

# **Povezanost konvekcije u omotaču sa promenama orbitalnih parametara na geološkim vremenskim skalama**

**Petar Glišović**

GEOTOP, Université du Québec à Montréal

Seminar Katedre za astronomiju, Matematički fakultet,  
Univerzitet u Beogradu, 8. Jul 2014.

## Uvod - Pojam termalne konvekcije

- Termalna konvekcija je pojava hidrodinamičke nestabilnosti, koja nastaje kao rezultat gravitacionih sila na termalno generisanu anomaliju gustine u sloju fluida koji je zagrevan odozdo ili unutar, ili hlađen odozgo.

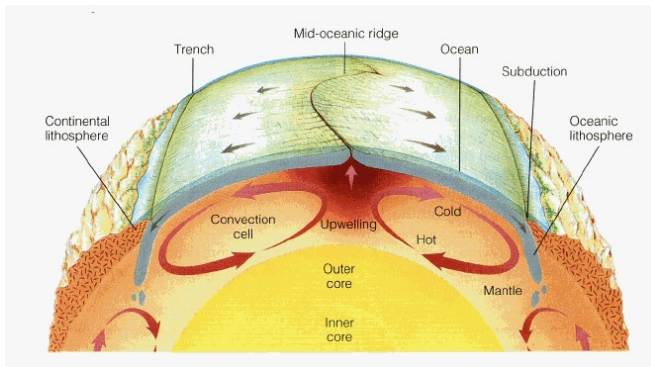


Figure : <http://www.geosci.usyd.edu.au/users/prey/Teaching/Geol-3101/Mountain02/images/convection.gif>

## Uvod - Omotač terestijalne planete

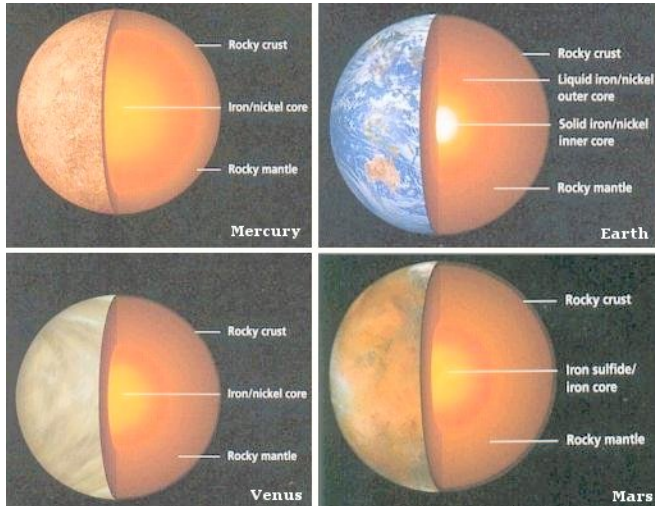
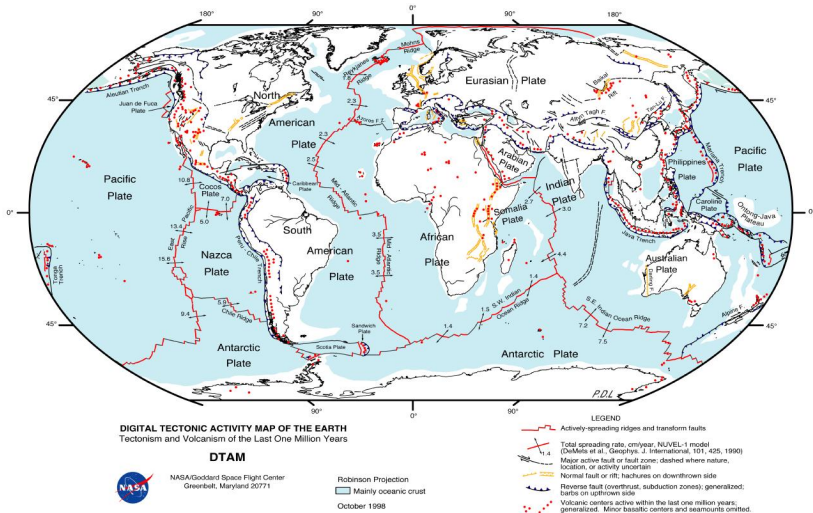


Figure : <http://universe-review.ca/I07-04-inner2.jpg>

## Uvod - Fluidnost čvrstog omotača

- Fluidnost čvrstog omotača proizilazi iz činjenice da svi prirodni, kristalni materijali (npr. metali, minerali) sadrže mikroskopske defekte. Dokle god je prisutan napon propagacija mikroskopskih defekata u stenama omotača dozvoljava omotaču vrlo sporo kretanje (Nicolas & Poirier, 1976).

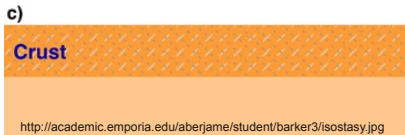
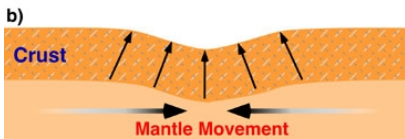
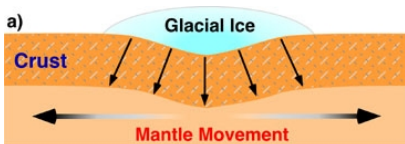
# Uvod - Indikatori fluidnosti čvrstog omotača



G221.001

Figure : [http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/images/schematic\\_map.jpg](http://denali.gsfc.nasa.gov/dtam/images/schematic_map.jpg)

# Uvod - Indikatori fluidnosti čvrstog omotača



<http://en.wikipedia.org/wiki/Post-glacial/rebound>

## Uvod - Izvori energije

Pretpostavlja se da energija koja inicira konvekciju omotača nastaje:

- transferom toplote na granici između omotača i jezgra (tzv. CMB), koji je povezan sa hlađenjem spoljašnjeg i prirastom unutrašnjeg dela jezgra, i
- raspadom radioaktivnih izotopa ( $^{40}\text{K}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$  i  $^{232}\text{Th}$ ) koji su prisutni u omotaču.

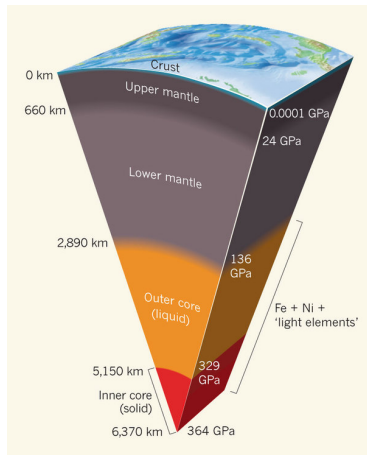


Figure : T. S. Duffy, 2011, Probing the core's light elements, *Nature* 479, 480-481, doi:10.1038/479480a

## Numerički metod - Direktan problem termalne konvekcije

Standardne hidrodinamičke jednačine koje opisuju principe održanja mase (1), momentuma (2), i energije (3):

$$\nabla \cdot (\rho_0 \mathbf{u}) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\rho}{\alpha_s \Delta T} \nabla \varphi - \nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = 0 \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\mathbf{u} \cdot \nabla T + \frac{1}{\rho_0 Ra_s} (\nabla \cdot k \nabla T + Q) + \frac{Di}{\rho_0} (-\alpha T \rho_0 g_0 u_r + \Phi) \quad (3)$$

method),



## Numerički metod - Inverzan problem termalne konvekcije

- Standardna jednačina održanja energije za direktan problem

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot k \nabla T + \alpha T \frac{dp}{dt} + \Phi + Q$$

## Numerički metod - Inverzan problem termalne konvekcije

- Standardna jednačina održanja energije za direktan problem

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = -\rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T + \nabla \cdot k \nabla T + \alpha T \frac{dp}{dt} + \Phi + Q$$

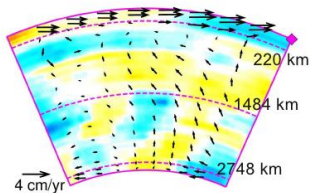
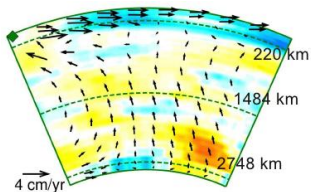
- Kvazi-reverzibilna (QRV) metoda za inverzno modelovanje (Lattés et al., 1969; Ismail-Zadeh et al, 2007)
  - ▶ Inverzna jednačina održanja energije:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} + \beta \Delta^2 \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right) = \rho c_p \mathbf{u} \cdot \nabla T - \nabla \cdot k \nabla T - \alpha T \frac{dp}{dt} - \Phi - Q$$

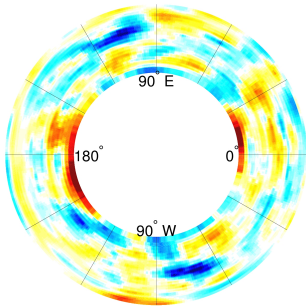
gde je  $\beta$  mali, pozitivan regularizacioni parametar, i  $\Delta^2 \left( \frac{\partial T}{\partial t} \right)$  je biharmonijski, difuzionog-tipa operator.

## Mehanički granični uslov na površini omotača

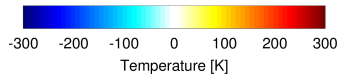
- Mobilne čvrste ploče (P) čije kretanje je posledica fluidnog omotača.



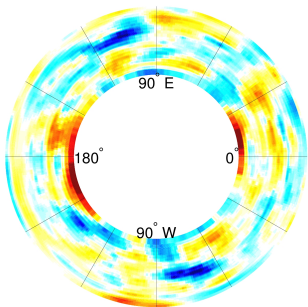
# Inicijalni uslov i referentna svojstva



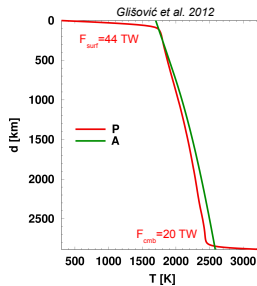
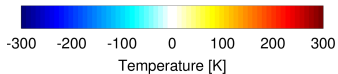
*Simmons et al., 2009*



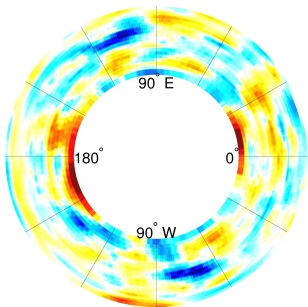
# Inicijalni uslov i referentna svojstva



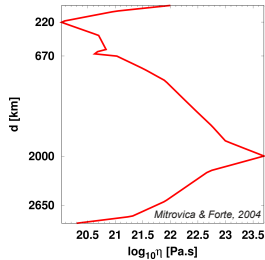
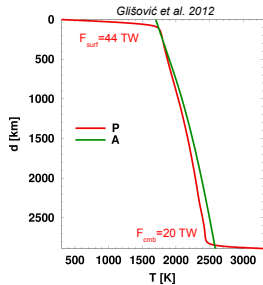
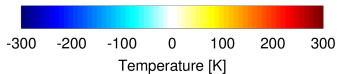
*Simmons et al., 2009*



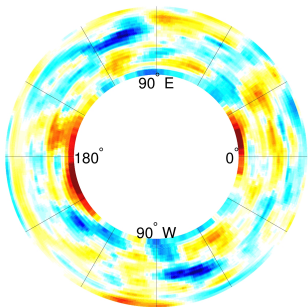
# Inicijalni uslov i referentna svojstva



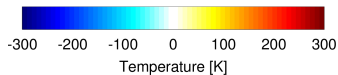
Simmons et al., 2009



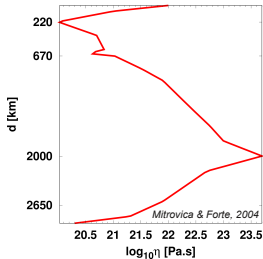
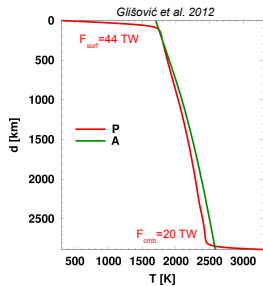
# Inicijalni uslov i referentna svojstva



Simmons et al., 2009



- $Ra_h \geq 10^9$ .



# Kvantifikovanje greške direktnih modela

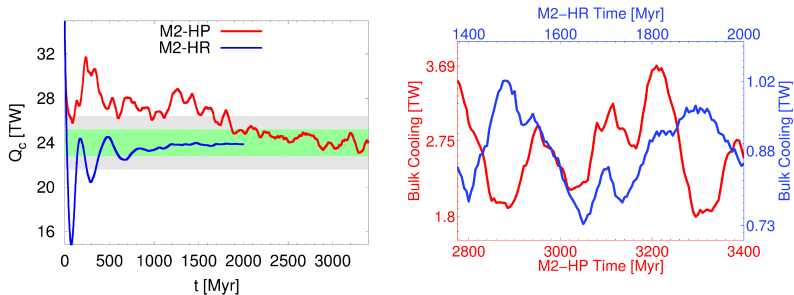
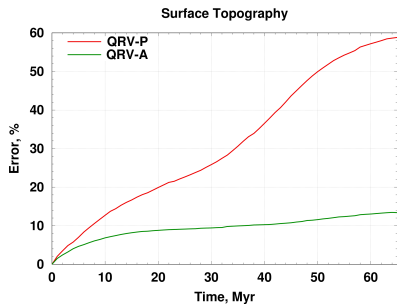
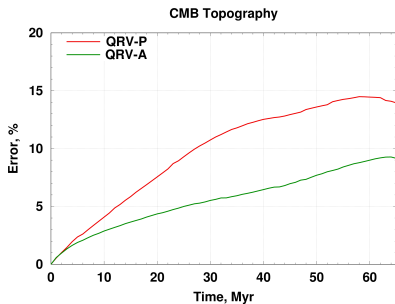


Figure : Glišović et al., 2012



# Kvantifikovanje greške inverznih modela



*Glišović & Forte, 2014*

# Sekularne varijacije Zemljinih polova (True Polar Wander)

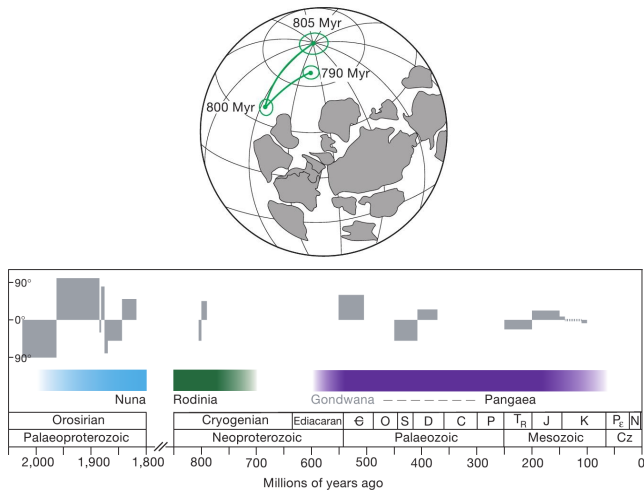
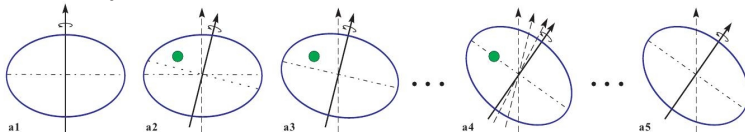


Figure : Creveling et al., 2012

# Fizika sekularnih varijacija Zemljinih polova

## a. Standardna teorija rotacione stabilnosti



## b & c. Revidirane teorije rotacione stabilnosti

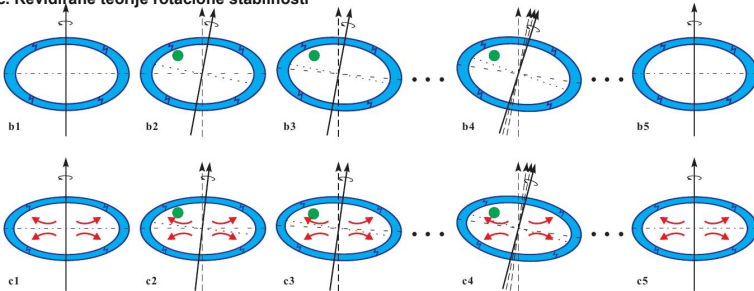


Figure : Creveling et al., 2012

# Direktan problem termalne konvekcije

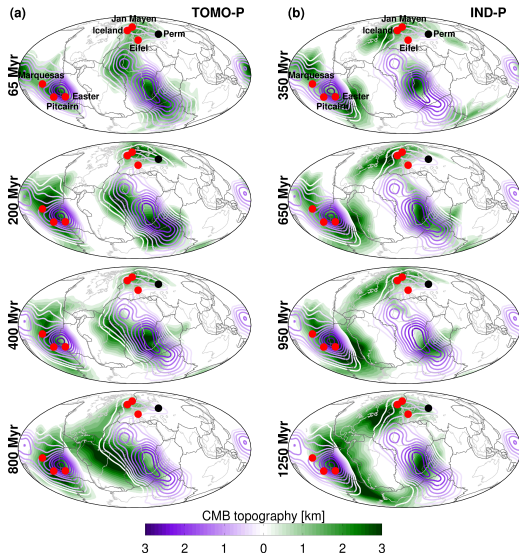
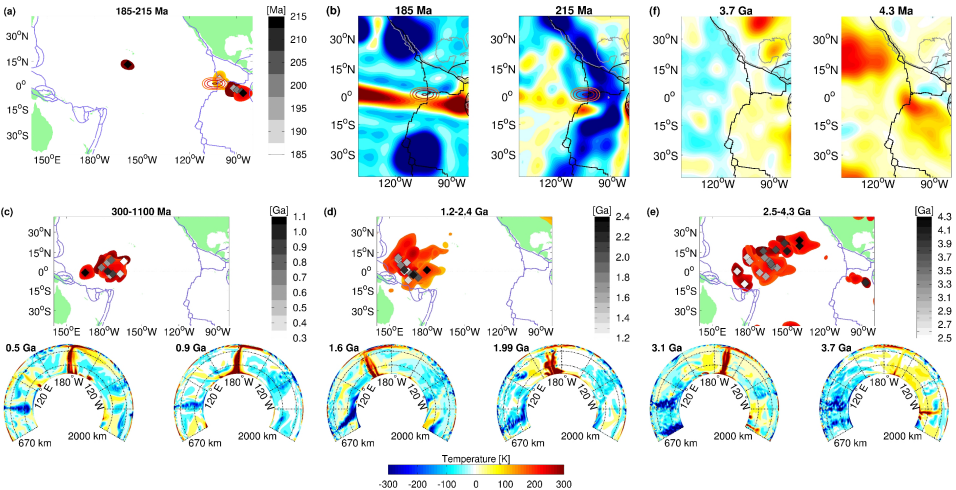


Figure : Glišović and Forte, 2014 (GSF)

# Direktan problem termalne konvekcije



## Inverzan problem termalne konvekcije

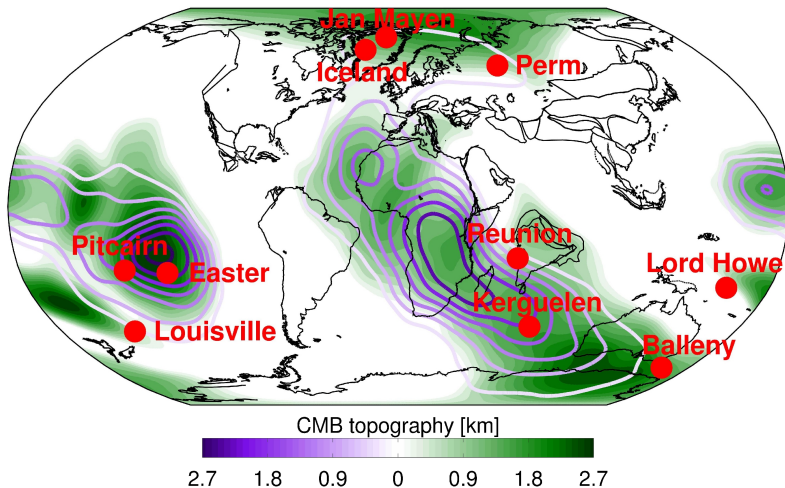
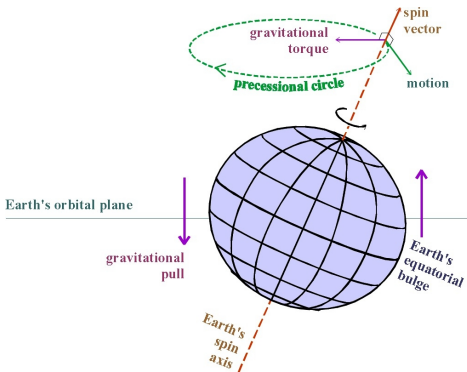
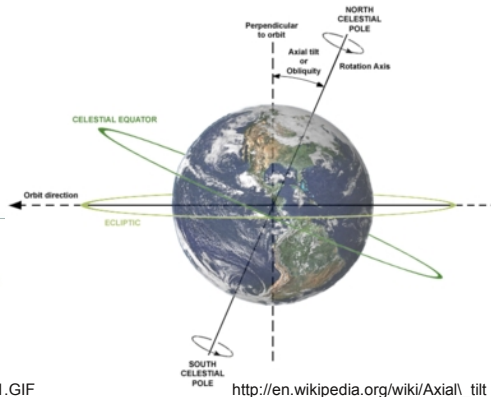


Figure : Glišović and Forte, 2014 (EPSL)

# Orbitalni parametri (precesija i nagib ose)



<http://star-www.st-and.ac.uk/~fv/webnotes/PRECESS1.GIF>



[http://en.wikipedia.org/wiki/Axial\\_tilt](http://en.wikipedia.org/wiki/Axial_tilt)

## Perturbacije u dinamičkoj eliptičnosti

Forte and Peltier, 1991:

$$\delta H(t) = - \frac{4\pi a^4}{\sqrt{\delta} C} \int_{r_{\text{cmb}}}^a G_2 \left[ \nu(r) / \nu_0; r \right] \delta \rho_2^0(r, t) dr \quad (2)$$

Relativne varijacije u dinamičkoj eliptičnosti tokom zadnjih 20 miliona godina:

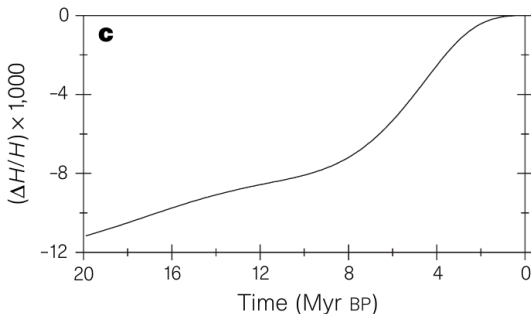


Figure : Forte & Mitrovica, 1997



## Rezonanca u precesiji

$\beta\Delta H(t)/H$ ,  $\beta$  je faktor koji varira između 0 i 2.5

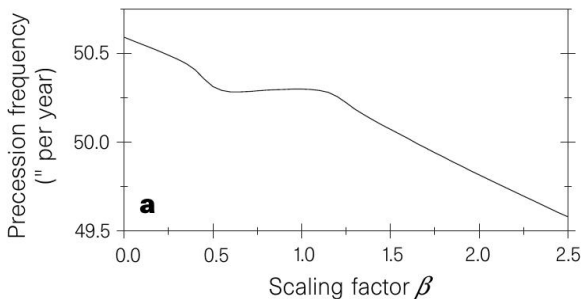


Figure : Forte & Mitrovica, 1997

- Postepeno povećanje u dinamičkoj eliptičnosti dovodi do rezonance u precesiji tokom zadnjih 20 miliona godina.

## Enigma u određivanju Zemljine dinamičke eliptičnosti

Morrow et al., 2012 su primetili da:

- Tokom prethodnih 3 Myrs, male promene u dinamičkoj eliptičnosti Zemlje ukazuju na značajnu izostatičku kompenzaciju tokom smene ledenih doba => **relativno nisku viskoznost omotača.**
- Tokom prethodnih 25 Myrs, promene u Zemljinoj gravitacionoj formi na dugim talasnim dužinama su pretežno izazvane konvekcijom u omotaču, i u ovom slučaju, male perturbacije dinamičke eliptičnosti impliciraju sporu konveciju i relativno **visoku viskoznost omotača.**
- Jedno od rešenja ove enigme: viskoznost Zemljinog omotača je "prelazna" tj. zavisna je od vremenskih skala na kojima deluju konvekcione sile.

## Viskoznost omotača ???...

Ammann et al., 2012:

$$\eta_d = \frac{BD^2T}{AX_vVD_{pv}}$$

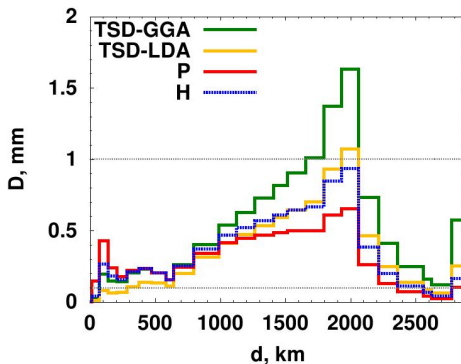


Figure : Glišovićet al., 2014 (u recenziji)

## Zaključak

- Relativno brze konvekcione sile (**subdukcije**) koje deluju na Zemlju (u ravni normalnoj na ravan definisanu minimumom momenta inercije) gde je efektivna elastičnost "izlomljene" litosfere mala i sa relativno stabilnim konvekcionim tokovima (**plumama**) u ravni  $I_{min}$  obezbeđuju fizički okvir za paleomagnetna rešenja sekularnih varijacija Zemljinih polova.

- Procena viskoznosti omotača je ključni parametar za regulisanje dugoročne evolucije Zemljinog sistema, ili astronomskih kalibracija, metodologije koje je korišćena da odredi vremenske skale koje se protežu kroz Cenozoik (65 Myrs) i Mezozoik (252 Myrs).

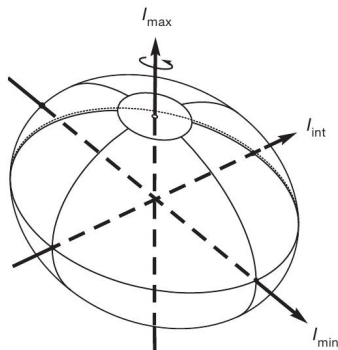


Figure : Creveling et al., 2012