

# Dekompozicija prispevkov k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije

Matic Pikovnik\*, Žiga Zaplotnik\*

## Povzetek

Hadleyjeva cirkulacija (HC) je zonalno simetričen del tropske cirkulacije. Opisuje dve zaključeni cirkulacijski zanki (Hadleyjevi celici), ki vključujeta dviganje zraka v ekvatorialnih predelih, raztekanje v zgornji troposferi proti severnim in južnim subtropskim predelom, spuščanje zraka v subtropih ter stekanje s pasatnimi vetrovi nazaj k ekvatorju. Posledično HC določa tudi tipičen transport vlage v spodnji troposferi preko subtropskih oceanov k ekvatorju in tako vpliva na porazdelitev količine padavin, s tem pa tudi na razporeditev rastja in poselitvena območja na Zemlji. Morebitne spremembe v meridionalni razsežnosti in intenzivnosti HC bi lahko tako pomembno vplivale na zemeljsko biosfero. Zonalno povprečeno HC opišemo s tokovno funkcijo v meridionalno-vertikalni ravnini, intenzivnost HC pa je definirana kot povprečje tokovne funkcije na območju dotične HC. V študiji analiziramo intenzivnost HC v modernih reanalizah ERA5 in ERA-Interim Evropskega centra za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF) v obdobju 1979-2018. Z reševanjem Kuo-Eliassenove enačbe za tokovno funkcijo nato poiščemo tiste fizikalne procese, ki v povprečju največ prispevajo k intenzivnosti zonalno in letno povprečene HC. Analiza pokaže, da ima glavni prispevek k skupni intenzivnosti HC meridionalni gradient diabatnega gretja, v spodnji troposferi pa je zelo pomemben prispevek trenja, medtem ko je glavni prispevek meridionalnih pretokov toplote in gibalne količine z vrtinci omejen na zgornjo troposfero izven ekvatorialnega območja.

**Ključne besede:** Hadleyjeva cirkulacija, Hadleyjeva celica, tokovna funkcija, reanaliza ERA5, Kuo-Eliassenova enačba, diabatno gretje, trenje, meridionalni pretok toplote/gibalne količine z vrtinci

**Keywords:** Hadley circulation, Hadley cell, stream function, ERA5 reanalysis, Kuo-Eliassen equation, diabatic heating, friction, meridional eddy heat/momentum flux

## Uvod

Glavni vir energije in toplote na Zemlji je sončno sevanje. Povprečno letno sončno sevanje je po površju Zemlje neenakomerno porazdeljeno. Najbolj je odvisno od vpadnega kota sončnega sevanja, torej od geografske širine, deloma pa tudi od porazdelitve oblačnosti. Največ sončne energije prejmejo tropski in subtropski predeli, najmanj pa polarni predeli. Razlike v ogrevanju ozračja med tropskimi in polarnimi predeli privedejo do meridionalnega transporta toplote v smeri od tropov proti poloma. Ta transport poteka pretežno s splošno cirkulacijo ozračja, delno pa s tokovi v oceanih. Če Zemlja ne bi bila vrteč se sistem ali pa bi se vrtela zadosti počasi, bi transport toplote v meridionalni smeri od ekvatorja proti poloma potekal direktno – z le eno cirkulacijsko celico na vsaki polobli. Celici bi se stikali ob ekvatorju, vključevali pa bi dviganje zraka ob ekvatorju, prenos toplote v zgornji troposferi proti polarnim predelom, spuščanje v polarnih predelih ter stekanje v spodnjih plasteh ozračja nazaj k ekvatorju (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Ker pa se Zemlja vrti okoli svoje osi, na njej pravokotno na smer gibanja deluje tudi t. i. sistemska Coriolisova sila, ki

---

\* UL, Fakulteta za matematiko in fiziko, Jadranska ul. 19, Ljubljana

posamezen gibajoč delec zraka odklanja na severni polobli v desno in na južni polobli v levo. Posledično je meridionalna dimenzija obeh celic omejena – namesto v polarnih predelih pride do spuščanja zraka že v subtropskih predelih, od tam pa se zrak s pasatnimi vetrovi steka proti ekvatorju in zaključuje t. i. Hadleyjevi celici, ki skupaj tvorita Hadleyjevo cirkulacijo (HC). V tropskih predelih, kjer se zrak dviguje, so značilne pogoste padavine, subtropska območja, kjer se zrak spušča, pa so sušna. HC torej bistveno vpliva na količino padavin, ki jo prejmejo posamezna območja, in prek tega na razporeditev rastja in poselitvena območja.

V tej študiji HC opišemo s tokovno funkcijo, nato pa z (razširjeno) Kuo-Eliassenovo enačbo identificiramo fizikalne procese, ki največ prispevajo k časovno povprečni meridionalni cirkulaciji v Hadleyjevi celici, in ovrednotimo njihove prispevke k celotni intenzivnosti HC. Ob tem tudi analiziramo prostorsko porazdelitev prispevkov posameznih procesov k HC.

Najprej opišemo podatke iz reanaliz, ki smo jih uporabili za izračun HC in nato matematično definiramo HC. Sledi predstavitev in opis razširjene Kuo-Eliassenove enačbe, za tem pa identifikacija glavnih dejavnikov HC. Na koncu ovrednotimo še njihov delež k intenzivnosti posamezne Hadleyjeve celice.

## PODATKI

Reanalize so analize preteklega vremena, ki nastanejo tako, da v numerične modele za napovedovanje vremena asimiliramo meritve ozračja in spodnjega roba ozračja. Najnovejše modele in asimilacijske algoritme tako uporabimo na starih meritvah za še boljšo rekonstrukcijo preteklega vremena. Asimilacija podatkov je matematični postopek, pri katerem objektivno kombiniramo meritve s predhodno napovedjo (pri čemer upoštevamo njune napake), da dobimo optimalno analizo, ki jo uporabimo kot začetni pogoj za integracijo numeričnega modela v času (napoved). Pri pripravi reanalize integracijo po kratkem času, npr. 12 ali 24 ur, prekinemo, znova asimiliramo meritve in postopek ciklično ponavljamo.

Za analizo Hadleyjeve cirkulacije uporabimo podatke iz dveh modernih reanaliz, ERA-Interim (Dee et al., 2011) in ERA5 (Hersbach et al., 2020), ki ju je pripravil Evropski center za srednjeročno napovedovanje vremena (ECMWF). Novejša reanaliza ERA5 ima višjo horizontalno in vertikalno ločljivost modela, izboljšano dinamično jedro (numerične metode) modela, izboljšane fizikalne parametrizacije pod mrežnih procesov in postopke asimilacije podatkov, poleg tega pa asimilira petkrat več podatkov kot ERA-Interim. Vsebuje tudi podatke o temperaturi površine morja in koncentraciji ledu v oceanih, s tem pa se bolje sklada z izmerjeno temperaturo v troposferi, vetrom, vlažnostjo in količino padavin (Hersbach et al., 2020).

Za analizo smo izbrali dnevne podatke ob 00 UTC na horizontalni mreži z ločljivostjo  $1^\circ$  ter na 37 standardnih nivojih tlaka za zonalno in meridionalno komponento hitrosti horizontalnega vetra  $u$  in  $v$ , vertikalno pritiskovo hitrost  $\omega$  in temperaturo  $T$ . Podatke smo analizirali za obdobje od 1. 1. 1979 do 31. 12. 2018. Standardni nivoji tlaka niso razporejeni enakomerno,  $u$  in  $v$  sta podani v enotah  $m/s$ ,  $\omega$  v enotah  $Pa/s$ ,  $T$  pa v  $K$ .

## OPIS HADLEYJEVE CIRKULACIJE S TOKOVNO FUNKCIJO

Intenzivnost HC opišemo s tokovno funkcijo  $\psi$  na meridionalno-vertikalni  $(\phi, p)$  ravnini. Tokovno funkcijo  $\psi$  definiramo na način, da je zonalno in časovno povprečen vektor hitrosti

$[\mathbf{v}] = ([v], [\omega])$  povsod na  $(\phi, p)$  ravnini pravokoten na gradient tokovne funkcije, torej (Peixoto & Oort, 1992):

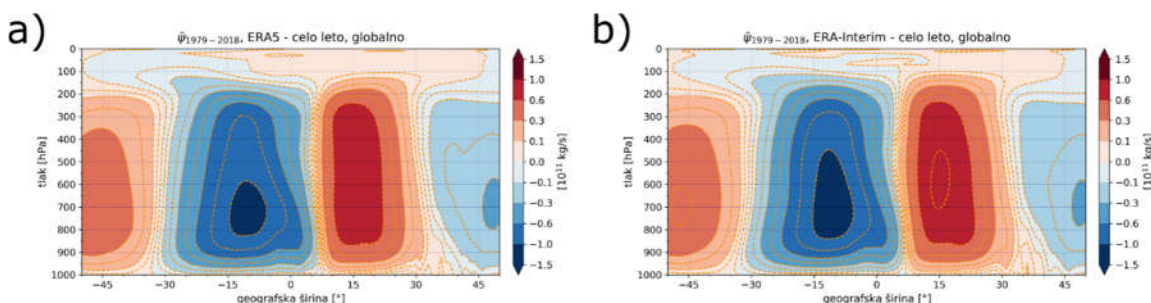
$$[\mathbf{v}] \cdot \nabla \psi = 0.$$

Izolinja tokovne funkcije pa je torej povsod na  $(\phi, p)$  ravnini vzporedna lokalnim vektorjem hitrosti. Za izračun  $\psi$  uporabimo zonalno ter letno povprečen meridionalni veter  $[v]$  (Peixoto & Oort, 1992):

$$\psi(\phi, p) \frac{2\pi R \cos \phi}{g} \int_0^p [v](\phi, p') dp', \quad (1)$$

kjer privzamemo, da na vrhu atmosfere pri  $p = 0$  velja  $\psi = 0$ .  $R$  je polmer Zemlje,  $g$  težnostni pospešek,  $\phi$  pa kot geografske širine.

Povprečna intenzivnost zonalno povprečene HC v reanalizah ERA5 in ERA-Interim med letoma 1979 in 2018, izračunana po enačbi (1), je prikazana na sliki 1. V severni Hadleyjevi celici je po definiciji  $\psi > 0$ , v južni Hadleyjevi celici pa  $\psi < 0$ . Letno povprečena južna Hadleyjeva celica sega malo čez ekvator na severno poloblo, saj je tudi ekvatorialna konvergenčna cona (ITCZ) pomaknjena za nekaj stopinj geografske širine proti severu. Obe celici se torej stikata na območju ITCZ, zato govorimo o celicah severno in južno od ITCZ ali še bolj preprosto kar o severni in južni celici. Minimum tokovne funkcije  $\psi_{\min}$  je v obeh reanalizah v južni celici nižje (pri višjem zračnem tlaku), kot je nivo maksimuma tokovne funkcije  $\psi_{\max}$  v severni celici:  $\psi_{\min}$  se nahaja na okoli 700 hPa,  $\psi_{\max}$  pa na okoli 600 hPa. Absolutna vrednost  $\psi_{\min}$  je večja od  $\psi_{\max}$ , kar pomeni, da je južna celica močnejša od severne celice. Obenem je intenzivnost obeh celic v reanalizi ERA-Interim nekoliko večja kot v ERA5 (Pikovnik, 2021).



Slika 1 – Letno in zonalno povprečje Hadleyjeve cirkulacije v obdobju 1979-2018 na meridionalno vertikalni ravnini za podatke iz reanalize a) ERA5 in b) ERA-Interim (Pikovnik, 2021). Hadleyjevi celici sta celici, ki sta najbližje ekvatorju.

## RAZŠIRJENA KUO-ELIASSENOVA ENAČBA

Kuo-Eliassenova enačba povezuje intenzivnost meridionalne cirkulacije s prispevki diabatnega gretja (npr. zaradi sproščanja latentne toplote, radiacijskega gretja itd.), trenja ter meridionalnih pretokov toplote in gibalne količine s cikloni (vrtinci). S Kuo-Eliassenovo enačbo torej lahko ugotovimo, kateri fizikalni procesi največ prispevajo k povprečni meridionalni cirkulaciji v Hadleyjevi celici (Pikovnik, 2021). Osnovna Kuo-Eliassenova enačba upošteva kvazi-geostrofsko aproksimacijo in jo izpeljemo iz sistema štirih zonalno povprečenih enačb: gibalne enačbe za zonalni veter, kontinuitetne enačbe, termodinamične enačbe in enačbe termalnega vetra (Peixoto & Oort, 1992; Chemke & Polvani, 2019). Kvazi-

geostrofska aproksimacija npr. upošteva, da so vertikalna gibanja zanemarljiva napram horizontalnim, kar pa za gibanja v tropskih predelih ne drži, četudi jih zonalno in časovno povprečimo.

Pri izpeljavi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe ne privzamemo kvazi-geostrofskega približka. Ta različica enačbe nam dodatno omogoča ovrednotenje prispevka vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine ter toplote z vrtinci k HC. Magnituda teh procesov (členi z  $\omega$ ) v tropih namreč ni zanemarljiva, zato jih v celoti upoštevamo. Tako dobimo naslednjo obliko razširjene Kuo-Eliassenove enačbe zapišemo v bolj preprosti obliki kot (Zapltnik in sod., 2022; za celotno izpeljavo glej Pikovnik, 2021):

$$L\psi = D = D_Q + D_{v'T'} + D_X + D_{u'v'} + D_{u'\omega'} + D_{\omega'\theta'}. \quad (2)$$

Povprečna meridionalna cirkulacija, ki jo opisuje  $\psi$ , je torej sestavljena iz vsote posameznih prispevkov, ki jih predstavljajo naslednji fizikalni procesi: diabatno gretje  $D_Q$  (tako kondenzacijski kot sevalni del), meridionalni pretok toplote z vrtinci  $D_{v'T'}$ , trenje v zonalni smeri  $D_X$ , meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci  $D_{u'v'}$ , vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci  $D_{u'\omega'}$  in vertikalni pretok toplote z vrtinci  $D_{\omega'\theta'}$ .  $L$  je eliptični diferencialni operator 2. reda, ki opisuje vertikalno in meridionalno strukturo zonalno-povprečenega zonalnega vetra in temperature, vključno s statično stabilnostjo ozračja. Velja torej  $L\psi \propto -\psi$ . Posamezne prispevke zapišemo kot (Zapltnik in sod., 2022; Pikovnik, 2021)

$$D_Q = \frac{R_d}{p} \frac{\partial [J]}{R \partial \phi}, \quad (3)$$

$$D_{v'T'} = -\frac{R_d}{p} \frac{\partial}{R \partial \phi} \frac{\partial ([v'T'] \cos \phi)}{R \cos \phi \partial \phi}, \quad (4)$$

$$D_X = -f \frac{\partial [F_\lambda]}{\partial p}, \quad (5)$$

$$D_{u'v'} = f \frac{\partial^2 ([u'v'] \cos^2 \phi)}{R \cos^2 \phi \partial p \partial \phi}, \quad (6)$$

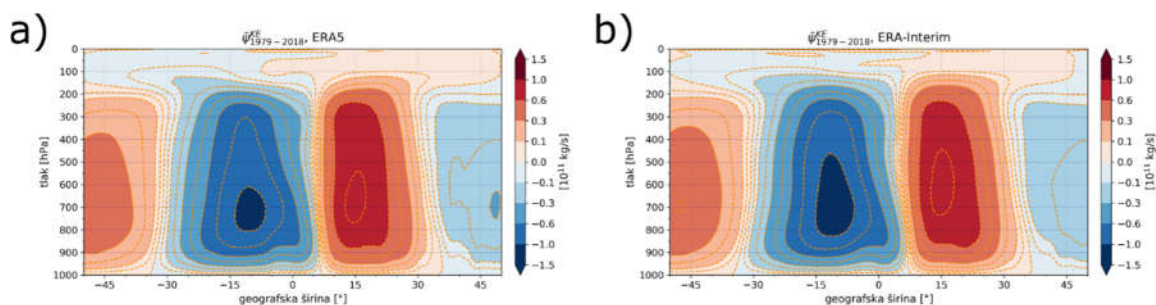
$$D_{u'\omega'} = f \frac{\partial^2 [u'\omega']}{\partial p^2}, \quad (7)$$

$$D_{\omega'\theta'} = -\frac{1}{\rho[\theta]} \frac{\partial}{R \partial \phi} \frac{\partial [\omega'\theta']}{\partial p}. \quad (8)$$

Enačba (3) torej predstavlja meridionalni gradient (zonalno in časovno povprečenega) diabatnega gretja  $[J]$ , enačba (4) vsebuje meridionalni pretok toplote z vrtinci  $[v'T']$ , enačba (5) opisuje vertikalni gradient trenja v zonalni smeri  $[F_\lambda]$ , enačba (6) vsebuje meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci  $[u'v']$ , enačba (7) vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci  $[u'\omega']$ , enačba (8) pa vertikalni pretok toplote z vrtinci  $[\omega'\theta']$ .

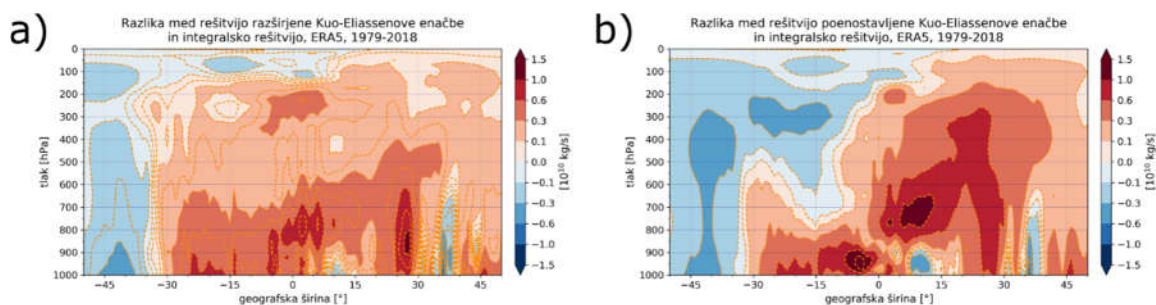
Sistem  $L\psi = D$  rešujemo kot matrični sistem numerično z LU-razcepom, rešitev enačbe pa je vektor  $\psi$ , v katerega so zložene vrednosti tokovne funkcije v vsaki točki mreže na ravnini  $(\phi, p)$ .

Na sliki 2 je prikazana primerjava letnega povprečja intenzivnosti HC v obdobju 1979-2018 po rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe za podatke iz reanaliz ERA5 (slika 2a) in ERA-Interim (slika 2b). Primerjava s sliko 1 potrjuje pravilnost rešitve s Kuo-Eliassenovo enačbo. Če primerjamo npr. sliki 1a in 2a, ugotovimo, da sta si polji podobni, vseeno pa opazimo nekaj razlik. Ena izmed njih je v severni celici, ko gre pri rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe v pasu med 550 hPa in 800 hPa za pozitivno odstopanje vrednosti tokovne funkcije napram direktni metodi (1).



Slika 2 – Primerjava letnega povprečja intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije v obdobju 1979-2018 po rešitvi razširjene Kuo-Eliassenove enačbe za podatke iz a) reanalize ERA5 in b) reanalize ERA-Interim (Pikovnik, 2021).

Na sliki 3 so prikazane še razlike med rešitvijo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) in integralno rešitvijo (1) za podatke iz reanalize ERA5. Odstopanja v točkah mreže so v posameznih letih v ERA5 do 35%, v ERA-Interim pa do 48% manjša od odstopanj pri rešitvi s Kuo-Eliassenovo enačbo. Za obdobje 1979-2018 je odstopanje v ERA5 manjše za 20%, v ERA-Interim pa za 37%. Odstopanje od rešitve po direktni metodi (1) izračunamo tako, da seštejemo absolutne vrednosti razlik med integralno rešitvijo in rešitvijo (razširjene) Kuo-Eliassenove enačbe, primerjamo pa jih kot razmerje med vsoto absolutnih vrednosti razlik pri razširjeni Kuo-Eliassenovi enačbi ("KE full") in vsoto absolutnih vrednosti razlik pri "navadni" Kuo-Eliassenovi enačbi, torej  $\sum \Delta\psi_{full}^{KE} / \sum \Delta\psi^{KE}$ . Rešitev razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) v severni celici precenjuje, v južni celici pa podcenjuje rešitev po direktni metodi, medtem ko rešitev Kuo-Eliassenove enačbe rešitev po direktni metodi precenjuje – na severni polobli v celoti, na južni polobli pa povečini.



Slika 3 – Razlika med a) rešitvijo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (2) in integralno rešitvijo (1) ter med b) rešitvijo Kuo-Eliassenove enačbe in integralno rešitvijo (1) za podatke iz reanalize ERA5 (Pikovnik, 2021).

### MERA POVPREČNE INTENZIVNOSTI CELICE

Za analizo prispevkov različnih fizikalnih procesov k intenzivnosti HC vpeljemo mero povprečne intenzivnosti celice. Pri tej meri prostorsko povprečimo polje tokovne funkcije na območju posamezne celice. Za severno celico tako velja (Pikovnik in sod., 2022):

$$\psi_{NHC} = \langle \psi(\phi, p) \rangle, \text{ kjer velja } \psi \geq 0 \text{ in } (\phi, p) \in [15^\circ, 45^\circ S] \times [1000, 100] \text{ hPa, (9)}$$

pri čemer je korak v meridionalni smeri  $1^\circ$ , v vertikalni smeri pa 50 hPa, s čimer zagotovimo enakomerno vzorčenje HC. Podatke v teh točkah in na teh nivojih namreč že imamo. Za južno celico velja podobno, le da se spremenijo meje območja v meridionalni smeri in da povprečimo negativne vrednosti  $\psi$  (Pikovnik in sod., 2022):

$$\psi_{\text{SHC}} = \langle \psi(\phi, p) \rangle, \text{ kjer velja } \psi < 0 \text{ in } (\phi, p) \in [45^\circ\text{J}, 20^\circ\text{S}] \times [1000, 100] \text{ hPa.} \quad (10)$$

## POLJA PROCESOV, KI SILIJO HADLEYJEVO CIRKULACIJO

Na sliki 4 levo so predstavljena zonalno in letno povprečena polja diabatnega gretja, meridionalnega pretoka toplote z vrtinci, trenja, meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci ter vertikalnih pretokov zonalne gibalne količine in toplote z vrtinci v reanalizi ERA5. Na sliki 4 desno pa so prikazana polja členov iz desne strani KE enačbe (2), v katerih zgoraj navedena fizikalna polja nastopajo.

Primarni gonilnik HC je diabatno gretje. To je največje na območju ITCZ, skoraj povsem zaradi intenzivnega sproščanja kondenzacijske toplote (ni prikazano; slika 4a). Večje vrednosti diabatnega gretja tik nad površjem so posledica turbulentnega toka zaznavne toplote iz ogretega površja v planetarno mejno plast ozračja ter tudi evaporacije iz površja v ozračje. Območje od nivoja zračnega tlaka 100 hPa navzgor se nahaja izven troposfere, v stratosferi, kjer pride do diabatnega gretja zaradi absorpcije UV sevanja in sproščanja toplote na molekulah ozona. Diabatno stratosfersko gretje na HC ne vpliva, zato ga v nadaljevanju ne omenjamo več. Večji del ozračja je območje neto sevalnega hlajenja, kjer je izsev večji od prejetega sevanja in je diabatno gretje negativno (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Takšna so razsežna območja v subtropski troposferi (slika 4a). V okolici ITCZ v troposferi, kjer je diabatno gretje najmočnejše, je posledično najmočnejši tudi meridionalni gradient diabatnega gretja (slika 4b).

Meridionalni pretok toplote z vrtinci je največji v Ferrelovi celici v zmernih širinah (slika 4c). Ferrelova celica je fiktivna cirkulacijska celica med subtropskimi in subpolarnimi predeli, ki je posledica zonalnega in časovnega povprečevanja planetarnih Rossbyjevih valov, ki skrbijo za prenos toplote in gibalne količine na tem območju. Na območju HC je v zgornji troposferi na severni polobli meridionalni pretok toplote z vrtinci pozitiven, na južni pa negativen, torej imamo v obeh primerih pretok toplote z vrtinci v smeri proti poloma. V subtropih je pretok toplote z vrtinci proti poloma divergenten, ki se odraža v večjem meridionalnem temperaturnem gradientu in tako se krepi intenzivnost HC (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Prispevek meridionalnega pretoka toplote z vrtinci na območju HC se odraža v členu  $D_{v'T'}$ , ki je največji na območju subtropskega vetrovnega stržena (ang. 'jet stream') na robu obeh Hadleyjevih celic v zgornji troposferi (slika 4d).

Trenje v zonalni smeri je pričakovano največje ob površju (slika 4e). Na območju, kjer se pri stekajočih pasatih zaradi Coriolisove sile in ohranitve vrtilne količine pojavi zonalna komponenta toka in pasati zavijajo v smeri proti zahodu, je trenje v zonalni smeri pozitivno, saj deluje v nasprotni smeri toka (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Močnejši pasati in ekvatorialni vzhodniki torej prispevajo h krepitvi HC. Člen trenja v zonalni smeri  $D_x$  je pričakovano največji ob površju (slika 4f), v členu pa je zonalno trenje uteženo še s Coriolisovim parametrom  $f = 2\Omega \sin \phi$ , kjer je  $\Omega$  kotna hitrost vrtenja Zemlje. Posledično ima člen  $D_x$  maksimum nekoliko dlje od ekvatorja. Trenje samo po sebi ne poganja globalne HC, jo pa pomembno modulira (lahko pa trenje poganja posamezne regionalne Hadleyjeve celice).

Maksimum meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci po absolutni vrednosti sovпада z območjem subtropskega vetrovnega stržena (ang. 'jet stream') na robu

obeh Hadleyjevih celic v zgornji troposferi (slika 4g). Ta pretok praviloma narašča z višino, na območju subtropskega vetrovnega stržena, kjer pihajo splošni zahodniki, pa gre za pretok zonalne gibalne količine z vrtinci iz subtropskih predelov proti zmernim širinam (Vallis, 2017; Pikovnik, 2021). Podobno kot meridionalni pretok toplote z vrtinci tudi ta proces kroji predvsem dinamiko v zmernih širinah, v tropskih predelih pa je meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci divergenten, še posebej to velja v zgornji troposferi.

Vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci imata, podobno kot meridionalna pretoka, ravno tako največjo magnitudo na območju subtropskega vetrovnega stržena. Večja sta na južni polobli, saj je tam subtropski stržen močnejši (sliki 4i in 4k). Na območju dviganja zraka ob ITCZ je vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci pozitiven, saj pri dvigu ( $\omega' < 0$ ) pridemo iz območja z močnim vzhodnikom v območje s šibkejšim vzhodnikom, zato je  $u' < 0$ . Na območju subtropov na robu obeh Hadleyjevih celic pa je  $u' > 0$  in ker je tam vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci negativen, to pomeni, da je tudi  $\omega' < 0$  in se torej zonalna gibalna količina z vrtinci pretaka navzgor (ni prikazano; Pikovnik, 2021). Prispevek vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci je izrazit na območju subtropskega vetrovnega stržena (slika 4j). Vertikalni pretok toplote z vrtinci ima na območju HC sinusoidni profil po višini. Na območju dviganja zraka ob ITCZ se z vrtinci navzgor pretaka toplejši zrak. Maksimum je tik pod nivojem zračnega tlaka, na katerem je maksimum diabatnega gretja zaradi kondenzacije in sproščanja latentne toplote (Pikovnik, 2021). Prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci je majhen, še največji je na območju subtropskega vetrovnega stržena (slika 4l).

## ANALIZA POSAMEZNIH PRISPEVKOV K TOKOVNI FUNKCIJI

Da lahko ocenimo prispevek posameznih procesov k celotnemu polju tokovne funkcije, zapišemo  $\psi$  v enačbi (2) kot  $\psi = \psi_Q + \psi_{v'T'} + \psi_X + \psi_{u'v'} + \psi_{u'\omega'} + \psi_{\omega'\theta'}$ . Nato rešimo delne matrične sisteme, torej matrični sistem  $L\psi_i = D_i$  za siljenja z  $i = Q, v'T', X, u'v', u'\omega', \omega'\theta'$ . Polja posameznih prispevkov  $\psi_i$  k polju celotne tokovne funkcije  $\psi$  za obdobje 1979-2018 so prikazana na sliki 5. Za boljšo predstavbo so na slikah dodane izolinijske tokovne funkcije severne in južne Hadleyjeve celice, ki jih dobimo z reševanjem razširjene Kuo-Eliassenove enačbe.

Diabatno gretje, trenje v zonalni smeri ter meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci praktično po celotni severni in južni celici krepijo intenzivnost HC, medtem ko vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci povečini slabita intenzivnost HC v severni in južni celici (glej tudi sliki 6a in 6b).

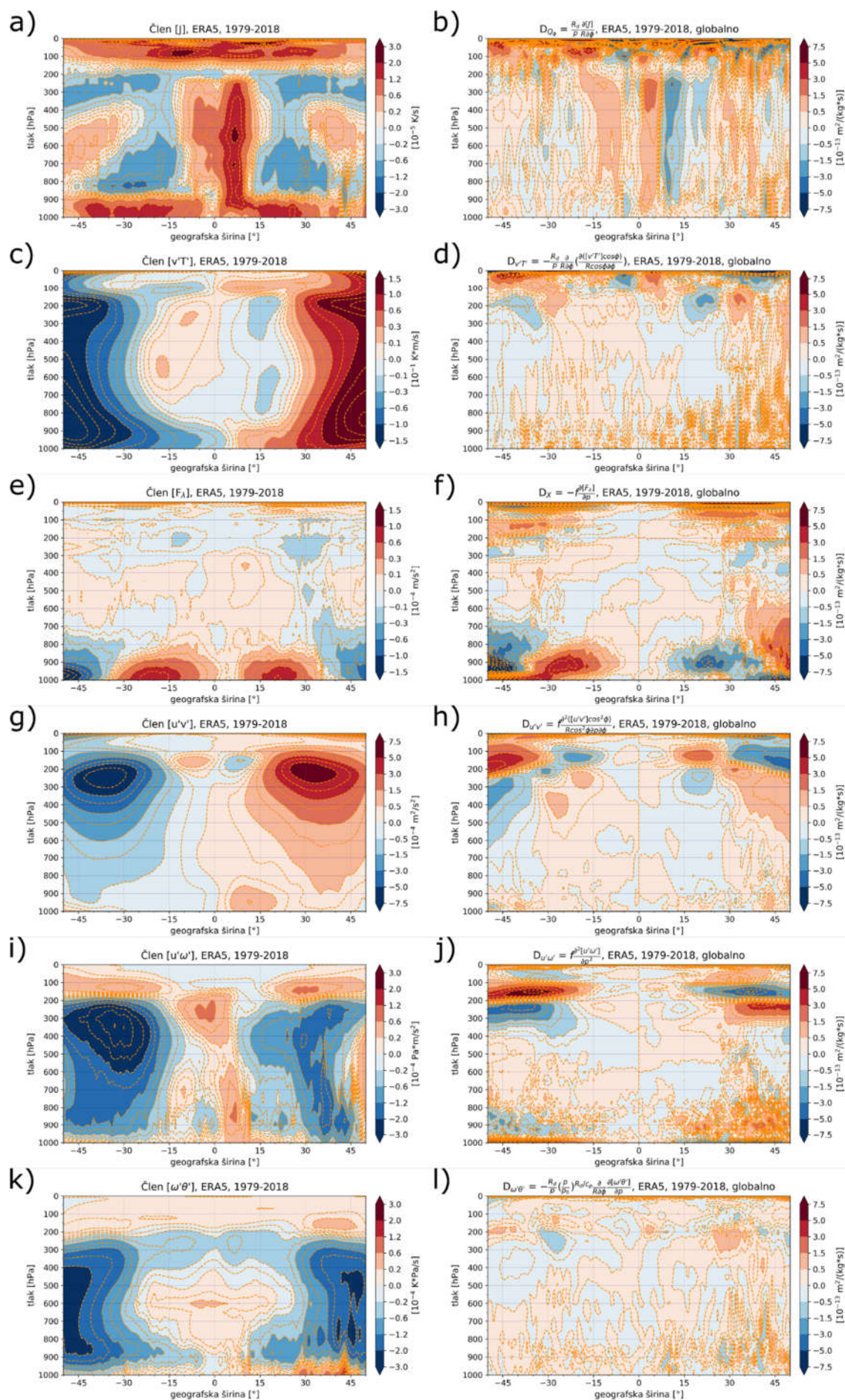
Največ k intenzivnosti HC pričakovano prispeva diabatno gretje (sliki 5a in 5b). Slednjega tvorita kondenzacijski in sevalni prispevek. Prvi je pomembnejši v tropih in je povezan s kondenzacijo vodne pare ob dviganjih v nevihtnih oblakih v ITCZ, pri čemer se sprošča latentna toplota, ki predstavlja primarni vir energije za ozračje v tropskih predelih. Sproščanje latentne toplote v tropih je najbolj intenzivno v srednji troposferi in ima značilen sinusoiden potek temperature z višino (Gill, 1980). Tako je pričakovano tudi prispevek diabatnega gretja največji v srednji troposferi.

Nekoliko manj od diabatnega gretja k intenzivnosti HC prispeva trenje v zonalni smeri (sliki 5e in 5f). Pričakovano je prispevek trenja največji v spodnjih plasteh ozračja, v bližini površja, kjer se stekajo pasati v smeri od subtropov proti ekvatorju.

Meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci k intenzivnosti HC prispevata v podobni meri, le da je prvi nekoliko bolj enakomerno razporejen po vertikali (sliki 5c in 5d), drugi pa je večji v zgornji troposferi (sliki 5g in 5h). Da je prispevek obeh procesov večji v zgornjih plasteh in manjši v spodnjih plasteh ozračja je pričakovano, saj je

meridionalni pretok toplote z vrtinci povezan z pretokom (toplejšega) zraka v zgornjih plasteh ozračja v smeri proti poloma in pretokom (hladnejšega) zraka v spodnjih plasteh ozračja v smeri proti ekvatorju, meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci pa je povezan s subtropskim vetrovnim strženom (ang. 'jet stream'), ki se nahaja na robu Hadleyjeve celice v zgornji troposferi (glej tudi diskusijo v prejšnjem poglavju).





Slika 4 – Letna in zonalna povprečja glavnih fizikalnih procesov (a, c, e, g, i, k) in njihovih pripadajočih siljenj v KE enačbi (2) (b, d, f, h, j, l) v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5: diabatno gretje (a, b), meridionalni pretok toplote z vrtinci (c, d), trenje v zonalni smeri (e, f), meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (g, h), vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (i, j) in vertikalni pretok toplote z vrtinci (k, l).

Vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci k intenzivnosti HC po absolutni vrednosti prispevata najmanj, ob tem pa po večini obeh celic prispevata nasprotno od ostalih procesov in tako, sicer v majhni meri, zmanjšujeta intenzivnost HC v obeh celicah. Vertikalni pretok toplote z vrtinci je po obeh celicah razporejen zelo enakomerno (sliki 5k in 5l), medtem ko vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci največ prispeva na območju subtropskega vetrovnega stržena (sliki 5i in 5j).

Primerjava med levim stolpcem slike 5, ki prikazuje prispevke posameznih procesov k HC v ERA5, in desnim stolpcem slike 5, ki prikazuje prispevke v ERA-Interim, pokaže, da so si prispevki v obdobju 1979-2018 v obeh reanalizah izjemno podobni kljub različnosti reanaliz (glej poglavje Podatki), kar nakazuje, da so časovno povprečene lastnosti HC v reanalizah natančno opisane, vseeno pa obstajajo precejšnje razlike v trendih intenzivnosti HC, kot je pokazala analiza Pikovnik in sod., 2022.

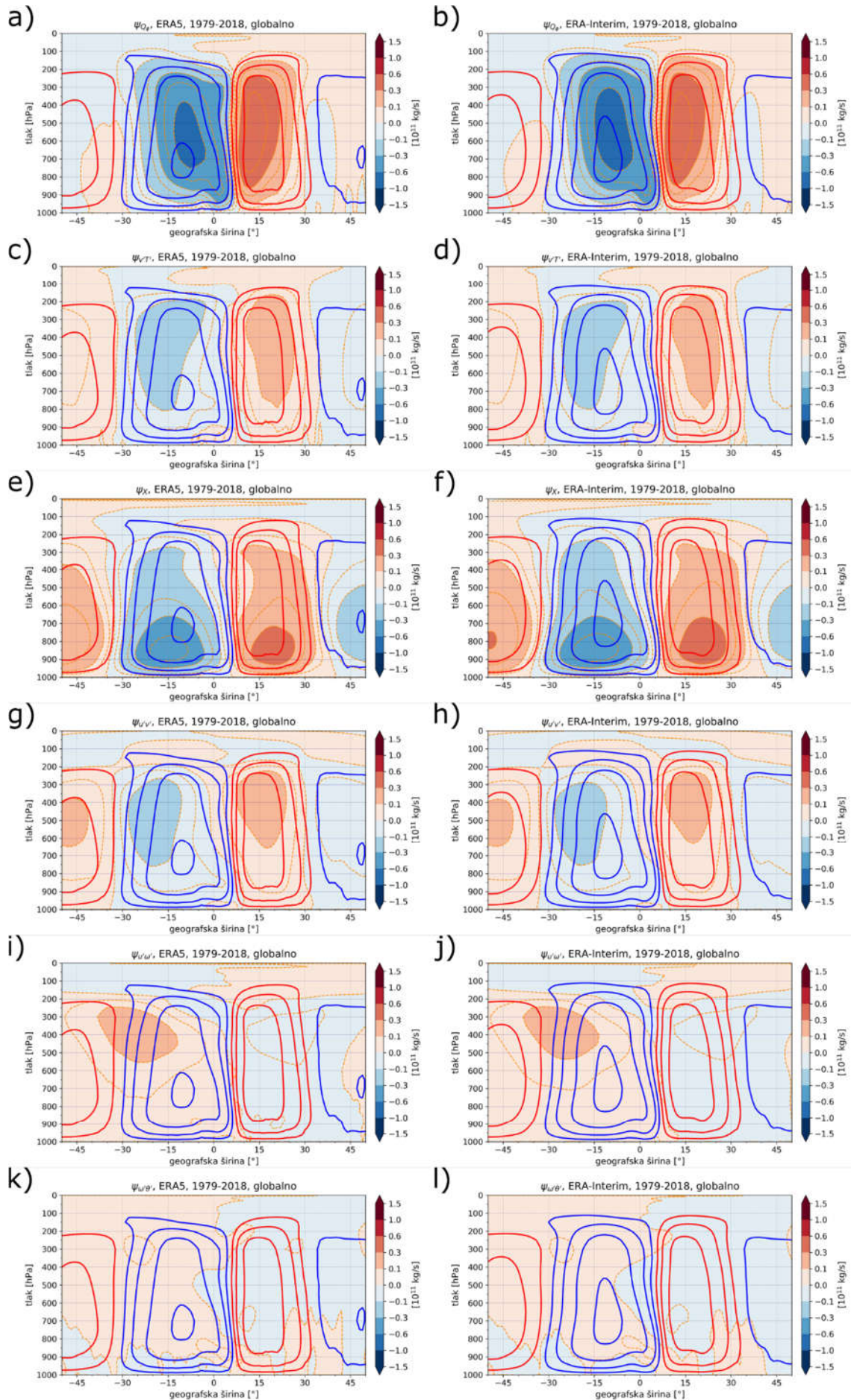
Nazadnje izračunamo še, kolikšen delež prispevajo k intenzivnosti Hadleyjevih celic (enačbi (9) in (10)) glavni fizikalni procesi za podatke iz reanalize ERA5. Delež  $R_i$ , ki ga predstavlja  $i$ -ti proces  $\psi_i$  (vertikalno in meridionalno ga povprečimo v skladu s povprečevanjem pri enačbah (9) in (10), da dobimo  $\langle\psi_i\rangle$ ) ovrednotimo kot

$$R_i = \frac{|\langle\psi_i\rangle|}{\sum_j |\langle\psi_j\rangle|} \quad (11)$$

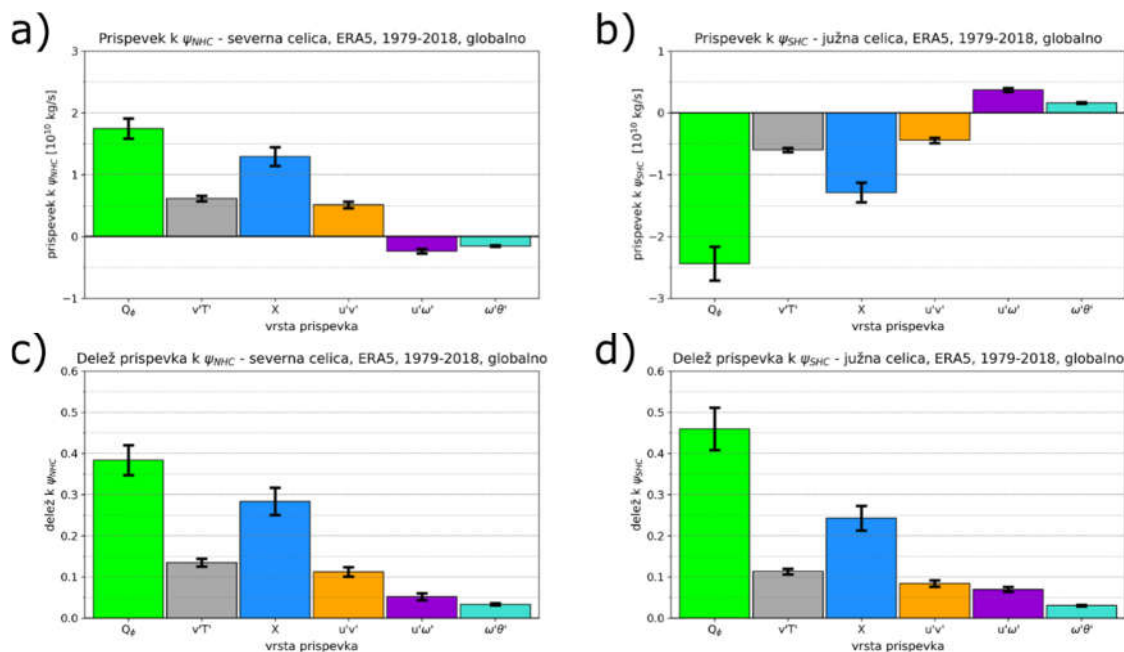
kjer je  $i = Q, v'T', X, u'v', u'\omega', \omega'\theta', \sum_j$  pa predstavlja vsoto po vseh  $i$ -jih.

V obeh celicah največji delež HC predstavlja prispevek diabatnega gretja (sliki 6a in 6b): v južni celici omenjeni prispevek predstavlja skoraj polovico celotne cirkulacije (slika 6d), v severni celici pa slabi dve petini (slika 6c). Drugo po deležu prispevka k celotni cirkulaciji je trenje v zonalni smeri, ki v južni celici prispeva približno četrtno celotne cirkulacije, v severni celici pa še nekoliko več. Delež prispevkov ostalih procesov k celotni cirkulaciji je bistveno manjši. Po vrsti si sledijo prispevek meridionalnega pretoka toplote z vrtinci (delež dobrih 10%), prispevek meridionalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci (cca. 10%), prispevek vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci (cca. 5%) in prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci (manj kot 5%). Iz omenjenih deležev lahko razberemo, da so prispevki trenja v zonalni smeri ter meridionalnih pretokov toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci v severni celici relativno pomembnejši kot v južni celici. V slednji pa sta relativno bolj pomembna prispevka diabatnega gretja in vertikalnega pretoka zonalne gibalne količine z vrtinci. Prispevek vertikalnega pretoka toplote z vrtinci je enako relativno pomemben v obeh celicah. Po absolutni vrednosti je prispevek diabatnega gretja v južni celici opazno večji kot v severni celici, medtem ko so prispevki ostalih procesov po absolutni vrednosti primerljivi (sliki 6a in 6b). Iz tega sledi, da je intenzivnost južne celice večja od intenzivnosti severne celice.





Slika 5 – Letna povprečja posameznih prispevkov k tokovni funkciji v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5 (a, c, e, g, i, k) in ERA-Interim (b, d, f, h, j, l): diabatno gretje (a, b), meridionalni pretok toplote z vrtinci (c, d), trenje v zonalni smeri (e, f), meridionalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (g, h), vertikalni pretok zonalne gibalne količine z vrtinci (i, j) in vertikalni pretok toplote z vrtinci (k, l). Prispevki so prikazani kot barvna območja. S polnimi modrimi in rdečimi črtami je označeno polje letnega povprečja HC po razširjeni Kuo-Eliassenovi enačbi; rdeče črte predstavljajo vrednosti  $(0.1, 0.3, 0.6) \cdot 10^{11}$  kg/s, modre črte pa vrednosti  $(-0.1, -0.3, -0.6, -1.0) \cdot 10^{11}$  kg/s.



Slika 6 – Prispevki glavnih fizikalnih procesov k celotni Hadleyjevi cirkulaciji (a, b) in njihovi deleži (c, d) v severni (a, c) in južni (b, d) celici v obdobju 1979-2018 za podatke iz reanalize ERA5. Črni intervali označujejo standarden odklon ocene.

## ZAKLJUČEK

Z uporabo razširjene Kuo-Eliassenove enačbe (Zaplotnik in sod., 2022; Pikovnik, 2021) na reanalizah vremena ERA5 in ERA-Interim smo identificirali fizikalne procese, ki v obdobju 1979-2018 največ prispevajo k intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije (HC). To sta diabatno gretje in trenje v zonalni smeri. Ostali procesi, t. j. meridionalna in vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci, so relativno manj pomembni, ne pa zanemarljivi.

Posebej smo analizirali polja omenjenih fizikalnih procesov ter njihove prispevke k polju celotne tokovne funkcije. Ugotovili smo, da je diabatno gretje odgovorno za slabo polovico intenzivnosti celotne cirkulacije, v južni celici nekaj več kot v severni. Prispevek diabatnega gretja je najbolj znaten v srednji troposferi, kjer prihaja do kondenzacije in največjega sproščanja latentne toplote.

Po prispevku k intenzivnosti HC diabatnemu gretju sledi trenje v zonalni smeri, ki predstavlja približno četrtnino intenzivnosti celotne cirkulacije. Prispevek trenja je pričakovano največji v spodnji troposferi, torej v bližini površja, hkrati pa je delež trenja pričakovano nekoliko večji v severni celici, saj je tam več kopnega. Trenje ni gonilec globalne HC, jo pa pomembno modulira. Je pa trenje povezano z ekvatorialnimi vzhodniki

lahko gonilec lokalnih Hadleyjevih celic (Zaplotnik in sod., 2022). Prispevki ostalih procesov so omejeni pretežno na zgornjo troposfero oz. na območje subtropskega vetrovnega stržena na robu obeh celic. Diabatsno gretje, trenje v zonalni smeri ter meridionalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci prispevajo h krepitvi intenzivnosti HC, medtem ko vertikalna pretoka toplote in zonalne gibalne količine z vrtinci prispevata k slabitvi intenzivnosti HC.

Študija je pokazala, da je pri analizi prispevkov k časovno povprečni HC smiselno upoštevati tudi prispevke vertikalnih pretokov zonalne gibalne količine in toplote, ki v tropskih predelih nista zanemarljiva. Slednja smo definirali tako, da smo Kuo-Eliassenovo enačbo izpeljali brez kvazi-geostrofskega približka. Četudi ta dva člena prispevata zanemarljivo malo k nedavnim spremembam intenzivnosti HC, pa imata vseeno nezanimljivo prispevek k njeni povprečni intenzivnosti.

HC nikakor ni zonalno homogena, ne po intenzivnosti niti po razsežnosti. V prihodnosti bomo zato podobno dekompozicijo napravili tudi za lokalne Hadleyjeve celice, npr. za Atlantsko in Pacifiško celico ter celico nad Indijskim oceanom. Tako bomo lahko povezali multidekadne oceanske oscilacije in spremembe HC ter bolje razložili, v kolikšni meri so opažene spremembe HC (Zaplotnik in sod., 2022) posledica multidekadnih internih oscilacij v klimatskem sistemu in v kolikšni meri so neposredno povezane z antropogenimi podnebnimi spremembami.

## LITERATURA

- Chemke R., Polvani L. M. (2019). Opposite tropical circulation trends in climate models and in reanalyses. *Nature Geoscience*, 12, 528-532.  
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0383-x> (ogled 17.11.2021)
- Dee D. P., Uppala S. M., Simmons A. J., Berrisford P., Poli P., Kobayashi S., Andrae U., Balmaseda M. A., Balsamo G., Bauer P., Bechtold P., Beljaars A. C. M., van de Berg L., Bidlot J., Bormann N., Delsol C., Dragani R., Fuentes M., Geer A. J., Haimberger L., Healy S. B., Hersbach H., Hólm E. V., Isaksen L., Kallberg P., Köhler M., Matricardi M., McNally A. P., Monge-Sanz B. M., Morcrette J.-J., Park B.-K., Peubey C., de Rosnay P., Tavolato C., Thépaut J.-N. in Vitart F. (2011). The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137, 553-597.  
<https://doi.org/10.1002/qj.828> (ogled 17.11.2021)
- ERA-Interim reanalysis, ECMWF.  
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era-interim> (ogled 17.11.2021)
- ERA5 reanalysis, ECMWF.  
<https://www.ecmwf.int/en/forecasts/datasets/reanalysis-datasets/era5> (ogled 17.11.2021)
- Gill A. E. (1980). Some simple solutions for heat-induced tropical circulation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 106, 447-462.  
<https://doi.org/10.1002/qj.49710644905> (ogled 8.12.2021)
- Hersbach H., Bell B., Berrisford P., Hirahara S., Horányi A., Muñoz-Sabater J., Nicolas J., Peubey C., Radu R., Schepers D., Simmons A., Soci C., Abdalla S., Abellan X., Balsamo G., Bechtold P., Biavati G., Bidlot J., Bonavita M., De Chiara G., Dahlgren P., Dee D., Diamantakis M., Dragani R., Flemming J., Forbes R., Fuentes M., Geer A., Haimberger L., Healy S., Hogan R. J., Hólm E., Janisková M., Keeley S., Laloyaux P., Lopez P., Lupu C., Radnoti G., de Rosnay P., Rozum I., Vamborg F., Villaume S. in Thépaut J.-N. (2020). The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146, 1999-2049.  
<https://doi.org/10.1002/qj.3803> (ogled 17.11.2021)
- Peixoto J. P., Oort A. H. (1992). *Physics of climate* / José P. Peixoto and Abraham H. Oort ; foreword by Edward N. Lorenz. American Institute of Physics, New York.

- Pikovnik M. (2021). Analiza sprememb intenzivnosti Hadleyjeve cirkulacije (magistrsko delo). Univerza v Ljubljani, FMF.  
<https://repositorij.uni-lj.si/IzpisGradiva.php?id=124829> (ogled 18.11.2021)
- Pikovnik M., Zaplotnik Ž., Boljka L., Žagar N. (2022). Metrics of the Hadley circulation strength and associated circulation trends. *Weather and Climate Dynamics* (v recenziji).
- Vallis G. K. (2017). *Atmospheric and Oceanic Fluid Dynamics: Fundamentals and Large-Scale Circulation*. Second Edition. Cambridge University Press.
- Zaplotnik Ž., Pikovnik M., Boljka L. (2022). Recent Hadley circulation strengthening: a trend or multidecadal variability?. *Journal of Climate* (v recenziji).