



Kvaziresonančna amplifikacija valov in njene posledice

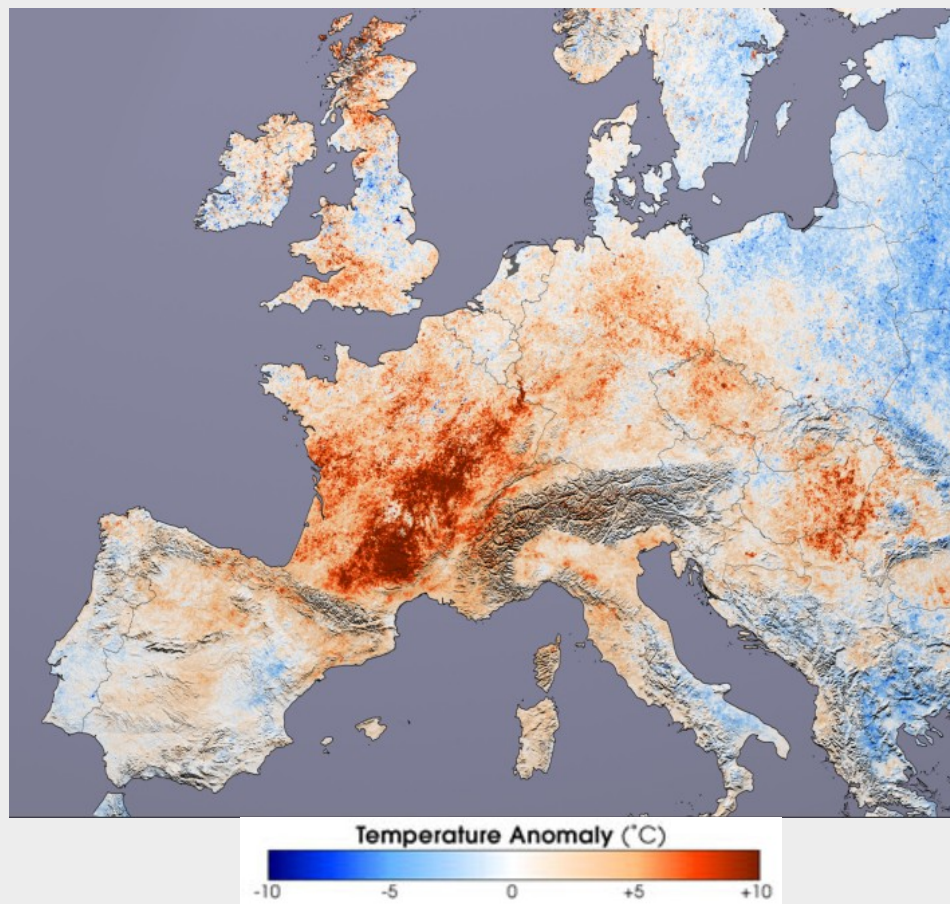
Ekstremni poletni vremenski dogodki

- Vročinski valovi:

- Evropa 2003 ↔
- Rusija 2010
- ZDA 2011

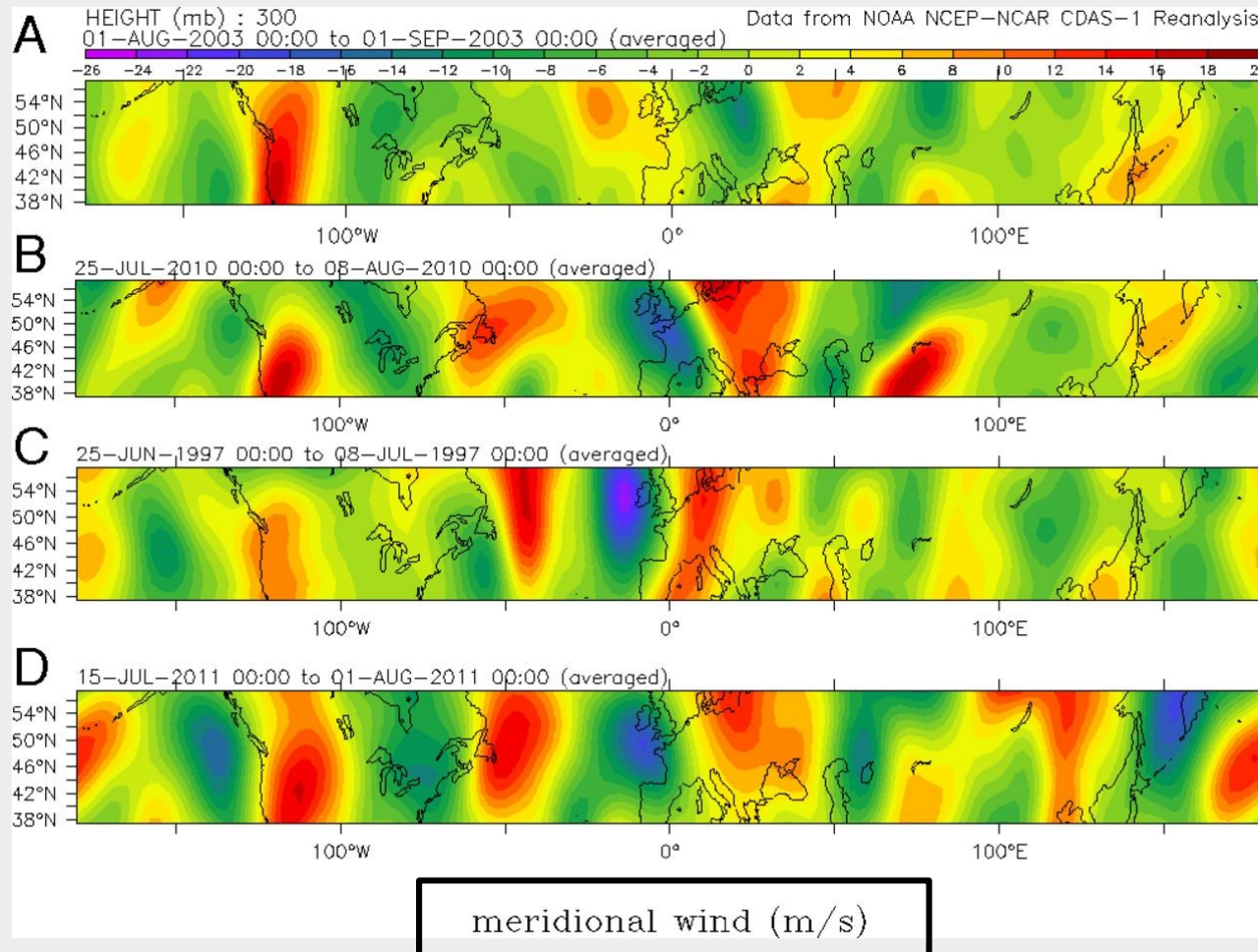
- Poplave:

- Osrednja Evropa 1997
- Pakistan 2010
- Balkan 2013



<https://earthobservatory.nasa.gov/images/3714/european-heat-wave>

Lastnosti dogodkov



- velika amplituda Rossbyevih valov
- persistentni vremenski vzorci
- hipoteza mehanizma: kvazi-resonančna amplifikacija stacionarnih Rossbyevih valov

Zgradba seminarja

- prosti Rossbyevi valovi
- siljeni Rossbyevi valovi
- kvazi-resonančna amplifikacija Rossbyevih valov
- lastnosti in posledice resonance

Prosti barotropni Rossbyevi valovi

1) Enačba barotropne vrtinčnosti

$$\frac{d_h}{dt}(\zeta+f)=0 \quad \longleftrightarrow \quad \left(\frac{\partial}{\partial t}+u\frac{\partial}{\partial x}+v\frac{\partial}{\partial y}\right)\zeta+\beta v=0$$

2) Lineariziramo

$$u=\bar{u}+u' \quad \bar{v}=0$$

$$v=\bar{v}+v'=v'$$

$$\zeta=\frac{\partial v'}{\partial x}+\frac{\partial u'}{\partial y}=\zeta'$$

3) Tokovnice

$$\left. \begin{aligned} u' &= \frac{-\partial \psi'}{\partial y} \\ v' &= \frac{\partial \psi'}{\partial x} \end{aligned} \right\} \zeta' = \nabla^2 \psi'$$

4) Končna enačba

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

5) Rešitev

$$\psi' = \text{Re} [\psi e^{i(kx+ly-\omega t)}]$$

6) Disperzijska relacija in fazna hitrost

$$\omega = c k \quad \swarrow \quad \omega = \bar{u} k - \beta \frac{k}{K^2}$$
$$c - \bar{u} = \frac{-\beta}{K^2} \quad \swarrow \quad K^2 = k^2 + l^2$$

Valovi so stacionarni ko:

$$K^2 \equiv K_s^2 = \frac{\beta}{\bar{u}}$$

Siljeni barotropni Rossbyevevi valovi

Topografski

Diabatni

1) Enačba barotropne potencialne vrtinčnosti

$$\frac{d_h}{dt} \left(\frac{\xi + f}{h} \right) = 0 \quad h(x, y) = H - h_T(x, y) \quad \text{topografija}$$

2) Nizka topografija in kvazigeostrofsko skaliranje

$$h_T \ll H \text{ in } |\xi_g| \ll |f_0| \quad \text{Charney-Eliassen model}$$

$$\Rightarrow \left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \right) (\xi_g + f) = \frac{-f_0}{H} \frac{d h_T}{dt}$$

3) Lineariziramo in dodamo linearno dušenje ξ_g

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \bar{u} \frac{\partial}{\partial x} \right) \nabla^2 \psi' + \beta \frac{\partial \psi'}{\partial x} = \frac{-f_0}{H} \bar{u} \frac{\partial h_T}{\partial x} - r \nabla^2 \psi'$$

Karakteristični
čas trajanja
vrtincev (5 dni)

$$r = \frac{1}{\tau_e}$$

4) Oblika topografije in rešitve

$$h_T(x, y) = \text{Re}[h_0 e^{ikx}] \cos(ly)$$

$$\psi'(x, y) = \text{Re}[\psi_0 e^{ikx}] \cos(ly)$$

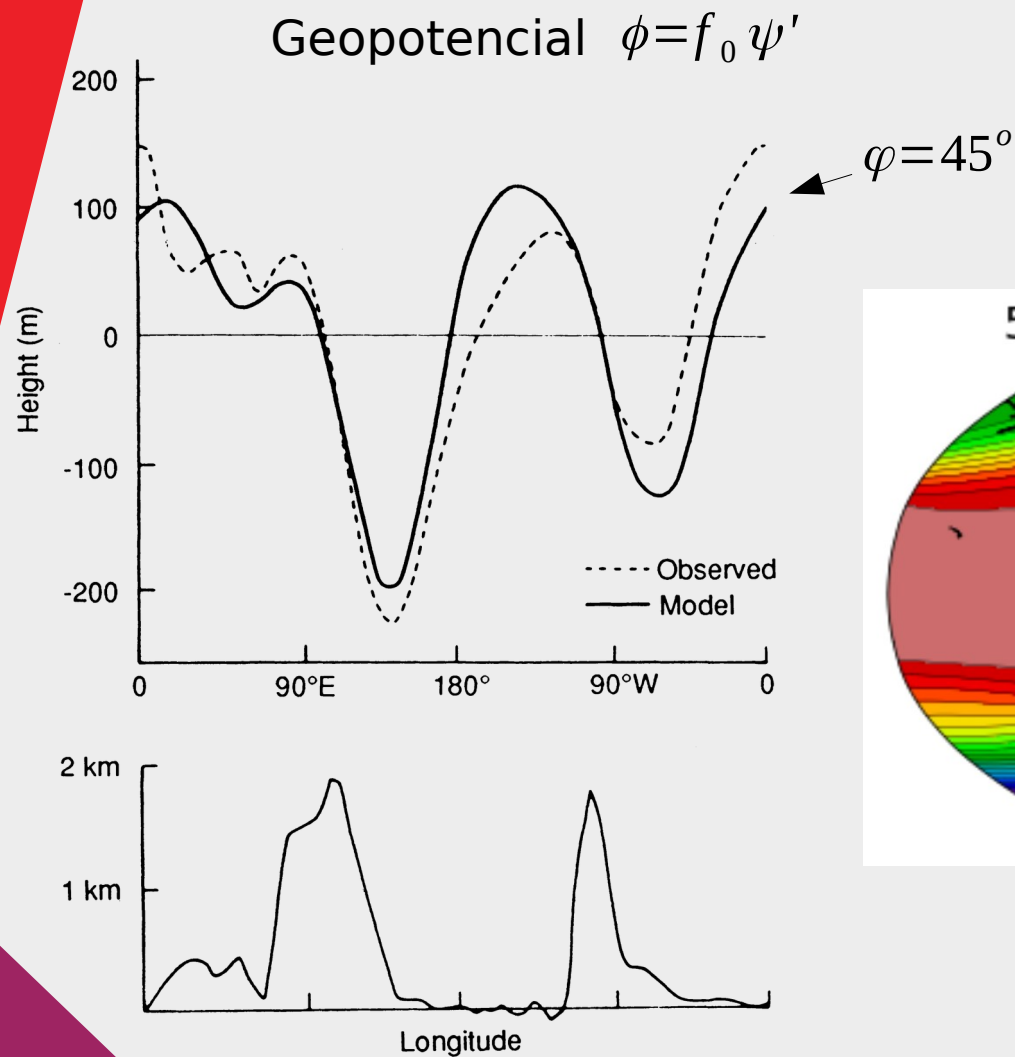
5) Vstavimo v enačbo in dobimo

$$\psi_0 = \frac{f_0 h_0}{H((K^2 - K_s^2) - i\varepsilon)} \quad \varepsilon = \frac{r K^2}{k \bar{u}}, \quad K_s = \frac{\beta}{\bar{u}}$$

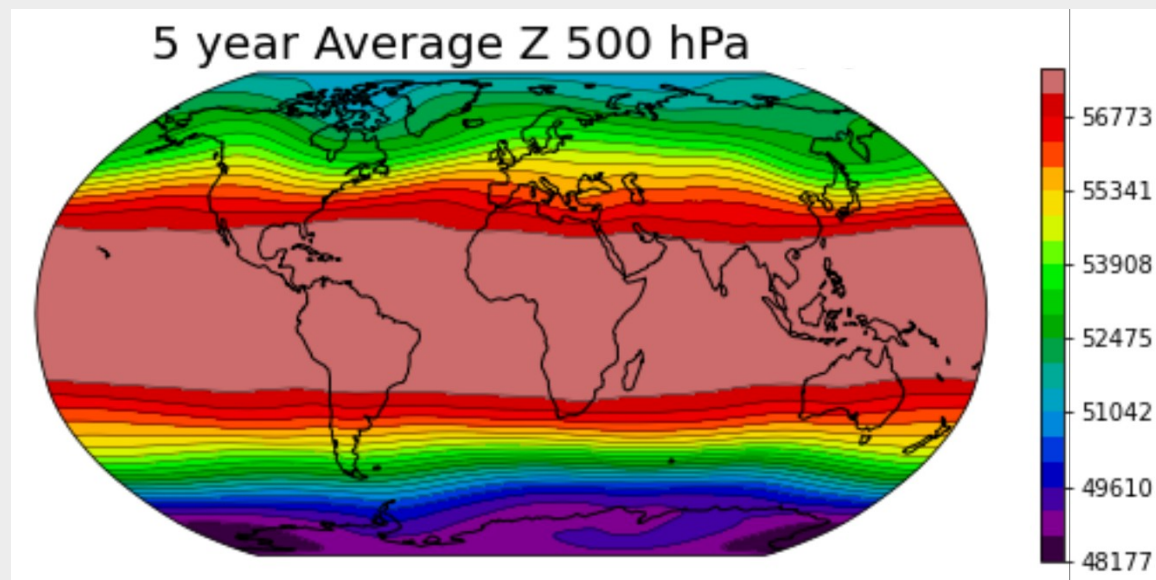
stacionarno valovanje sprememba faze

- resonančni vrh pri stacionarnih valovih
- energija se premika z grupno hitrostjo ($c_g > c = 0$):
 - če imamo diabatno segrevanje ali topografsko siljenje => amplituda se v smeri toka večja

S Fourierovim razvojem realne topografije lahko rešitev zapišemo za realno topografijo severne poloble.



Rešitev je izračunana za povprečen zonalni tok 17 m/s in $H = 8$ km.



ERA5 5 letno povprečje

Holton: Fig 7.15

Izvlečki

- prosti Rossbyevi valovi so šibki
- stacionarni Rossbyevi valovi:
 - so posledica siljenja topografije in diabatnih procesov
 - diabatno siljenje zelo različno nad kopnim in morjem
 - vplivajo na zonalni tok, kar vpliva na proste Rossbyeve valove
 - valovi velikih amplitud so resonančna stanja
 - prinašajo persistentne vremenske vzorce in pogosto vremenske ekstreme

Kvazi-resonančna amplifikacija valov

- Valovi so podvrženi:
 - odbojem
 - uklonu
 - dispeziiji
 - resonanci
- Tokovodnik ima:
 - visoko odbojnost na severnem in južnem robu
 - majhno meridionalno dispeziijo valov
- Kvazi-resonančna amplifikacija valov
 - prost Rossbyev val (k) ujet v tokovodnik resonira s siljenim (statičnim) valom (m) (in si poveča amplitudo)

Tokovodnik

- opazujemo prost val z valovnim št. $k \approx m$

1) Linearizirana barotropna vrtinčnost na sferi

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

$$x = a \lambda$$

$$y = a \ln[(1 + \sin \varphi) / \cos \varphi]$$

$$\beta = \frac{2\Omega}{a} \cos^2 \varphi - \frac{d}{dy} \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{d}{dy} \left(\frac{\bar{u}}{\cos \varphi} \cos^2 \varphi \right)$$

↑
linearizirana barotropna
vrtinčnost na ravnini

2) Nastavek

$$\psi = e^{i \frac{k}{a} x + l y - \omega t}$$

3) Disperzijska relacija

$$\omega = \frac{\bar{u}}{\cos \varphi} K - \frac{K}{K^2 + l^2} \left[\frac{2\Omega}{a} \cos^2 \varphi - \frac{d}{dy} \frac{1}{\cos^2 \varphi} \frac{d}{dy} (\cos \varphi) \right]$$

\nwarrow $K = \frac{k}{a}$

3) Kvazi-stacionarni valovi

$$\omega \approx 0$$

$$K_s = \frac{\beta \cos \varphi}{\bar{u}}$$

4) Upoštevamo $K_s^2 = K^2 + l^2 \Rightarrow l^2 = \frac{\beta \cos \varphi}{\bar{u}} - K^2$

In na koncu dobimo:

$$l^2 = \frac{2\Omega \cos^3 \varphi}{a\bar{u}} - \frac{\cos^2 \varphi}{a^2 \bar{u}} \frac{d^2 \bar{u}}{d\varphi^2} + \frac{\sin \varphi \cos \varphi}{a^2 \bar{u}} \frac{d\bar{u}}{d\varphi} + \frac{1}{a^2} - \left(\frac{k}{a}\right)^2$$

- opazujemo kateri l ustreza stacionarnim valom danega k
- odvisnost od meridionalne ukrivljenosti, strmine in vrednosti zonalne hitrosti vetra (jet streama)

- Tokovodnik:

- turining point (TP): $l^2 = 0$

- $\psi = e^{i \frac{k}{a} x}$

- l^2 deluje kot lomni količnik

- med TP velja $l^2 > 0$ in $u > 0$

- $u > 0$ v bližini TP

- \Rightarrow močan odboj valov na S in J robu

- \Rightarrow območje med dvema TP je tokovodnik



Holton Fig. 10.15

Siljeni valovi

1) Linearizirana barotropna vrtinčnost na sferi s siljenjem

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \frac{\bar{u}}{\cos \varphi} \frac{\partial}{\partial x}\right) \nabla^2 \psi + \beta \frac{\partial \psi}{\partial x} = F_{eff}$$

$$F_{eff} = \underbrace{\frac{2\Omega \sin \varphi \cos^2 \varphi}{a T_c} \frac{\partial \hat{T}}{\partial \lambda}}_{\text{termalno siljenje}} - \underbrace{\frac{2\Omega \sin \varphi \cos^2 \varphi}{a H} \frac{\partial h_{or}}{\partial \lambda}}_{\text{orografsko siljenje}} \quad \left\langle \right\rangle \quad F_{eff} = \frac{-f_0}{H} \bar{u} \frac{\partial h_T}{\partial x}$$

$\kappa = \frac{\bar{u}_{or}}{\bar{u}(300 hPa)}$

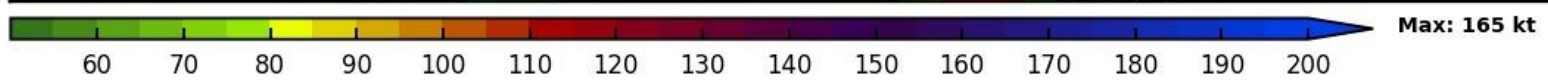
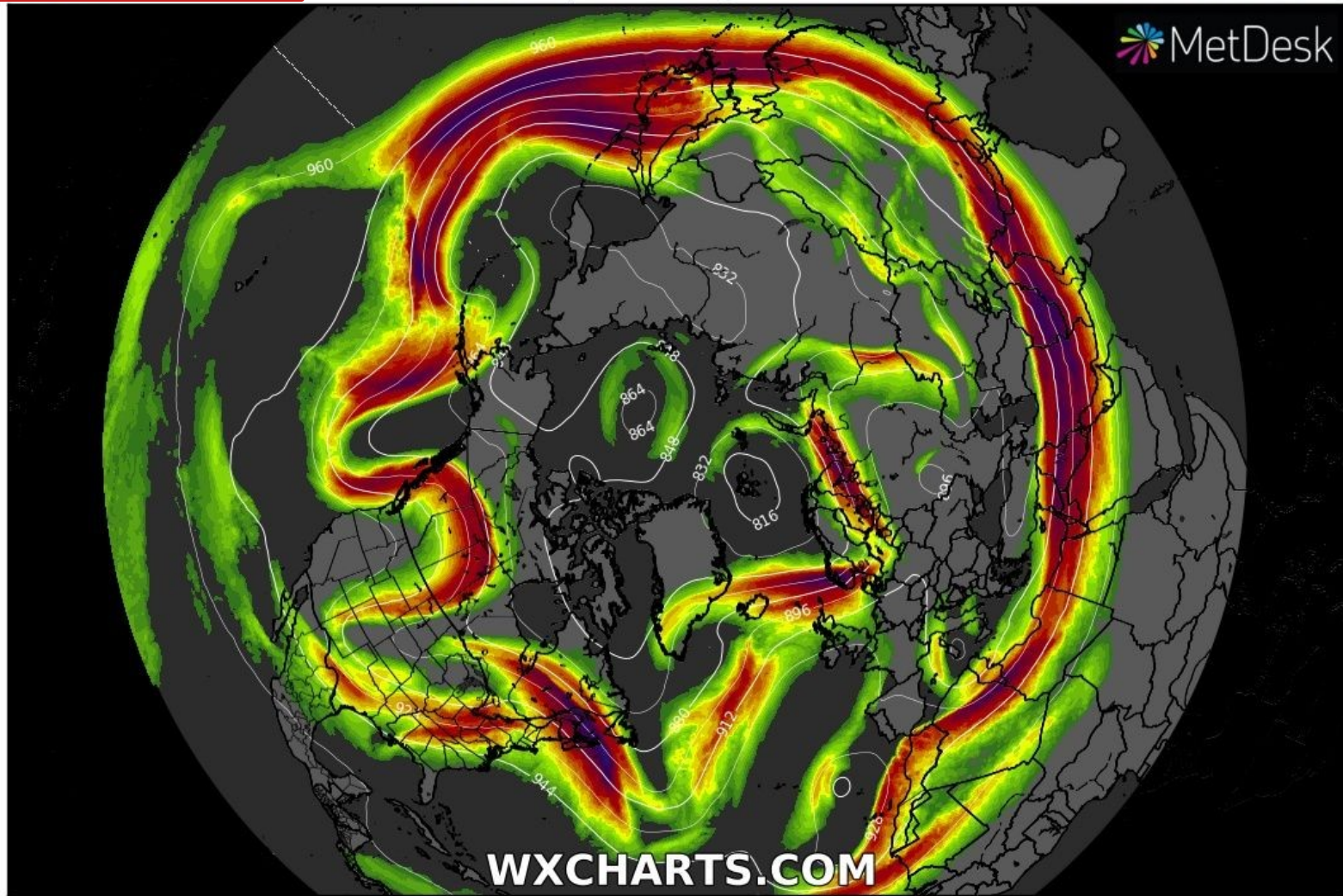
referenčna temperatura 200 K na ravnini smo imeli to

- opisuje siljene valove na sferi
- za valovna števila $m = 6, 7, 8$ na severni polobli amplitude običajno majhne
- ob prisotnosti tokovodnika lahko siljeni stacionarni valovi močno amplificirajo amplitudo kvazistacionarnega prostega Rossbyevega vala s $k \approx m$

300 hPa Wind (kt)
GFS 0.25°

300 hPa Geopotential Height Contoured

Run: Thu 9 Feb 18Z
Valid: Thu 9 Feb 21:00 UTC



<https://wxcharts.com> - GFS

Amplituda ujetega prostega vala

$$A_m = \frac{A_{\text{eff}}}{\sqrt{\left[\left(\frac{k}{a} \right)^2 - \left(\frac{m}{a} \right)^2 \right]^2 + \left(\frac{L}{a^2} + \frac{R^2}{L} \right)^2 \left(\frac{m}{a} \right)^2}}$$

↑
rezonanca ko $k = m$

$$\kappa = \frac{\bar{u}_{\text{or}}}{\bar{u}(300 \text{ hPa})}$$

$R = \kappa R_0$, kjer je $R_0 = 0.135$ Rossbyevo število:

$L = \kappa L_0$, kjer je $L_0 = 600 \text{ km}$ Rossbyev radij:

$A_{\text{eff}} = FFT(F_{\text{eff}})$ amplituda siljenja

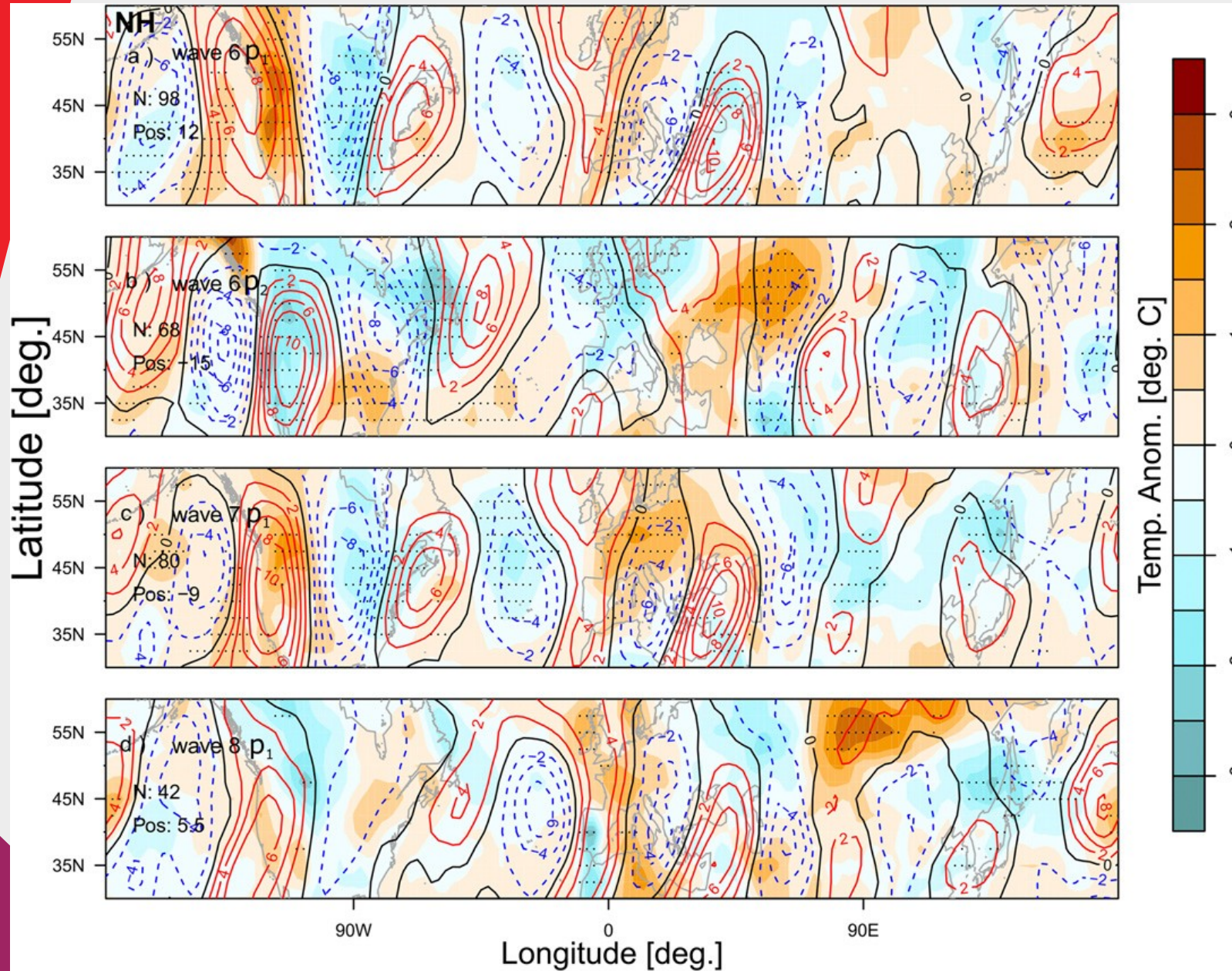
Pogoji za kvazi-rezonančno amplifikacijo valov

- obstaja tokovodnik za prosti val k
- prosti val ima podobno valovno število kot siljeni val $k \approx m$
- amplituda siljenja mora biti dovolj velika

Rezultati analiz

- resonanca se pojavi ob močnih, ozkih jet streamih
- na severni polobli mora biti prisoten tudi sekundaren jet na visokih geografskih širinah
- NH: $k = 6,7,8$ (šibkejši zonalni tok)
- SH: $k = 4,5$ (močnejši zonalni tok)
- na NH trajajo povprečno 5, na SH pa 7 dni
- na SH so tudi veliko bolj pogosti kot na NH
- resonance so bolj verjetne pri “priljubljenih” fazah valov (npr. glede na datumsko mejo)
 - porazdelitev topografije
 - porazdelitev kopna in morja
- globalno segrevanje poveča verjetnost za ekstremne vremenske dogodke, kvaziresonančna amplifikacija jih lahko dodatno amplificira

Močna kvazi-resonančna amplifikacija



Pike so obmostatično
no
signifikantne
razlike v
temperaturi

Negativne
meridionalne
hitrosti: modre
konture,
pozitivne:
rdeče konture

Zaključek

- rossbyevi valovi:
 - igrajo ključno vlogo pri vremenu na sinoptičnih skalah
 - interagirajo z orografijo, diabatsnimi procesi in drug z drugim
- kvazi-statični prosti valovi ujeti v tokovodnik lahko signifikantno povečajo svojo amplitudo v procesu kvazi-resonančne amplifikacije
- kvaziresonančna amplifikacija stacionarnih Rossbyevih valov lahko pripelje do ekstremnih persistentnih vremenskih dogodkov
- takšni dogodki lahko dodatno poslabšajo efekt globalnega segrevanja