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom s periodo med tri in sedem let (Peixoto in Oort, 1992).

Spremembe v Walkerjevi cirkulaciji lahko pomembno vplivajo na klimo po vsem svetu. Vplivajo na primer na porazdelitev padavin (npr. Barichivich in sod., 2018), višino gladine morja v tropskem Pacifiku (npr. Merrifield in Maltrud, 2011; Muis in sod., 2018) in hitrost segrevanja ozračja zaradi podnebnih sprememb (npr. Kosaka in Xie, 2013). Zaradi slednjega

\* Univerza v Ljubljani, Fakulteta za matematiko in fiziko

je aktualno tudi vprašanje vpliva globalnega segrevanja ozračja in povečanih izpustov toplogrednih plinov na jakost Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom (npr. Vecchi in sod., 2006; Vecchi in Soden, 2007; Gastineau in sod., 2009; Ma in sod., 2012; DiNezio in sod., 2013; Kosaka in Xie, 2013; Bayr in sod., 2014; He in sod., 2014 in mnoge druge študije). Pri tem pa prihaja do razhajanja med klimatskimi modeli, ki večinoma napovedujejo slabitev Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom (npr. Knutson in Manabe, 1995; Vecchi in sod., 2006; Vecchi in Soden, 2007; Gastineau in sod., 2009; Bayr in sod., 2014) ter meritvami in opazovanji, ki večinoma kažejo krepitev Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom v zadnjih nekaj desetletjih (npr. Sohn in Park, 2010, Luo in sod., 2012; Meng in sod., 2012; Sohn in sod., 2013; L'Heureux in sod., 2013; Sandeep in sod., 2014; Chung in sod., 2019). Razlog za razhajanja ni povsem znan. V literaturi se pojavlja nekaj različnih možnosti: večdesetletna variabilnost, ki je modeli ne opišejo dobro (npr. Chung in sod., 2019; Wu in sod., 2021), vpliv zunanjih dejavnikov, na primer dogajanja v oceanih ali vulkanski izbruhi (npr. Orihuela-Pinto in sod., 2022; Mann in sod., 2021) in sistematične napake (bias) v klimatskih modelih (npr. Seager in sod., 2019; Wills in sod., 2022).

Jakost Walkerjeve cirkulacije pogosto opisujemo z različnimi numeričnimi indeksi, ki temeljijo na različnih lastnostih Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom. Med najbolj uporabljanimi indeksi so indeksi, ki temeljijo na razliki v zračnem tlaku pri tleh med vzhodnim in zahodnim Pacifikom (npr. Vecchi in sod., 2006), razliki med hitrostjo dviganja zraka nad zahodnim Pacifikom in spuščanja zraka nad vzhodnim Pacifikom (npr. Wang, 2002), divergentnem iztoku zraka na vrhu konvekcije (npr. Tanaka in sod., 2004), tokovni funkciji v Walkerjevi cirkulacijski celici nad Pacifikom (npr. Yu in Zwiers, 2010; Bayr in sod., 2014). Obstajajo pa še mnogi drugi. Takšni indeksi omogočajo izračun trendov v jakosti Walkerjeve cirkulacije. Da trendi, izračunani za različne podatkovne nize in različne časovne intervale, ne bodo dali enakih rezultatov, je pričakovano. Nekaj študij, ki so primerjale različne indekse na istih podatkih, pa je pokazalo, da tudi različni indeksi na istih podatkih ne dajo rezultatov, ki bi omogočali nesporne zaključke glede spreminjanja jakosti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom (L'Heureux in sod., 2013; Plesca in sod., 2018; Chung in sod., 2019). Takšne študije so redke in primerjajo zgolj nekaj indeksov. Zaradi različnih uporabljenih podatkov in časovnih intervalov pa so med seboj slabo primerljive. S tem člankom želim zapolniti to vrzel in primerjati narediti primerjavo indeksov na primerljivih podatkih in enakih časovnih intervalih, podobno kot so naredili npr. Pikovnik in sod. (2022) za Hadleyevo cirkulacijo (cirkulacijo v tropski troposferi v smeri sever-jug).

Pričujoči članek je dopolnitev članka Kosovelj in sod. (2023). Cilj obeh člankov je sistematična primerjava desetih različnih indeksov Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom, za obdobje 1950-2021. V Kosovelj in sod. (2023) primerjamo izključno letna povprečja indeksov in njihove trende za časovne intervale različnih dolžin. V tem članku pa se natančneje posvetim mesečnim povprečjem, njihovim frekvenčnim spektrom ter korelacijam njihovih časovnih nizov s periodami do 10 let in nad 10 let. Pri trendih ostanem na letnih povprečjih, a si natančneje ogledam variabilnosti 20-letnih trendov.

## **Metodologija**

### Opis indeksov

V članku sem med seboj primerjala 10 indeksov Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom:

1. Indeks Južne oscilacije (ang. Southern Oscillation Index – SOI), definiran kot razlika anomalij v zračnem tlaku med Tahitijem (osrednji Pacifik) in Darwinom (severna Avstralija), normirana s standarnim odklonom te razlike za vsak mesec v letu posebej (Troup, 1965). Anomalije so tu definirane kot odmik povprečnega mesečnega zračnega tlaka od večletnega povprečja za dani mesec. V tem članku sem povprečevala preko obdobja 1950-2021. Ker sem imela podatke na geografski mreži,

sem računala s podatki iz Darwinu in Tahitiju najbližjih točk. Preverila sem, da se tako izračunani indeks bistveno ne razlikuje od indeksa izračunanega iz meritev (rezultati tu niso prikazani).

Ta indeks temelji na gradientu zračnega tlaka med osrednjim in zahodnim tropskim Pacifikom in tako pravzaprav meri silo, ki poganja vzhodnike pri tleh.

2. Indeks Južne oscilacije, kot so ga definirali Vecchi in sod. (2006). Definiran je kot razlika med anomalijami v zračnem tlaku na srednji morski gladini med dvema območjema, prvim nad zahodnim (80°E - 160°E) in drugim nad vzhodnim (80°W - 160°W) tropskim Pacifikom. Obe območji se raztezata med 5°S in 5°N. Ta indeks sem poimenovala  $\Delta$ SLP (iz ang. sea-level pressure – SLP). Enako kot SOI tudi  $\Delta$ SLP indeks meri Walkerjevo cirkulacijo nad Pacifikom preko gradienta zračnega tlaka pri tleh.
3. Indeks na podlagi temperature morske gladine (ang. sea-surface temperature – SST) sem definirala enako kot  $\Delta$ SLP, le da sem namesto zračnega tlaka na srednji gladini morja uporabila temperaturo morske gladine. SST indeks meri jakost Walkerjeve cirkulacije preko zonalnega gradienta temperature in, tako kot oba tlačna indeksa, preko procesov, ki Walkerjevo cirkulacijo poganjajo.
4. Povprečen zonalni veter nad osrednjim tropskim Pacifikom ( $U_{ave}$ ). Tu sem uporabila definicijo iz Chung in sod. (2019) in povprečila veter na 10 m nad tlemi na območju med 180° in 150°W ter med 6°S in 6°N. Ta indeks meri jakost Walkerjeve cirkulacije preko hitrosti zonalnega vetra pri tleh, oz. preko spodnje veje Walkerjeve cirkulacije.
5. Napetost zaradi vertikalnega striženja horizontalnega vetra v prizemni plasti (ang. wind stress), zonalno integrirana preko tropskega Pacifika ( $L_\tau$ ), kot sta jo definirala Clarke in Lebedev (1996):
 
$$L_\tau = \int_0^L \overline{\tau}_x dx, \quad (1)$$
 kjer je  $\overline{\tau}_x$  napetost zaradi vertikalnega striženja horizontalnega vetra v prizemni plasti, povprečena med 5°S in 5°N, integriram pa med 124°E in 90°W.  $\overline{\tau}_x$  sem izračunala po “standardni” formuli (Clarke in Lebedev, 1996):
 
$$\tau_x = \rho_a C_D |\mathbf{V}| u, \quad (2)$$
 kjer je  $\rho_a$  gostota zraka (1,2 kg/m<sup>3</sup>),  $C_D$  koeficient upora ( $1,5 \cdot 10^{-3}$ ),  $\mathbf{V}$  vektor horizontalnega vetra na višini 10 m ( $\mathbf{V} = (u, v)$ ). Tudi ta indeks meri jakost Walkerjeve cirkulacije preko dogajanja v njeni spodnji veji.
6. Indeks vertikalne hitrosti na 500 hPa ( $\omega_{500}$ ) iz Wang (2002), definiran kot razlika povprečnih anomalij v vertikalni tlačni hitrosti ( $\omega = dp/dt$ ) na 500 hPa med vzhodnim (120°W – 160°W) in zahodnim (120°E – 160°E) tropskim Pacifikom (5°S – 5°N). Ta indeks meri jakost Walkerjeve cirkulacije preko razlike v hitrosti dviganja in spuščanja zraka na vzhodnem in zahodnem robu Walkerjeve celice.
7. Indeks na podlagi hitrostnega potenciala ( $\chi$ ), ki so ga v njegovi originalni verziji definirali Tanaka in sod. (2004).

Hitrostni potencial predstavlja divergentni del toka tekočine na horizontalni ploskvi, v meteorologiji pogosto na ploskvi konstantnega tlaka. Definiran je s Poissonovo enačbo:

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = -\nabla^2 \chi \quad (3)$$

Originalna definicija indeksa ( $\chi_{200}$ ) je sledeča: 12-mesečno drseče povprečje (po absolutni vrednosti) največjega odstopanja hitrostnega potenciala od njegovega zonalnega povprečja nad tropskim Pacifikom na 200 hPa (80°E – 80°W in 25°S – 25°N).

Ideja tega indeksa je, da meri hitrost divergentnega iztoka zraka na vrhu konvektivnega dviganja, v zgornji troposferi. Tam naj bi bila hitrost divergentnega iztoka največja. Kot kažejo rezultati (glej poglavje Rezultati), pa se maksimalne vrednosti indeksa  $\chi$  in pojavljajo na okrog 150 hPa. Poleg tega višina maksimalnega iztoka časovno nekoliko variira. Zato sem raje uporabila prilagojen indeks, ki za vsak mesec posebej vzame največjo hitrost iztoka na območju med 100 in 250 hPa ( $\chi_{\max}$ ). Podoben indeks, ki se prilagaja glede na podatke so za tokovno funkcijo uporabili Zaplotnik in sod. (2022) pri študiji Hadleyeve cirkulacije.

8. Indeks na podlagi tokovne funkcije ( $\psi$ ). Masno tokovno funkcijo definiram podobno kot Yu in Zwiers (2010) ter Bayr in sod. (2014):

$$\psi(p) = \frac{2\pi a}{g} \int_0^p u_D dp, \quad (4)$$

kjer je  $a$  polmer Zemlje,  $g$  težni pospešek in  $u_D$  divergentni del zonalnega vetra, povprečen med 5°S in 5°N. Takšna tokovna funkcija opisuje tokovnice v zonalno-vertikalni ravnini in posledično cirkulacijsko celico Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom. Maksimum tokovne funkcije je v srednji troposferi, zato je indeks originalno definiran kot maksimum tokovne funkcije na 500 hPa ( $\psi_{500}^{\text{div}}$ ).

Argument za izračun masne tokovne funkcije iz divergentnega vetra je, da nas zanima del cirkulacije, ki je v veliki meri posledica diabatnih procesov (segrevanja in dviganja zraka zaradi tople površine morja in zaradi kondenzacije vodne pare), zaradi česar naj bi bil odziv vetra predvsem divergenten. Po drugi strani pa je že dolgo znano, da je brezdivergentni del odziva na diabatno gretje pri tleh v tropskih območjih ravno tako pomemben kot divergentni del (npr. Gill, 1980). Izkazalo se je, da tudi pri indeksu Walkerjeve cirkulacije na podlagi tokovne funkcije brezdivergentnega dela vetra ne smemo kar tako zanemariti (glej Rezultate), zato sem v članku večinoma uporabljala indeks, definiran enako kot  $\psi_{500}^{\text{div}}$ , le da sem namesto divergentne komponente vetra uporabila celotni zonalni veter ( $\psi_{500}$ ).

9. Indeks, temelječ na specifični vlažnosti v zgornji troposferi, na 200 hPa ( $Q_{200}$ ), na podlagi Sohn in sod. (2013). Indeks sem definirala kot razliko v povprečni specifični vlažnosti na 200 hPa med območjema v vzhodnem (120°W – 160°W, 5°S – 5°N) in zahodnem (120°E – 160°E, 5°S – 5°N) Pacifiku.

Vir vlage v zgornji troposferi je vertikalni transport vlage s konvekcijo. Indeks na podlagi specifične vlažnosti v zgornji troposferi tako meri jakost Walkerjeve cirkulacije posredno, saj privzame, da je količina vlage v zgornji troposferi neposredna posledica jakosti vertikalnega transporta, oz. konvekcije nad zahodnim Pacifikom. Indeks sem definirala kot razliko med vzhodnim in zahodnim delom Walkerjeve celice nad Pacifikom, da bi izločila termodinamske razloge za povečanje vlažnosti, saj pričakujemo, da se bo s segrevanjem ozračja na splošno povečala količina vlage v zraku.

10. Efektivni veter za transport vlage ( $V_e$ ) na podlagi Sohn in Park (2010). Efektivni veter za transport vlage je definiran kot:

$$V_e = \sum_{i=1}^N \frac{PW(i)}{TPW} V_D(i), \quad (5)$$

kjer je  $PW(i)$  voda, ki je na voljo za padavine (ang. precipitable water), v vertikalni plasti med  $i$ -to in naslednjo tlačno ploskvijo,  $TPW$  je vsa voda, ki je na voljo v nekem vertikalnem stolpcu (ang. total precipitable water),  $V_D(i)$  pa je horizontalni divergentni veter na  $i$ -ti tlačni ploskvi. Seštevamo po tlačnih ploskvah, od tal navzgor skozi spodnjo troposfero. Ker sem imela podatke šele od 1000 hPa navzgor, sem seštevata od 1000 do 850 hPa.

Vodo, ki je na voljo za padavine ( $PW(i)$ ), izračunamo kot:

$$PW(i) = \frac{1}{\rho_w g} \int_{p_i}^{p_{i+1}} q(p) dp, \quad (6)$$

kjer je  $\rho_w$  gostota vode,  $g$  težni pospešek in  $q(p)$  specifična vlažnost. Integralske meje,  $p_i$  in  $p_{i+1}$ , predstavljajo meje posamezne vertikalne plasti. Celotna voda, ki je v stolpcu na voljo za padavine se izračuna enako, le da, namesto po posamezni plasti, integriramo od tal do vrha atmosfere.

Ker me je tu zanimala zgolj zonalna cirkulacija, sem računala samo z zonalno komponento divergentnega vetra ( $u_D$ ), indeks pa sem definirala kot povprečje zonalne komponente efektivnega vetra za transport vlage na območju med  $120^\circ E - 120^\circ W$  in  $5^\circ S - 5^\circ N$ .

S tem indeksom povežemo dve komponenti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom. Prva so vzhodni vetrovi pri tleh, ki so sami po sebi del Walkerjeve cirkulacije. Druga pa je transport vlage s temi vetrovi od vzhodnega proti zahodnemu Pacifiku, kjer kondenzacija prinese vodne pare dovaja energijo za konvektivno dviganje zraka in s tem pomaga poganjati Walkerjevo cirkulacijo.

Opisani indeksi temeljijo na različnih lastnostih Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom in tako nudijo različne poglede na jakost te cirkulacije. Poleg tega pa na indekse vplivajo še drugi procesi, predvsem Monsunska in Hadleyeva cirkulacija (Held in Soden, 2006). Na indekse, povezane z vlago, lahko vpliva povečevanje količine vodne pare v zraku zaradi globalnega segrevanja ozračja, na indeks na podlagi SST pa lahko vplivajo še procesi v oceanu. Težava se lahko pojavi tudi pri SOI indeksu, izračunanem iz dveh posameznih točk, saj na zračni tlak lahko vplivajo naključni lokalni procesi in lokalne mikroklimatske značilnosti, pri uporabi meritev na dveh postajah pa še sistematične merske napake. To težavo odpravljajo indeksi, izračunani na podlagi povprečij preko večjih območij, saj naj bi s povprečenjem odstranili lokalne anomalije in ohranili zgolj procese na večjih prostorskih skalah.

Ker imajo opisani indeksi različne fizikalne enote in se po numeričnih vrednostih med seboj lahko močno razlikujejo, sem v nadaljevanju primerjala normalizirane indekse – vsakemu indeksu je bilo odšteto njegovo povprečje, nato je bil še normiran s svojim standardnim odklonom.

## Podatki

Indekse sem računala iz reanalize. Reanalize so rekonstrukcije vremena za pretekla obdobja, izračunane z najmodernejšimi numeričnimi modeli za napovedovanje vremena, v katere ciklično asimiliramo meritve. So najboljši opis preteklega vremena, kar ga imamo na voljo.

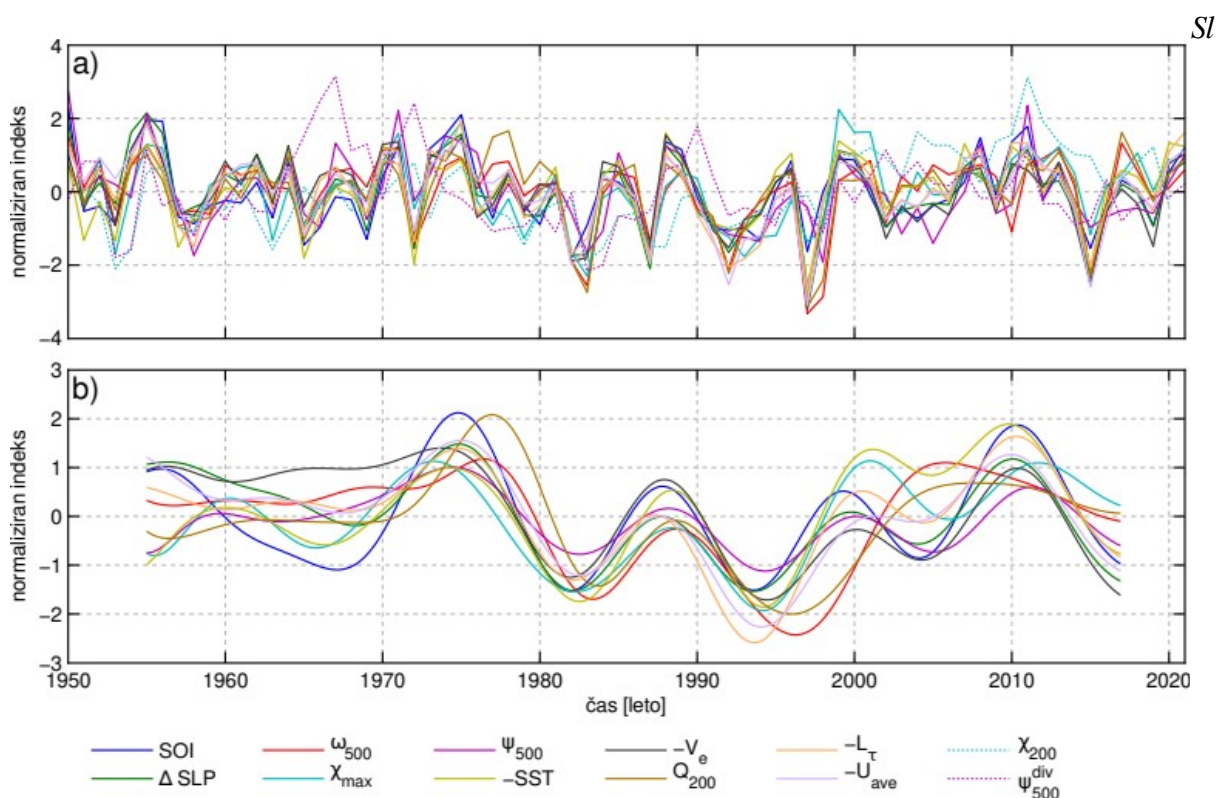
Za izračun indeksov sem uporabila reanalizo ERA5 Evropskega centra za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF; Hersbach in sod., 2020). Večino količin (tlačna vertikalna hitrost  $\omega$ , vetrovi, specifična vlažnost  $q$ ) sem snela iz arhiva Climate Data Store na pravilni horizontalni mreži z resolucijo  $1^\circ$  in 27 vertikalnih nivojih med 1000 in 100 hPa.

SST, vetrovi na 10 m in zračni tlak na srednji gladini morja (ang. mean-sea level pressure - MSLP) so na enaki horizontalni mreži. Računala sem z mesečnimi povprečji, izračunanimi iz dnevni povprečij, razen pri horizontalnih vetrovih sem mesečna povprečja izračunala iz podatkov ob 00 UTC. Pri tem sem na primeru  $\omega_{500}$  indeksa preverila, da takšna odločitev nima pomembnega vpliva na rezultat (rezultati primerjave v clanku niso prikazani).

## Rezultati

### Časovni nizi in njihove korelacije

Slika 1a prikazuje časovni niz letnih povprečij indeksov Walkerjeve cirkulacije. Indeksi se večinoma precej dobro ujemajo med seboj, večina jih se jih tudi ujema glede časovnih pojavov največjih minimumov v letih 1972, 1982/83, 1987, 1992, 1997/98 in 2015. Ti minimumi so povezani z El niño fazo El niño-Južne oscilacije (ENSO), obdobja oslabiljene Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom in zmanjšane gradienta SST med vzhodnim in zahodnim Pacifikom. Ker El niño vpliva na vreme globalno, je zelo zaželeno, da so indeksi zmožni pravilno ločiti obdobja z El niñom od ostalih obdobj. Obdobja La niña faze ENSO, oz. obdobja močnejše Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom in večjega gradienta SST, so manj očitna, saj so razpotežena preko večih let.

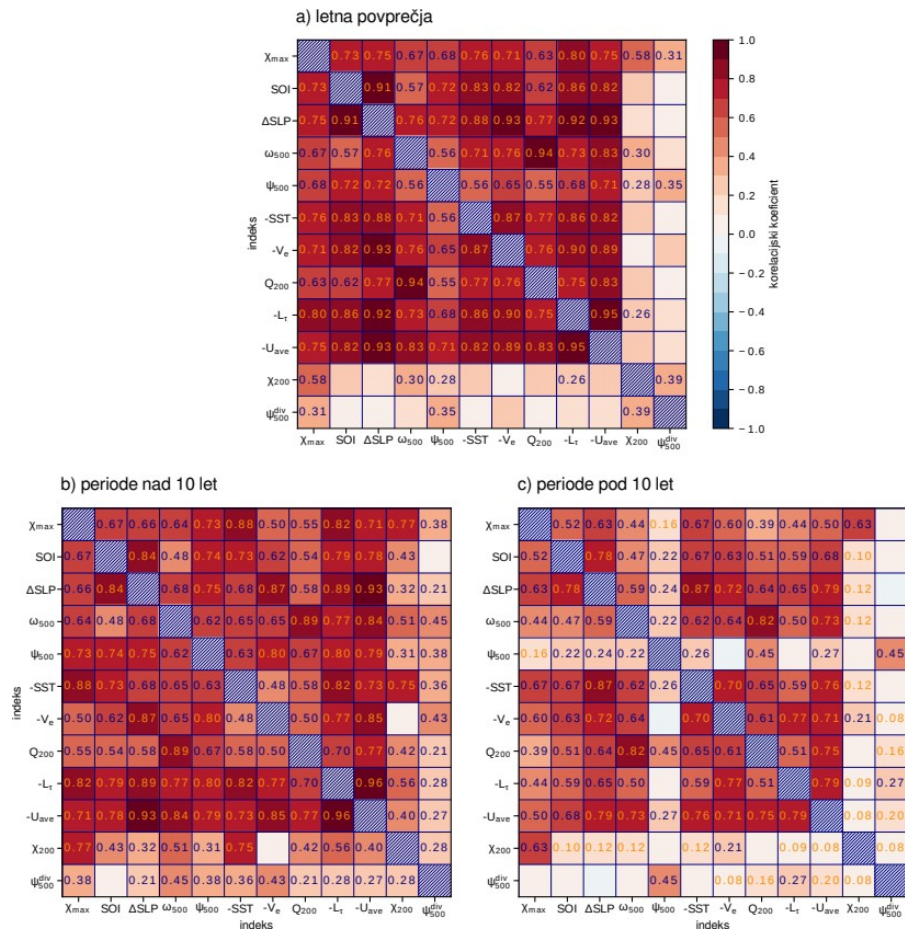


Slika 1: Časovne vrste normaliziranih indeksov Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom. a) letna povprečja, b) mesečni podatki, filtrirani z Butterworthovim filtrom šestega reda, ki prepušča le periode, daljše od približno 10 let. Nekateri indeksi so pomnoženi z (-1) za lažjo primerjavo z ostalimi indeksi.

Na sliki 2a so predstavljene še korelacije med posameznimi indeksi. Pričakujemo, da bodo korelacije med posameznimi indeksi različne, ker indeksi temeljijo na različnih vidikih Walkerjeve cirkulacije. Korelacije so višje med indeksi, ki temeljijo na fizikalno povezanih

procesih. Tako je najvišja korelacija, 0,95, med  $U_{ave}$  in  $L_{\tau}$ , indeksoma temelječima na vzhodnih spodnje troposfere. Naslednja po velikosti (0,94) je korelacija med indeksoma  $\omega_{500}$  in  $Q$ , kjer je količina vlage v zgornji troposferi (opisana s  $Q$ ) odvisna od njenega transporta s konvektivnim dviganjem (opisanim z  $\omega_{500}$ ). Večje od 0,90 so še korelacije med tlačnim indeksom  $\Delta SLP$  in indeksi temelječimi na vetru v spodnji troposferi ( $V_e$ ,  $L_{\tau}$  in  $U_{ave}$ ), kjer tlačni gradient poganja vetrove, ter med obema tlačnima indeksoma ( $SOI$  in  $\Delta SLP$ ), ki opisujeta tlačni gradient pri tleh na dva malo različna načina.

Korelacije med manj povezanimi procesi so manjše. Takšni primeri so korelacije med tlačnim gradientom ( $SOI$ ) in vertikalnimi gibanji ( $\omega_{500}$ ) ter večina korelacij s tokovno funkcijo ( $\psi_{500}$ ).



Slika 2: korelacijski koeficienti med posameznimi indeksi. Statistično značilni indeksi (s stopnjo zaupanja 95%) so izpisani s številko. Za lažjo primerjavo z ostalimi indeksi so nekateri indeksi pomnoženi z (-1).

Če mesečna povprečja filtriramo z Butterworthovim filtrom šestega reda, ki prepušča oscilacije nad približno 10-letno periodo se lahko posebej posvetimo ujemanju indeksov za dogajanje na časovnih skalah nad 10 let. Slika 1b prikazuje tako filtrirane časovne vrste indeksov. Opazi se, da se v primerjavi z letnimi podatki, ujemanje med indeksi malo poslabša. Indeksi se večinoma strinjajo glede minimumov v začetku 80. let in sredi 90. let. Poleg oscilacije s periodo med 11 in 12 let, je nakazana tudi multidekadna oscilacija s periodo okrog 35 let. Prva perioda bi lahko bila povezana z 11-letnim ciklom sončeve aktivnosti, a različne študije, ki so preučevale možno povezavo med jakostjo sončeve aktivnosti in Walkerjevo cirkulacijo, so dale nasprotno si zaključke (npr. van Loon in sod., 2007; Roy in Haigh, 2012; Misios in sod., 2019; Roy, 2021). Druga, približno 35-letna

oscilacija bi lahko bila povezana z 40-60-letno oscilacijo v temperaturi površine morja na Pacifiku, imenovano Interdecadal Pacific Oscillation (IPO, npr. Latif in sod., 1997; Dong in Dai, 2015). Da je vpliv IPO na Walkerjevo cirkulacijo možen, so že pokazali v nekaj študijah (npr. England in sod., 2014; Kosaka in Xie, 2013). Žal pa je moj časovni niz prekratek, da bi lahko potrdila, ali gre za zgolj enkratno oscilacijo, ali se takšne oscilacije pojavljajo tudi na dolgi rok.

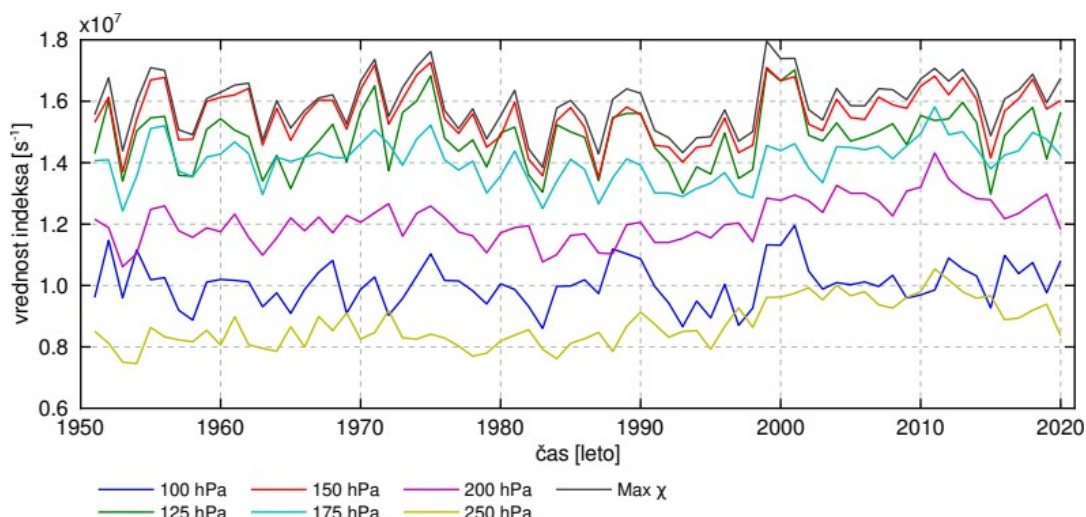
Slabše ujemanje se opazi tudi pri korelacijah (slika 2b), ki so večinoma nižje kot pri letnih povprečjih. Najvišja korelacija ostane med  $U_{ave}$  in  $L_{\tau}$ , 0,96. Visoke ostanejo korelacije med indeksi na osnovi zonalnega vetra in tlačnimi indeksi, med indeksi na osnovi zonalnega vetra in  $\omega$  ter med  $\omega$  in indeksi, povezanimi z vlažnostjo. Kljub temu je edina preostala korelacija nad 0,90 med  $U_{ave}$  in  $\Delta SLP$ .

Mesečna povprečja filtrirana z Butterworthovim filtrom šestega reda, ki prepušča oscilacije s periodo krajšo od približno 10 let (slika ni prikazana), imajo precej slabša ujemanja kot pri filtru, ki prepušča daljše periode. FFT analiza pokaže, da ima večina indeksov najmočnejše zastopane oscilacije s periodo približno 3,5 let, kar je zelo verjetno signal ENSO. Tudi korelacije med posameznimi indeksi (slika 2c) so nižje kot pri dolgih periodah, saj korelacijski koeficient za noben par indeksov ne preseže 0,90. Najmočnejše korelirana (0,87) sta indeksa  $\Delta SLP$  in SST, ki temeljita na procesih, ki poganjajo Walkerjevo cirkulacijo nad Pacifikom. Sledi pa že znani par  $\omega_{500}$  in Q, s korelacijskim koeficientom 0,82. Najslabše je z drugimi indeksi povezan indeks  $\psi_{500}$ , čeprav je ravno  $\psi_{500}$  indeks, ki naj bi predstavljal celotno Walkerjevo cirkulacijsko celico nad Pacifikom.

Na sliki 1a sta prikazana tudi časovna poteka originalnih  $\chi_{200}$  in  $\psi_{500}^{div}$  indeksov. Oba se močno razlikujeta od ostalih indeksov in imata težave s prepoznavanjem obdobij z El niño fazo ENSO. Pri tem imata oba indeksa tudi nizke in večinoma statistično neznačilne korelacije z ostalimi indeksi tako za letna povprečja (slika 2a), kot za filtrirane podatke s periodami pod 10 let (slika 2c). Korelacije z ostalimi indeksi so nekoliko boljše za filtrirane podatke s periodami nad 10 let (slika 2b), a še vedno večinoma pod 0,50. So pa te korelacije povečini vsaj statistično značilne.

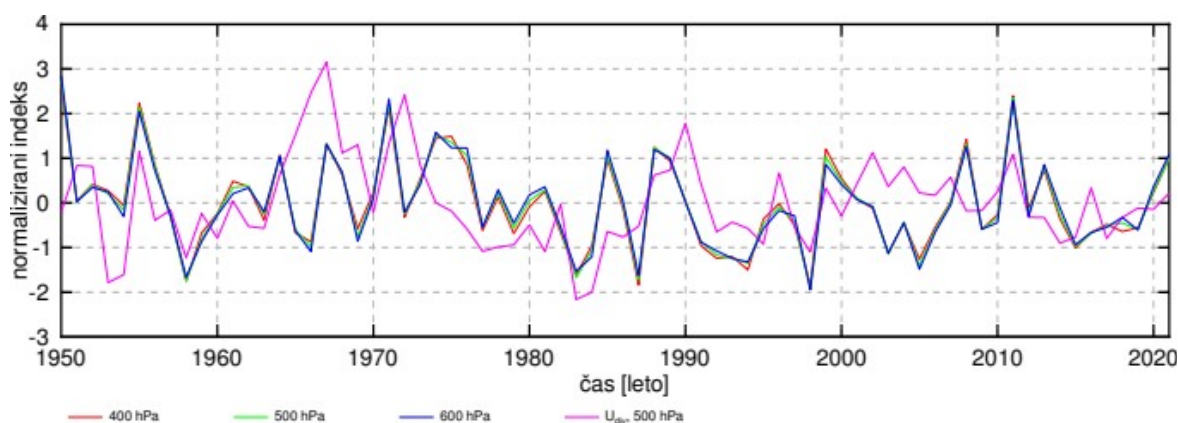
Originalni indeks na podlagi hitrostnega potenciala ( $\chi_{200}$ ) ima po letu 2000 precej višje vrednosti od ostalih indeksov. Slika 3 prikazuje odvisnost vrednosti indeksa  $\chi$  od tlačne ploskve, na kateri je izračunan. Jasno se vidi, da so maksimalne vrednosti večinoma na 150 hPa, kar pomeni, da je največji divergentni iztok iz območja konvektivnega dviganja večinoma blizu 150 hPa, 200 hPa ploskev pa je še precej pod tem maksimumom in tako ni najbolj primerna za definicijo indeksa, s katerim želimo opisovati maksimum. Za izračun indeksa bi bila tako primernejša ploskev 150 hPa. Ker pa maksimum iztoka ni vedno na 150 hPa in ker pričakujemo, da se lahko z globalnim segrevanjem troposfera odebeli in posledično nivo maksimalnega divergentnega vertikalnega iztoka dvigne (Seidel in Randel, 2006, Lin in sod., 2017), je primerneje, da se indeks ne definira na fiksni tlačni ploskvi, temveč se upošteva opisano spremenljivost. Zato sem indeks raje definirala kot maksimalno vrednost iztoka na vertikalnem intervalu med 250 in 100 hPa ( $\chi_{max}$ ). Takšen indeks je zelo močno koreliran z indeksom, definiranim na 150 hPa (koeficient korelacije je 0,98). Tudi z ostalimi indeksi Walkerjeve cirkulacije je indeks  $\chi_{max}$  bistveno bolje koreliran kot originalni indeks ( $\chi_{200}$ ), tako za letna povprečja, kot za filtrirane podatke (slika 2).





Slika 3: Časovne vrste  $\chi$  indeksa v odvisnosti od vertikalnega nivoja. (Prirejeno po: Kosovelj in sod., 2023)

Indeks na podlagi masne tokovne funkcije, izračunan iz divergentnega vetra ( $\psi_{500}^{\text{div}}$ ) od ostalih indeksov najbolj odstopa v 60. in 70. letih, v obdobju pred uvedbo satelitskih meritev atmosfere. Kvalitativno je moja časovna vrsta letnih povprečij podobna vrsti, predstavljeni v Yu in Zwiers (2010), kar potrjuje, da ne gre za napako v izračunu, temveč za slabo definiran indeks. Slika 4 tu razkrije, da tokrat ni težava v močni vertikalni spremenljivosti maksimuma tokovne funkcije in s tem indeksa. Razlika v časovnem razvoju indeksa je namreč precej večja med indeksom, izračunanim iz celotnega zonalnega vetra ( $\psi_{500}$ ) in indeksom, izračunanim zgolj iz divergentne komponente zonalnega vetra ( $\psi_{500}^{\text{div}}$ ), kot med enako definiranim indeksom na različnih tlačnih nivojih. Ker se indeks, izračunan iz celotnega zonalnega vetra veliko bolje ujema z ostalimi indeksi, kot indeks, izračunan iz divergentnega zonalnega vetra (sliki 1, 2), je to jasen znak, da gre tu za manjkajočo brezdivergentno komponento vetra, ki je očitno ne smemo kar tako zanemariti.



Slika 4: Časovni nizi normaliziranega  $\psi$  indeksa v odvisnosti od vertikalne ploskve, na kateri je indeks definiran.  $U_{\text{div}}$  označuje indeks, izračunan iz divergentnega vetra. (Prirejeno po: Kosovelj in sod., 2023)

## Trendi

Slika 5 prikazuje trende različnih dolžin, z različnimi začetnimi in končnimi leti obdobj, za katere izračunavamo trende. Na sliki se lepo ločijo tri območja. Prvo predstavlja trende z

začetkom v 50. letih in koncem v 70. letih. Ti trendi so večinoma pozitivni, kar kaže na krepitev Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom, a so večinoma statistično neznačilni. Drugo območje predstavljajo trendi z začetkom med 1960 in 1980 ter koncem okrog 2010. Ti trendi so večinoma negativni in za nekatere indekse statistično značilni. Nakazujejo na slabitev Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom. Tretje območje obsega trende z začetkom med približno 1980 in drugo polovico 90. let, ne glede na končno leto. V tem obdobju so trendi spet večinoma pozitivni, pri vseh indeksih nekaj je vsaj nekaj trendov statistično značilnih. Poleg teh treh območij sta pomembni še dve. V zgornjem desnem kotu so trendi negativni pri skoraj vseh indeksih, kar ponovno nakazuje na slabenje Walkerjeve cirkulacije v zadnjih dobrih 20 letih, a ti trendi statistično niso značilni.

Če na sliki 5 pogledamo diagonalo med spodnjim levim in zgornjim desnim kotom, pa lahko spremljamo spreminjanje 20-letnih trendov s časom, kar je posebej narisano na sliki 6. Vsi indeksi jasno kažejo oscilacije s periodo približno 35 let, opažene na sliki 1b. To potrjuje, da oscilacija s periodo približno 35 let v filtriranih mesečnih povprečjih ni zgolj artefakt filtriranja samega, ampak je dejansko prisotna v podatkih. Točno periodo te oscilacije je težko določiti, saj je, zaradi njene dolžine, ki v primeru 20-letnih trendov obsega večji del dolžine podatkovnega niza, ne moremo izluščiti s pomočjo FFT metode. Zaradi močne zašumljenosti pa odpove tudi metoda prilagajanja krivulje. Pri študiju te oscilacije v trendih pa je potrebna previdnost tudi zaradi pogosto statistično neznačilnih trendov.

## Zaključki

V članku primerjam deset indeksov Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom, ki temeljijo na različnih fizikalnih procesih, ki so del Walkerjeve cirkulacije, njena posledica, ali pa to cirkulacijo poganjajo. Primerjam časovne vrste indeksov, njihove medsebojne korelacije in trende. Preverim tudi občutljivost trendov različnih dolžin na njihovo začetno in končno leto.

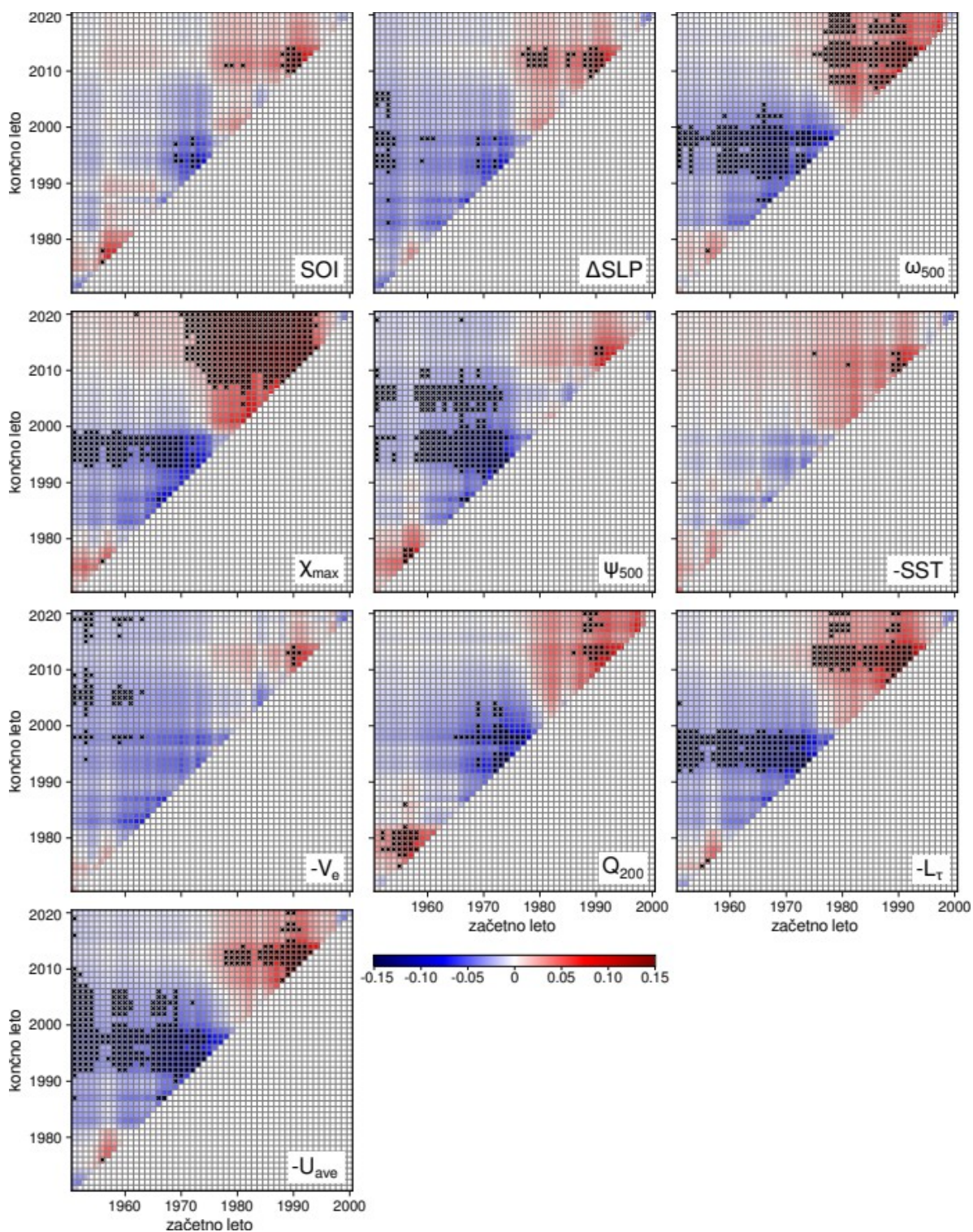
Na splošno se indeksi dobro ujemajo med seboj. Korelacijski koeficienti so zelo visoki med fizikalno sorodnimi indeksi (vertikalna hitrost in vlažnost v zgornji troposferi ter tlak in veter pri tleh), malo nižji, čeprav še zmeraj visoki, pa med indeksi, temelječimi na manj povezanih procesih (npr. zračni tlak pri tleh in vlažnost v zgornji troposferi).

Podobne rezultate dobim za letna povprečja in za filtrirane podatke s časovno skalo nad 10 let. Pri slednjih je ujemanje malo slabše, kar se kaže tudi v malo nižjih korelacijah med indeksi. Pri časovnih nizih filtriranih podatkov za periode daljše od 10 let je zanimiva oscilacija s periodo okrog 35 let. Oscilacija z enako periodo se opazi tudi, ko opazujemo 20-letne trende z različnimi (zaporednimi) začetnimi leti. Kaj je v ozadju te oscilacije, je težko natančno ugotoviti, časovno je najbližje multidekadna oscilacija v temperaturi površja morja na Pacifiku (IPO), s periodo 40-60 let. Študirano 70-letno obdobje (1951-2020) je prekratko za natančnejšo študijo oscilacije s takšno periodo. Poleg tega tudi 20-letni trendi večinoma niso statistično značilni. Vsekakor pa bi bila zanimiva natančnejša študija te oscilacije na daljšem časovnem intervalu. Pri periodah, krajših od 10 let, je ujemanje med indeksi najslabše, najmočnejše pa pri večini indeksov izstopajo periode blizu ENSO.

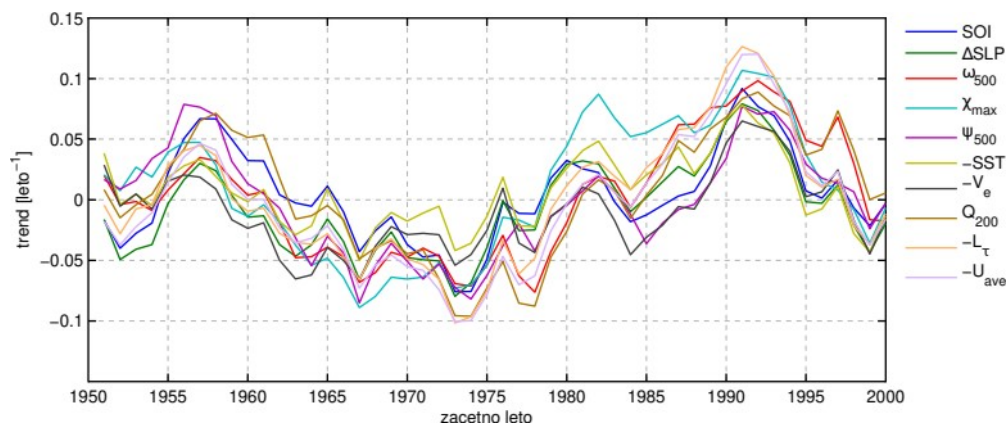
Posebej je potrebno izpostaviti originalna indeksa  $\chi_{200}$  (Tanaka in sod., 2005) in  $\psi_{500}^{div}$  (Yu in Zwiers, 2010; Bayr in sod., 2014), saj se slabo ujemata z ostalimi indeksi. Prvi je definiran prenizko v atmosferi, precej pod maksimalnim iztokom zraka iz konvekcije, ki se zgodi na okoli 150 hPa. Drugemu manjka brezdivergentni del, ki očitno pomembno prispeva k pravilnemu opisu WC. Bolje se izkažeta indeksa  $\chi_{max}$ , ki išče maksimum iztoka iz konvekcije preko širše vertikalne plasti, in  $\psi_{500}$ , ki upošteva tudi brezdivergentni del cirkulacije.

Trendi so zelo odvisni od tega, med katerimi leti/obdobji jih računamo, večina izračunanih trendov pa tudi ni statistično značilnih. Večina indeksov za daljše časovno obdobje (npr. z začetkom med 1950 in 1960 ter koncem okrog 2020) trendov praktično nima. V zadnjih dvajsetih letih pa so trendi večinoma negativni, kar bi lahko pomenilo slabitev WC in hitrejše globalno segrevanje. Na podlagi rezultatov tega članka glede

občutljivosti trendov na začetno in končno leto pa svetujem previdnost pri primerjavi in navajanju trendov iz literature, saj različne študije navajajo trende za različna časovna obdobja.



Slika 5: Trendi jakosti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom kot funkcija začetnega ( $x$  os) in končnega ( $y$  os) leta za različne indekse [v  $\text{leto}^{-1}$ ]. Trendi, krajši od 20 let niso prikazani. S križci so označeni statistično značilni trendi (s stopnjo zaupanja 95 %). Nekateri indeksi so zaradi lažje primerjave z ostalimi indeksi pomnoženi z (-1). Posamezne izstopajoče črte izrazitejših (ali manj izrazitih) trendov na grafih so posledica ENSO. (Vir: Kosovelj in sod., 2023)



Slika 6: Evolucija 20-letnih trendov v jakosti Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom za različne indekse. Za lažjo primerjavo z drugimi indeksi, so nekateri pomnoženi z (-1).

V tem članku sem pokazala, da skoraj vsi indeksi primerno opišejo časovno spremenljivost Walkerjeve cirkulacije nad Pacifikom, tako za letna povprečja, kot za filtrirane mesečne podatke za daljše časovne skale. Večje odstopanje med indeksi je se pojavi pri filtriranih podatkih za krajše periode, še posebej med indeksi temelječimi manj povezanih fizikalnih procesih. Za bolj zanesljive nadaljne študije spremenljivosti Walkerjeve cirkulacije zato vseeno priporočam uporabo večih različnih indeksov hkrati, da se hkrati zaobjame več različnih vidikov Walkerjeve cirkulacije.

## Literatura

- Bjerknes, J. (1969). Atmospheric Teleconnections from the Equatorial Pacific, *Monthly Weather Review* 97, 163-172.
- Peixoto, J. P. in Oort, A. H. (1992). *Physics of climate*. American institute of physics.
- Vecchi, G. in sod. (2006). Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing, *Nature* 441, 73-76.
- Vecchi, G. in Soden, B. (2007). Global warming and the weakening of the tropical circulation, *Journal of Climate* 20, 4316-4340.
- Gastineau, G. in sod. (2009). The Hadley and Walker circulation changes in global warming conditions described by idealized atmospheric simulations, *Journal of Climate* 22, 3993-4013.
- Ma, J. in sod. (2012). Mechanisms for tropical tropospheric circulation change in response to global warming, *Journal of Climate* 25, 2979-2994.
- DiNezio, P. in sod. (2013). Detectability of changes in the walker circulation in response to global warming, *Journal of Climate* 26, 4038-4048.
- Kosaka, Y. in Xie, S. (2013). Recent global-warming hiatus tied to equatorial Pacific surface cooling, *Nature* 501, 403-407.
- Bayr, T. in sod. (2014). The eastward shift of the Walker Circulation in response to global warming and its relationship to ENSO variability, *Climate Dynamics* 43, 2747-2763.
- He, J. in sod. (2014). The robustness of the atmospheric circulation and precipitation response to future anthropogenic surface warming, *Geophysical Research Letters* 41, 2614-2622.
- Knutson, T. in Manabe, S. (1995). Time-Mean Response over the Tropical Pacific to Increased CO<sub>2</sub> in a Coupled Ocean-Atmosphere Model, *Journal of Climate* 8, 2181-2199.
- Sohn, B. in Park, S. (2010). Strengthened tropical circulations in past three decades inferred from water vapor transport, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 115, D15112.

- Sohn, B. in sod. (2013). Observational evidences of Walker circulation change over the last 30 years contrasting with GCM results, *Climate Dynamics* 40, 1721-1732.
- Luo, J. in sod. (2012). Indian Ocean warming modulates Pacific climate change, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 109, 18701-18706.
- Meng, Q. in sod. (2012). Twentieth century Walker Circulation change: Data analysis and model experiments, *Climate Dynamics* 38, 1757-1773.
- L'Heureux, M. in sod. (2013). Recent multidecadal strengthening of the Walker circulation across the tropical Pacific, *Nature Climate Change* 3, 571-576.
- Sandeep, S. in sod. (2014). Pacific Walker Circulation variability in coupled and uncoupled climate models, *Climate Dynamics* 43, 103-117.
- Chung, E. in sod. (2019). Reconciling opposing Walker circulation trends in observations and model projections, *Nature Climate Change* 9, 405-412.
- Wu, M. in sod. (2021). A very likely weakening of Pacific Walker Circulation in constrained near-future projections, *Nature Communications* 12, 6502.
- Orihuela-Pinto, B. in sod. (2022). Interbasin and interhemispheric impacts of a collapsed Atlantic Overturning Circulation, *Nature Climate Change* 12, 558-565.
- Mann, M. in sod. (2021). Multidecadal climate oscillations during the past millennium driven by volcanic forcing, *Science* 317, 1014-1019.
- Wills, R. in sod. (2022). Systematic Climate Model Biases in the Large-Scale Patterns of Recent Sea-Surface Temperature and Sea-Level Pressure Change, *Geophysical Research Letters* 49, e2022GL100011
- Barichivich, J. in sod. (2018). Recent intensification of Amazon flooding extremes driven by strengthened Walker circulation, *Science advances* 4, eaat8785.
- Merrifield, M. in Maltrud, M. (2011). Regional sea level trends due to a Pacific trade wind intensification, *Geophysical Research Letters* 38, L21605.
- Muis, S. in sod. (2018). Influence of El Niño-Southern Oscillation on Global Coastal Flooding, *Earth's Future* 6, 1311-1322.
- Wang, C. (2002). Atmospheric Circulation Cells Associated with the El Niño-Southern Oscillation, *Journal of Climate* 15, 399-419.
- Tanaka, H., Ishizaki, N. in Kitoh, A. (2004). Trend and interannual variability of Walker, monsoon and Hadley circulations defined by velocity potential in the upper troposphere, *Tellus A* 56, 250-269.
- Yu, B. in Zwiers, F. (2010). Changes in equatorial atmospheric zonal circulations in recent decades, *Geophysical Research Letters* 37, L05701.
- Plesca, E. in sod. (2018). How robust is the weakening of the Pacific Walker circulation in CMIP5 idealized transient climate simulations?, *Journal of Climate* 31, 81-97.
- Pikovnik, M. In sod. (2022). Metrics of the Hadley circulation strength and associated circulation trends, *Weather and Climate Dynamics*, 3, 625-644.
- Kosovelj, K. in sod. (2023). Indices of Pacific Walker Circulation strength: trends, correlations and uncertainty, *poslano v Climate Dynamics*.
- Troup, A. J. (1965). The 'southern oscillation', *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 91, 490-506.
- Clarke, A. in Lebedev, A. (1996). Long-Term Changes in the Equatorial Pacific Trade Winds, *Journal of Climate* 9, 1020-1029.
- Zaplotnik in sod. (2022). Recent Hadley Circulation Strengthening: A Trend or Multidecadal Variability? *Journal of Climate*, 35, 4157-4176.
- Held, I. M. in Soden, B. J. (2006). Robust Responses of the Hydrological Cycle to Global Warming, *Journal of Climate*, 19, 5686-5699.
- Gill, A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 106, 447-462.

- Hersbach, H. in sod. (2020). The ERA5 global reanalysis, *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 146, 1999-2049.
- van Loon, H. in sod. (2007). Coupled air-sea response to solar forcing in the Pacific region during northern winter, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 112, D02108.
- Roy, I. in Haigh, J. (2012). Solar cycle signals in the Pacific and the issue of timings, *Journal of the Atmospheric Sciences* 69, 1446-1451.
- Misios, S. in sod. (2019). Slowdown of the Walker circulation at solar cycle maximum, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 116, 7186-7191.
- Roy, I. (2021). Is it always slowdown of the Walker circulation at solar cycle maximum? *Natural Hazards* 107, 2021-2026.
- Latif, M. in sod. (1997). Greenhouse Warming, Decadal Variability, or El Niño? An Attempt to Understand the Anomalous 1990s, *Journal of Climate* 10, 2221-2239.
- Dong, B. in Dai, A. (2015). The influence of the Interdecadal Pacific Oscillation on Temperature and Precipitation over the Globe, *Climate Dynamics* 45, 2667-2681.
- England, M. in sod. (2014). Recent intensification of wind-driven circulation in the Pacific and the ongoing warming hiatus, *Nature Climate Change* 4, 222-227.
- Seidel, D. in Randel, W. (2006). Variability and trends in the global tropopause estimated from radiosonde data, *Journal of Geophysical Research Atmospheres* 111, D21101.
- Lin, P. in sod. (2017). Changes of the Tropical Tropopause Layer under Global Warming, *Journal of Climate* 30, 1245-1258.
- Yue, S. In Wang, C. (2002). Applicability of prewhitening to eliminate the influence of serial correlation on the Mann-Kendall test, *Water Resources Research* 38, 4-1 – 4-7.
- Hussain, M. in Mahmud, I. (2019). pyMannKendall: a python package for non parametric Mann Kendall family of trend tests, *Journal of Open Source Software* 4, 1556.