

VELIKI KROGI ATMOSFRESKIH GIBANJ

ZALA ŽNIDARŠIČ

Fakulteta za matematiko in fiziko
Univerza v Ljubljani

Predstavljene so osnovne atmosferske cirkulacije, znane kot Rossbyjevi valovi, in njihovo razširjanje po velikih krogih iz tropskih predelov v zmerne zemljepisne širine. Najprej so predstavljeni osnovni koncepti gibanj na velikih skalah, velikih krogov in Mercatorjeve projekcije. V nadaljevanju je izpeljana disprezijska relacija Rossbyjevih valov, ki omogoči nadaljnjo izpeljavo enačbe velikih krogov za Rossbyjeve valove. Na koncu so opisane nekatere posledice razširjanja Rossbyjevih valov v zmerne širine

GREAT CIRCLES OF ATMOSPHERIC WAVE MOTIONS

The concept of atmospheric Rossby waves and their propagation is presented. Description consists of the basic concepts of synoptical meteorology as well as Great circles and Mercator projection. The derivation of the Rossby wave dispersion relation is presented next, which allows the relation for Great circles to be derived. Some impacts of the Rossby waves along their Great circle paths from the tropics to the mid-latitudes are also described.

1. Uvod

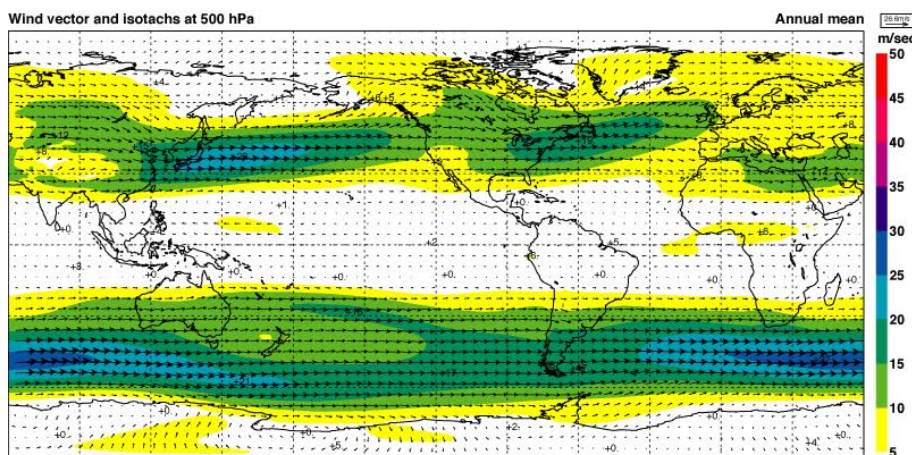
Rossbyjevi valovi so meandri zahodnih vetrov v zgornjih plasteh atmosfere, ki močno vplivajo na vreme v zmernih zemljepisnih širinah. Na razvoj Rossbyjevih valov vplivajo orografske ovire in viri potencialne energije na velikih skalah (velikostni red procesov večji od 1000 km) pri tleh, predvsem pa meridionalni gradient temperature. Smer gibanja Rossbyjevih valov ni po poteh vzporednikov, temveč velikih krogov, gibljejo se v smeri polov in v smeri vzhoda, saj imajo v običajnem primeru hitrost manjšo od prevladujočega zahodnika. Enačba opisa njihovega gibanja se lahko dobi iz barotropne ali barokline enačbe vrtinčnosti. Za opis gibanj po Zemlji potrebujemo obliko enačbe v sferičnih koordinatah, z upoštevanjem meridionalne odvisnosti zahodnega toka.

Osnovne lastnosti teh valov je leta 1939 prvič opisal švedski meteorolog Carl-Gustav Arvid Rossby, enačbe gibanja Rossbyjevih valov pa so leta 1950 vključili v prvi numerični izračun vremenske napovedi.

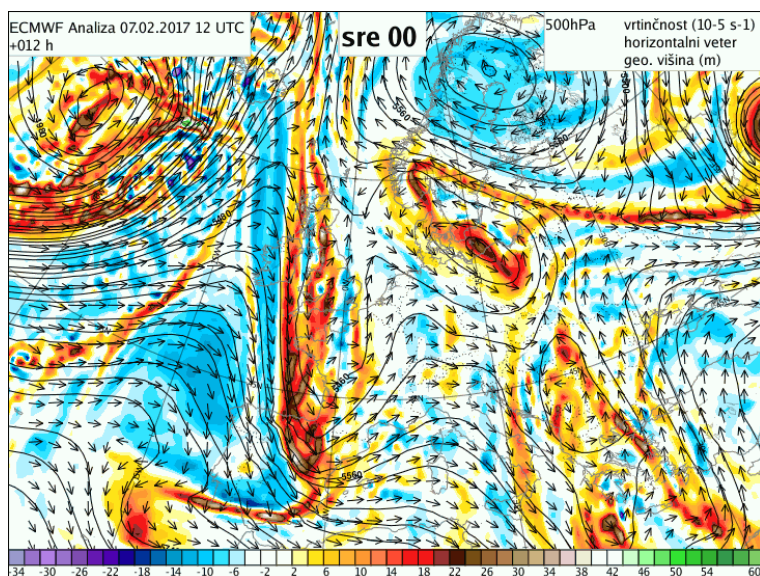
Za opis Rossbyjevih valov bodo sprva predstavljene osnovne enačbe atmosferskih gibanj in hkrati potrebne predpostavke, ki analitično rešitev omogočajo. V nadaljevanju bomo z uporabo ustrezne teorije pokazali pot do enačbe velikih krogov in na koncu predstavili osnovne posledice razširjanja Rossbyjevih valov po velikih krogih na Zemlji.

2. Koncepti

Pri opisovanju atmosferskih valovanj bomo vseskozi upoštevali koncepte, ki v sinoptični meteorologiji nasploh omogočajo analitično reševanje enačb. Obravnavana gibanja v atmosferi so na sinoptični skali velikostnega reda 1000 km in časovnega reda več dni. V višji troposferi imajo zračni tokovi v splošnem močno zahodno komponento, katere intenziteta se spreminja z letnimi časi. Hitrosti takšnega zonalnega toka so največje v bližini tropopavze in v mezosferi. Letno povprečje vetra na okoli 5.5 km je prikazano na sliki 1, kjer je vidna omenjena močna zahodna komponenta. Če obenem pogledamo trenutne karte na enaki višini, opazimo večjo ukrivljenost vetra - Rossbyjeve valove, kot je vidno na sliki 2.



Slika 1. Veter na višini 5.5 km oz. ploskvi 500 hPa[1].



Slika 2. Veter na višini 5.5 km oz. ploskvi 500 hPa[2].

2.1 Veliki krogi

Veliki krog je presečišče sfere z ravnino, ki gre skozi njeno središče[3]. Ker ima krožnica Velikega kroga najmanjšo možno ukrivljenost v primerjavi z drugimi krivuljami na sferi, je lok med dvema točkama na tej krožnici najkrajša razdalja med tema dvema točkama. Primer velikih krogov so ekvator in poldnevnik.

Enačbo razdalje med dvema točkama na velikem krogu, z referenčnima zemljepisnima širinama φ_1, φ_2 , dolžinama λ_1, λ_2 in radijem sfere a , izpeljemo z upoštevanjem transformacije iz sferičnih v kartezične koordinate. Nato zapišemo skalarni produkt za kot med točkama,

$$\cos \alpha = \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\lambda_1 - \lambda_2) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2, \quad (1)$$

in ga prevedemo na enačbo razdalje na velikem krogu,

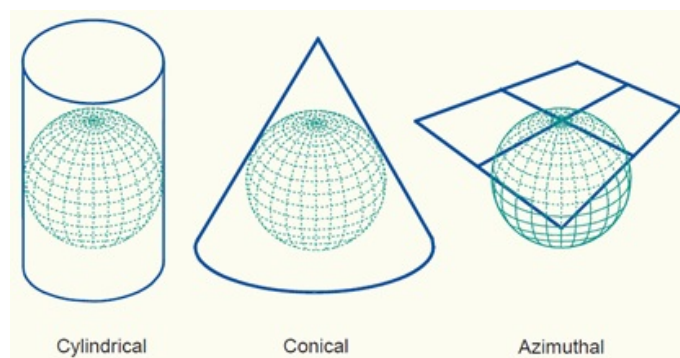
$$d = a \cos^{-1} [\cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \cos (\lambda_1 - \lambda_2) + \sin \varphi_1 \sin \varphi_2], \quad (2)$$

do podobne enačbe pa bomo prišli tudi v nadaljevanju, z upoštevanjem Rossbyjeve teorije.

2.2 Mercatorjeva projekcija

Kartografske projekcije so metode, s katerimi lahko predstavimo Zemljino ukrivljeno površino na ravnini oz. na zemljevidu. Kljub temu, da ima Zemlja v osnovi obliko geoida, za zemljevid majhne skale (npr. zemljevid sveta, ki ima običajno merilo 1:50,000,000) za referenčno obliko uporabljamo sfero z radijem $a = 6371$ km. Projekcije delimo na tri razrede, in sicer na cilindrično (valjno), stožčasto in azimutalno projekcijo, pri vsaki pa Zemljino referenčno površino projiciramo na valj, stožec oz. ravnino, ki se ji najbolj prilega[4]. Princip delovanja je prikazan na sliki 4.

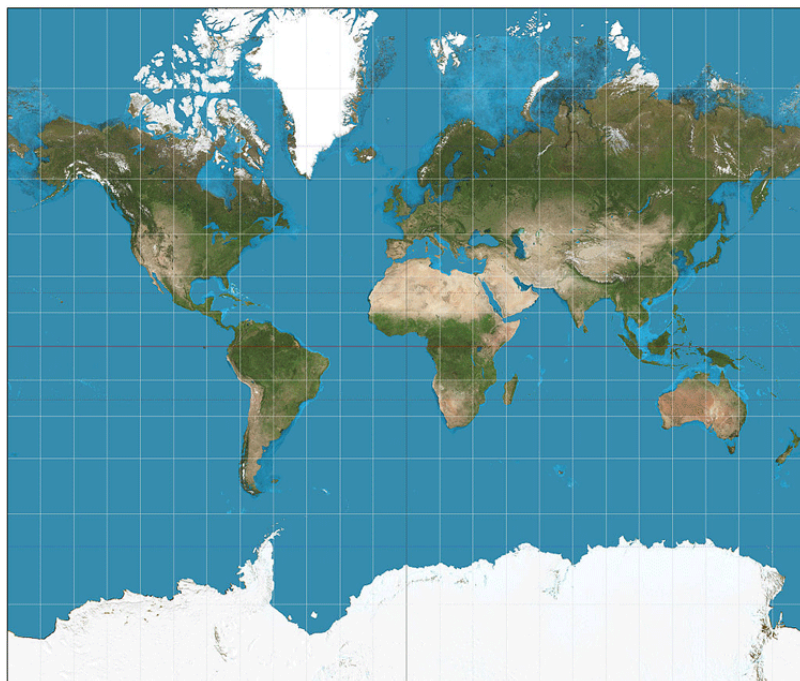
Mercatorjeva projekcija spada pod cilindrične projekcije. Poimenovana je po flamskem kartografu in geografu Gerardusu Mercatorju, projicira pa vzporednike in poldnevnik s sfere v pravokotno sekajoče se preme na ravnini, kar omogoča navigatorjem načrtovanje plovbe, saj so vse preme (imenovane loksodrome) na takšni projekciji preme konstantnega azimuta. Zanimivo je, da loksodrome pravzaprav niso najkrajše poti med dvema točkama, to so namreč prej omenjeni loki velikih krogov[4].



Slika 4. vrste projekcij - cilindrična ali valjna, stožčasta in azimutalna[4].

Idealni zemljevid bi pravilno prikazoval kote in razdalje na vseh delih zemljevida, ker pa površine sfere ni mogoče izravnati, brez da bi pri tem prišlo do raztega nekaterih delov, se pri vsakem zemljevidu srečamo tudi z določenimi popačenji.

Ker nas zanimajo valovi, ki se razširjajo iz tropskih predelov v zmerne širine, je za njihovo obravnavo primerna Mercatorjeva projekcija, saj so pri njej tovrstna popačenja v območjih polarnih predelov, ki nas ne zanimajo. Omenjena popačenja polarnih predelov so prikazana na sliki 5.



Slika 5. Mercatorjeva projekcija Zemlje[5].

Transformacija iz sferičnih koordinat (λ, φ) v kartezične koordinate (x, y) na ravnini Mercatorjeve projekcije je oblike:

$$x = a\lambda, \quad (3)$$

$$y = a \ln \frac{1 + \sin \varphi}{\cos \varphi}, \quad (4)$$

kjer koordinata x kaže v zonalni smeri (smer vzporednikov na Zemlji), koordinata y pa v meridionalni smeri (smer poldnevnikov na Zemlji). Z diferenciranjem enačb (3) in (4) dobimo:

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} = \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial x}, \quad (5)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial}{\partial \varphi} = \frac{1}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial y}. \quad (6)$$

Posledično Laplaceov operator izrazimo v obliki

$$\nabla^2 = \frac{1}{\cos^2 \varphi} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right), \quad (7)$$

potrebovali pa ga bomo pri opisu razširjanja Rossbyjevih valov.

3. Osnove atmosferskih gibanj na velikih skalah

V tem poglavju bomo najprej razložili ključne meteorološke pojme, potrebne za opis atmosferskih gibanj. S pomočjo teorije majhnih perturbacij bomo potem prišli do disperzijske relacije za Rossbyjeve valove, ki se gibljejo po velikih krogih.

Najpomembnejša količina za opis atmosferskih gibanj na velikih skalah je vrtničnost, ki predstavlja rotacijo katerekoli točke v fluidu na mikroskopski skali. Vrtničnost je vektorsko polje, definirano kot rotor hitrosti toka zraka, za gibanja na velikih skalah pa nam zadostuje vertikalna komponenta. Če obravnavamo absolutno hitrost, imamo opravka z absolutno vrtničnostjo η , če pa je hitrost relativna, obravnavamo relativno vrtničnost ζ . Povezava med njima se imenuje planetarna vrtničnost f (imenovana tudi *Coriolisov parameter*), za vse tri pa velja zveza

$$\zeta + f = \eta.$$

Relativno vrtničnost ζ definiramo kot

$$\zeta = \mathbf{k} \cdot (\nabla \times \mathbf{v}_{\text{rel}}) = \frac{\partial v}{\partial x} - \frac{\partial u}{\partial y}, \quad (8)$$

hitrost pa je horizontalna, in sicer $\mathbf{v}_{\text{h}} = (u, v)$. Planetarna vrtničnost je vrtničnost Zemlje zaradi njene rotacije,

$$f = 2\Omega \sin \varphi, \quad (9)$$

kjer je Ω krožna frekvenca vrtenja Zemlje in φ geografska širina, ζ pa je v povprečju velikostni red manjša od f .

Območja pozitivne ζ pripadajo ciklonom na severni polobli, območja negativne ζ pa ciklonom na južni polobli, oz. anticiklonom na severni polobli. Relativna vrtničnost je tako zelo prikladna za opis vremenskih pojavov v zmernih širinah[6].

Vrsta ciklonalnih in anticiklonalnih vrtnicev, superponiranih na zahodni tok, sestavlja valovni vlak Rossbyjevega vala, to pa je zaporedje valov, ki se pojavljajo v rednih intervalih[7].

3.1 Rossbyjevi valovi

Carl Gustav Rossby je osnovne lastnosti po njemu poimenovanih valov prvič predstavil v 30. letih 20. stoletja. Valovne dolžine teh valov so reda velikosti nekaj tisoč kilometrov za kratke valove, ki se razširjajo v smeri zonalnega toka, medtem ko se daljši valovi razširjajo v nasprotni smeri. Za Zemljo je Rossby uporabil **barotropni model atmosfere**, ki dobro opiše horizontalni del atmosferskih gibanj na sinoptični skali[6]. V tem poglavju bomo najprej uvedli potrebne približke, ki ustrezajo barotropnemu modelu atmosfere in jih nato uporabili pri izpeljavi disperzijske enačbe Rossbyjevih valov.

V barotropnem modelu atmosfere je ozračje homogena nestisljiva tekočina, v kateri je gostota odvisna le od tlaka, linije konstantne gostote pa sovpadajo z izobarami. Posledica tega je, da se geostrofski veter \mathbf{v}_{g} (t.i. ravnovesje Coriolisove sile in sile gradienta tlaka, ki kaže v smeri iz nižjega proti višjemu tlaku) ne spreminja z višino.

Barotropna atmosfera je močen približek dejanskega ozračja in približno velja za sloje na okoli 5 km višine daleč od značilnih vremenskih območij, kot so cikloni. Pod temi pogoji velja tudi, da je divergenca horizontalnega toka zanemarljiva, $\nabla \cdot \mathbf{v}_{\text{h}} = 0$. V barotropni atmosferi se absolutna vrtničnost ohranja, ta ohranitev pa je posledica variacije Coriolisovega parametra f z geografsko širino, imenovane β -efekt, kot je razvidno iz (9). S Taylorjevim razvojem izraza za f

$$f(\varphi) = f(\varphi_0) + (\varphi - \varphi_0)\beta(\varphi_0) + \dots$$

dobimo linaliziran **približek** β **ravnine**, in sicer, da je: $f(\varphi) = f(\varphi_0) + \beta y$, kjer je $f(\varphi_0) = f_0 \sim 10^{-4}$ in $\beta = df/dy = 2\Omega \cos\varphi$ gradient planetarne vrtničnosti pri dani geografski širini.

Enačba vrtničnosti za barotropno atmosfero s približkom β ravnine je oblike

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + u\frac{\partial}{\partial x} + v\frac{\partial}{\partial y}\right)\zeta + \beta v = 0, \quad (10)$$

[6]. Tok vetra lahko zapišemo kot vsoto zonalnega konstantnega toka in perturbacij ter perturbacij v meridionalni smeri:

$$u = \bar{u} + u', v = v', \bar{v} = 0 \quad (11)$$

iz tu pa sledi, da je $\zeta = \frac{\partial v'}{\partial x} - \frac{\partial u'}{\partial y} = \zeta'$. Na tej točki izpeljave upoštevamo tudi Helmholtzov teorem, ki pravi, da brezdivergentni tok opišemo s tokovno funkcijo ψ in brezrotacijski tok s hitrostnim potencialom χ , in sicer velja $\mathbf{v}_h = \mathbf{k} \times \nabla \cdot \psi + \nabla \chi$. Sledi, da je $\zeta = \mathbf{k} \cdot \nabla \times \mathbf{v} = \nabla^2 \psi$ in z upoštevanjem (11) enačba (10) postane

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial}{\partial x}\right)\nabla^2 \psi + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = 0, \quad (12)$$

kjer smo uporabili $v' = \frac{\partial \psi}{\partial x}$ zaradi $\nabla \cdot \mathbf{v}_h = 0$. Tedaj sta perturbaciji valovne funkcije v x in y smeri $u' = -\frac{\partial \psi'}{\partial x}$ in $v' = \frac{\partial \psi'}{\partial x}$ ter posledično $\zeta' = \nabla^2 \psi'$. Enačba (12) je z upoštevanjem slednjega oblike

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u}\frac{\partial}{\partial x}\right)\nabla^2 \psi' + \beta \frac{\partial \psi'}{\partial x} = 0. \quad (13)$$

Uporabimo nastavek horizontalne valovne funkcije, ki je:

$$\psi' = \psi'_0 e^{kx+ly-\omega t} \quad (14)$$

k in l pa sta zonalno in meridionalno valovno število ter ω frekvenca vala.

Ko zgornje približke hitrosti (10) in valovni nastavek (11) vstavimo v (12), dobimo **disperzijsko relacijo za Rossbyjeve valove**:

$$\omega - \bar{u}k = -\frac{\beta k}{K^2} \quad (15)$$

kjer je K horizontalno valovno število, $K^2 = k^2 + l^2$.

Grupna hitrost valov je $\mathbf{c}_g = (u_g, v_g)$, kjer sta

$$u_g = \frac{\partial \omega}{\partial k} = \frac{\omega}{k} + \frac{2\beta k^2}{(k^2 + l^2)^2} \quad (16)$$

in

$$v_g = \frac{\partial \omega}{\partial l} = \frac{2\beta kl}{(k^2 + l^2)^2}, \quad (17)$$

vektor grupne hitrosti pa je pravokoten na smer valovnih črt. Upoštevajoč zvezo $c = \frac{\omega}{K}$ dobimo zonalno fazno hitrost

$$c = \frac{\beta}{K^2} \quad (18)$$

v zahodni smeri, in sicer relativno glede na zahodni tok \bar{u} .

Za stacionarne valove velja $\omega \sim 0$, stacionarno valovno število pa je $K_s = \frac{\beta^2}{\bar{u}}$. Enačbo valovnega vlaka dobimo iz razmerja komponent grupne hitrosti:

$$\frac{dy}{dx} = \frac{v_g}{u_g} = \frac{l}{k}. \quad (19)$$

4. Enačba gibanja po velikih krogih

V tem poglavju bomo uporabili približek toka zraka s konstantno kotno hitrostjo, $\bar{u}_m = a\bar{\Omega}$, kjer indeks m predstavlja Mercatorjevo projekcijo, saj tako dobimo analitično rešitev za enačbo velikega kroga, ki se le malo razlikuje od rešitve z uporabljenim realističnim zonalnim zračnim tokom[7]. Enačba za projicirano β_m je oblike

$$\beta_m = \frac{2 \cos^2 \phi}{a} (\Omega + \bar{\omega}), \quad (20)$$

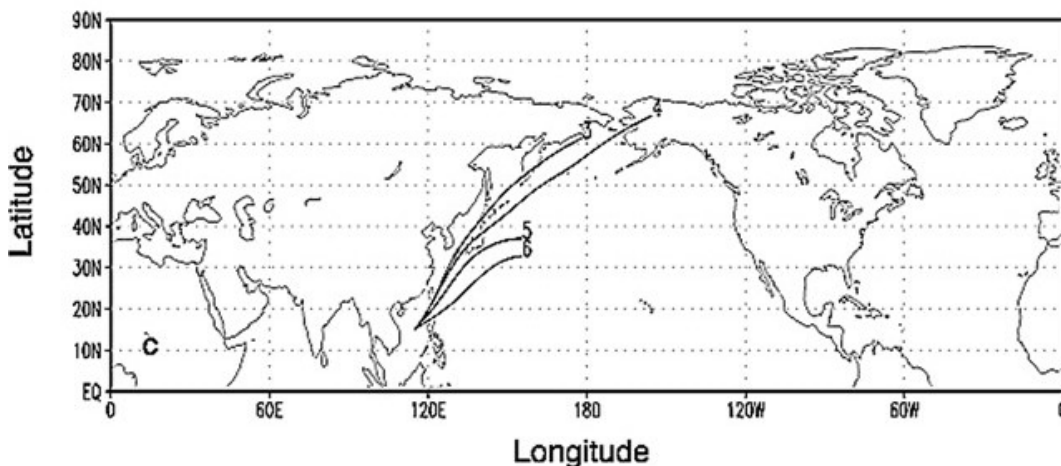
stacionarno valovno število pa je izraženo z $K_s = \frac{1}{\epsilon a} \cos \phi$, kjer velja $\epsilon^2 = \bar{\omega}[2(\Omega + \bar{\omega})]^{-1}$. Žarki so tako dani z enačbo

$$\frac{dy}{dx} = \left(\frac{K_s^2}{k^2} - 1 \right)^{1/2} \quad (21)$$

Uporabimo enačbo (17) in transformacijo $\frac{d\phi}{d\lambda} = \cos \phi \frac{dy}{dx}$, na tej točki pa lahko integriramo (19) v končno **enačbo velikega kroga**, ki poteka skozi geografsko dolžino $\lambda = \lambda_0$ in geografsko širino $\phi = 0$:

$$\tan \phi = \tan \alpha \sin(\lambda - \lambda_0) \quad (22)$$

kjer je $\cos \alpha = \epsilon a k$ [7]. Geografsko širino $\phi = \alpha$ doseže, ko je $K_s = k$, kot je vidno iz (19). Kljub temu, da smo pri izpeljavi ubrali poenostavljeni pristop, da bi dobili analitično rešitev, se rezultati opazovanj in numeričnih simulacij skladajo z navedeno rešitvijo (19), to pa je prikazano na sliki (6).



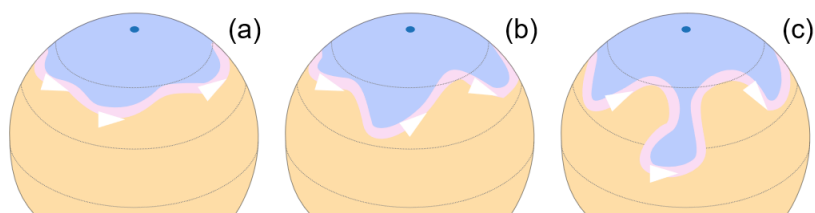
Slika 6. 30-dnevne opazovane poti Rossbyjevih valov z virom v točki, številke pri krivuljah označujejo valovno število vala[8].

Že sam primer je karta porazdelitve anomalij geopotencialne višine, kjer so vidni valovni vlaki, sestavljeni iz alternirajočih pozitivnih in negativnih anomalij, ki se širijo iz začetnega ekvatorialnega območja vira toplote, proti polu, se nato odklonijo proti vzhodu in na koncu nadaljujejo pot v ekvatorialni smeri (slika 8).

5. Posledice Rossbyjevih valov

Ko se Rossbyjevi valovi razširjajo po Zemlji, vplivajo na vreme na območjih, nad katera pridejo. V primeru, ko postane amplituda Rossbyjevega vala zelo velika, se val "lomi" in spreminja osnovni tok, na posameznem območju pa tako anticikloni in cikloni dlje časa vplivajo na vreme. Primer tega je

prikazan na sliki (7).

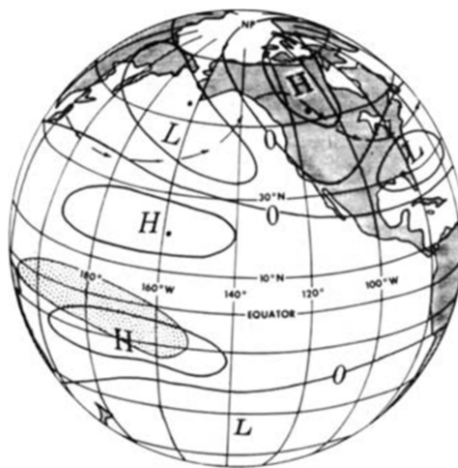


Slika 7. Razvoj meandra na severni polobli v (a) in (b) ter odcepitev mase hladnega zraka v (c), oranžna barva prikazuje tople zrak, modra hladnega zraka, roza pa vetrovni stržen[9].

Od konca 19. stoletja govorimo o **atmosferskih telepovezavah**, ki opisujejo vplive dogajanj v ozračju na enem območju na drugo območje, ki je daleč stran, kot npr. vpliv El Niña na sezonske lastnosti vremena v Severni Ameriki ali Evropi. Večina telepovezav je opisana statistično.

Za zmerne geografske širine raziskave nakazujejo možen obstoj telepovezav le v primeru, ko se zahodni tokovi raztezajo iz srednjih geografskih širin proti ekvatorialni troposferi nad območje toplotnega vira[10]. Za severno poloblo pa je ta pogoj izpolnjen le v zimski polovici leta.

Prenos toplote v troposfero je večji nad toplejšimi površji oceanov v tropih, kot je to vidno pri pojavu El Niño, ravno anomalije te tropске konvekcije pa so med drugim vzrok atmosferskih Rossbyjevih valov, ki se propagirajo v smeri polov in vzhoda ter so pojasnilo mnogih opazovanih statističnih povezav med območji nizkih in višjih geografskih širin[11].



Slika 8. Zimske anomalije geopotenciala v zgornji troposferi, imenovane PNA, v obdobju El Niña v tropskem delu Pacifika; osenčeno je območje povečane količine padavin v tropih, H in L pa označujeta pozitivne oz. negativne anomalije[6].

To prikazuje slika 8, kjer je prikazan vzorec zimskih anomalij geopotenciala *Pacific North America* - PNA v obdobju El Niña v tropskem delu Pacifika, vzorec pa se propagira vzdolž poti velikega kroga. Pozitivne anomalije geopotenciala (oz. pozitivna vrednost PNA) so označene s črko H in so povezane s fazami El Niña, negativne (oz. negativna vrednost PNA) pa s črko L in so povezane s fazami El Niña.

PNA vzorec je v tesni povezavi s temperaturo in padavinami v Severni Ameriki in med pozitivno fazo PNA na zahodnem delu Severne Amerike povzroči nadpovprečne temperature, na juhovzhodnem in južnem delu Severne Amerike pa podpovprečne temperature[12].

Na začetku obravnave smo predpostavili, da so Rossbyjevi valovi približno horizontalno gibanje. V primeru, ko pa je njihovo gibanje nagnjeno od horizontale, postanejo Rossbyjevi valovi ključni za transport gibalne količine in toplote, tedaj pa lahko pride do pojava, imenovanega **nenadno stratosfersko segrevanje**. Medtem ko je na južni polobli polarna stratosfera izrazito hladna in ne doseže temperature 180 K, se na severni polobli stratosfera ne more tako močno ohladiti. Ko

pride do nenadnega stratosferskega segrevanja, se polarni vrtinec zahodnih vetrov pozimi v obdobju nekaj dni močno upočasni ali skoraj ustavi, to pa vodi v povišanje temperature v stratosferi za več deset stopinj Celzija[13].

6. Zaključek

Z uporabo približka barotropne atmosfere je možen opis razširjanja atmosferskih valov iz tropskih območij proti poloma. Pri tem so pomembni dejavniki viri potencialne energije v tropskih predelih, orografske ovire in meridionalni gradient temperature. Vpliv tovrstnih valov je izjemno pomemben za dolgoročne napovedi v zmernih širinah, zato je ključno razumevanje tega procesa, ker ga le tako lahko opišemo v prognostičnih modelih. Pomembne so tudi interakcije tovrstnih valovanj z drugimi atmosferskimi in oceanskimi pojavi, predvsem z oscilacijami El Niño, opis teh interakcij pa je mnogo bolj obširen, kot osnovne relacije, ki so predstavljene v tem članku.

7. Zahvala

Zahvaljujem se mentorici prof. dr. Nedjeljki Žagar za predloge in popravke.

LITERATURA

- [1] *Pressure level climatologies (latitude-longitude projections) - Wind vector with isotachs at 500hPa*, [ogled: 7.2.2017], dostopno na: http://ecmwf.com/s/ERA-40_Atlas/docs/section_D/parameter_vwwia500hpa.html
- [2] *Hitrost vetra, vrtinčnost in geopotencialna višina na 500 hPa*, [ogled: 7.2.2017], dostopno na: <https://vispro.arso.gov.si/>
- [3] *Great circles*, [ogled 21.1.2017], dostopno na: <http://mathworld.wolfram.com/GreatCircle.html>
- [4] *Map projections*, [ogled 3.1.2017], dostopno na: <https://kartoweb.itc.nl/geometrics/Map%20projections/mappro.html>
- [5] *Types of Map Projections*, [ogled 3.1.2017], dostopno na: <https://www.geolounge.com/types-map-projections/>
- [6] Holton, J.R., *An introduction to Dynamic Meteorology*, Elsevier, (2004).
- [7] Hoskins, B. J., Karoly, D. J., *The Steady Linear Response of a Spherical Atmosphere to Thermal and Orographic Forcing*, J. Atmos. Sci., **38**, 1189 (1981).
- [8] Lu, C., Boyd, J., *Rosby Wave Ray Tracing in a Barotropic Divergent Atmosphere*, J. Atmos. Sci., **65**, 1679 (2008).
- [9] *Rosby Waves*, [ogled 21.1.2017], dostopno na: https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/7/72/Jetstream_-_Rosby_Waves_-_N_hemisphere.svg
- [10] Trenberth, K.E. et al., *Progress during TOGA in understanding and modeling global teleconnections associated with tropical sea surface temperatures*, J. Geophys. Res., **103**, 14291, (1998).
- [11] Horel, J.D., Wallace J.M., *Planetary-Scale Atmospheric Phenomena Associated with the Southern Oscillation*, Mon. Wea. Rev., **109**, 813 (1981).
- [12] *Pacific North America Pattern*, [ogled 3.1.2017], dostopno na: <http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml>
- [13] Hartmann, D., *Global Physical Climatology*, Elsevier Science, (2016).