

Jak ovlivňují geofyzikální procesy orientaci Země v prostoru

*Jan Vondrák, Česká astronomická společnost
a Astronomický ústav AV ČR*

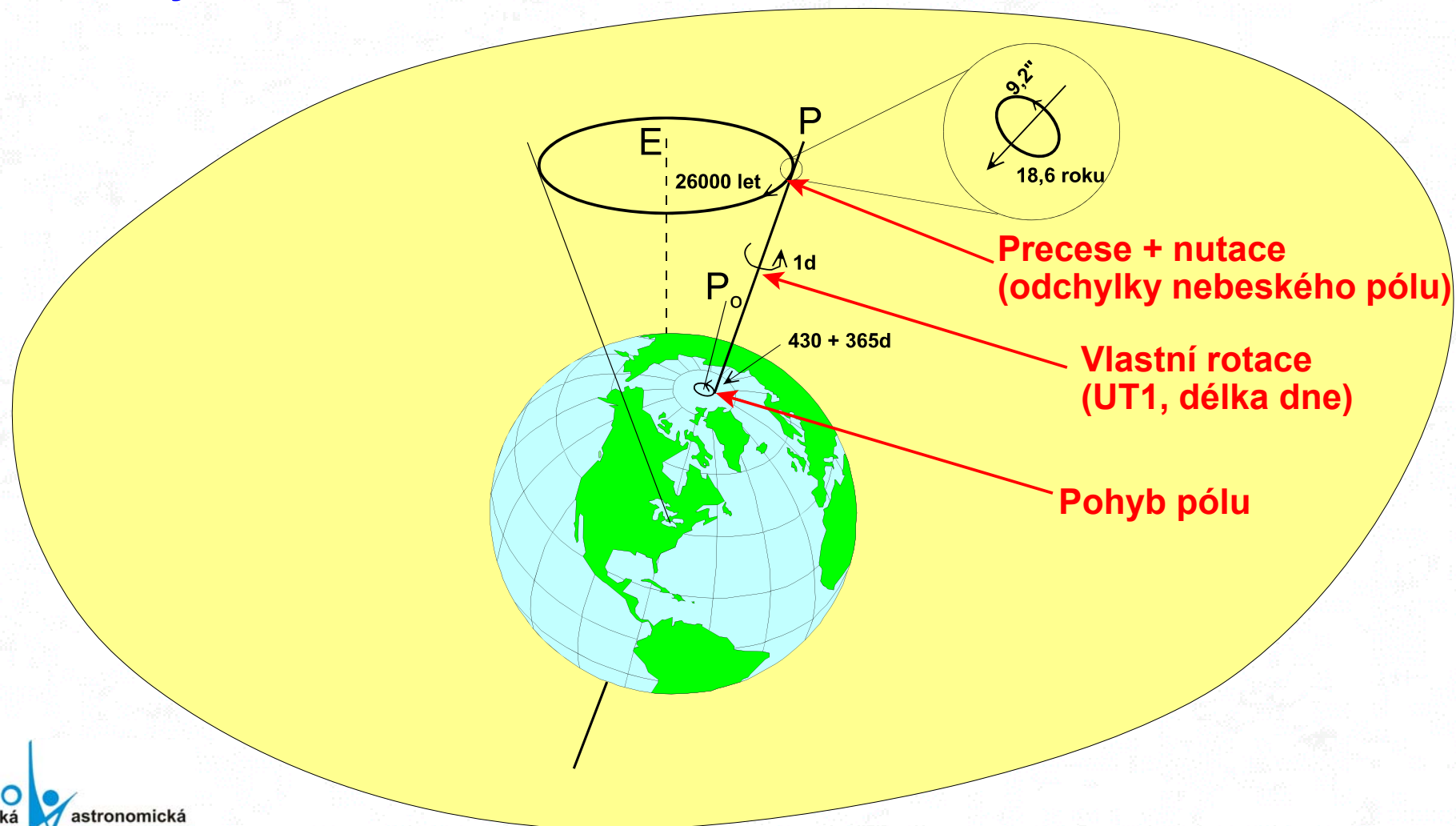
Obsah:

- Parametry orientace Země;
- Stručná teorie rotace Země;
- Geofyzikální excitace rotace Země obecně;
- Náš příspěvek ke studiu vlivu atmosféry, oceánů a geomagnetického pole na rotaci.

Parametry orientace Země

- Rotace Země **v širším smyslu** - úplná orientace tělesa (precese-nutace, pohyb pólu, vlastní rotace), ovlivněná:
 - Vnějšími silami (Měsíc, Slunce, planety);
 - Geofyzikálními vlivy (vnitřní stavba Země, přesuny hmot na rozhraní jádra a pláště, oceány, hydrosféra, atmosféra...).
- Rotace Země má fundamentální význam v astronomii, zvláště při transformaci mezi nebeským a pozemským referenčním systémem, ale též v dalších aplikacích:
 - Kosmická navigace;
 - geofyzika;
 - geodézie atd...

Parametry orientace Země



Krátký historický přehled:

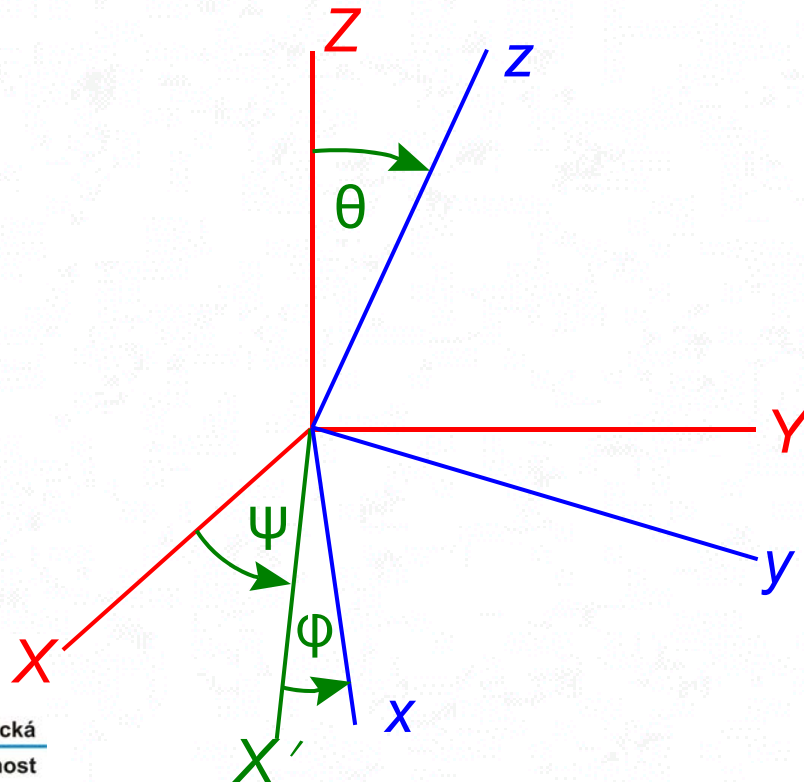
- **precese**: známá už Hipparchovi (2. stol. př. Kr.), z rozdílu ekliptikálních délek hvězd v různých epochách;
- **pohyb pólu**: teoreticky předpovězen L. Eulerem (1765), observačně zjištěn (ze změn zeměpisné šířky) K.F. Küstnerem (Berlín, 1884/5) a potvrzen L. Weinekem (Praha, 1889/92), dva hlavní členy (365 a 430 dní) určeny S.C. Chandlerem (1891), od 1899 International Latitude Service (ILS) monitoruje pohyb pólu;
- **nutace**: pozorovaná Bradleyem (1728) a teoreticky vysvětlená Eulerem (1748), pak následuje systematické vylepšování modelu;
- **změny rychlosti rotace**: postupné zpomalování pohybu Měsíce pozoroval Haley (1695), později jej studoval Laplace (18. stol.), a vliv Měsíce na rotaci naznačil G. Darwin (konec 19. stol.). Až později byly pozorovány dekádové (Newcomb 1882, de Sitter 1927, Spencer Jones 1939) a sezónní (Stoyko 1950) variace.

Stručná teorie rotace Země

Časově závislý vztah mezi dvěma referenčními systémy:

xyz - rotující, spojená se Zemí

XYZ - nerotující, vázaná na extragalactické objekty



Eulerovy úhly:

ψ precesní

θ nutační

ϕ vlastní rotace

Časová změna momentu hybnosti $\mathbf{H}$ se rovná dvojici sil $\mathbf{L}$, způsobené vnějšími silami (Měsíc, Slunce, planety).

V rotujícím systému xyz :

$$\frac{d\mathbf{H}}{dt} + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H} = \mathbf{L}$$

Pro netuhé těleso platí $\mathbf{H} = \mathbf{C}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}$ (kde $\mathbf{C}$ je tensor setrvačnosti, $\boldsymbol{\omega}$ vektor rotace, a $\mathbf{h}$ relativní moment hybnosti), odtud Liouvillový rovnice:

$$\frac{d}{dt}(\mathbf{C}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}) + \boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{C}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}) = \mathbf{L}$$

Integrací Liouvillových rovnic dostaneme vektor rotace ω

v rotujícím systému, t.j. **pohyb pólu**: $x = \omega_1 / \Omega, \quad y = -\omega_2 / \Omega$

a relativní změny **rychlosti rotace**: $\omega_3 / \Omega - 1$

Pohyb pólu:

- Volná složka pohybu pólu (Chandler wobble), pro **tuhou Zemi** s Eulerovou periodou = 305 dní, ale pozorovaná perioda pro **reálnou Zemi** = 430 dní.
- Vynucené složky (většinou sezónní):
 - ▶ Geofyzikální vliv je dominantní, protože změny tensoru setrvačnosti **C** a relativního momentu hybnosti **h** jsou *dlouhoperiodické* v terestrickém systému.
 - ▶ Externí síly **L** mají minimální vliv, protože jsou *krátkoperiodické*.

Rychlost rotace:

- Pro **tuhou Zemi** je rychlost rotace konstantní;
- Pro **netuhou Zemi** je vliv externích a geofyzikálních sil téměř vyrovnán:
 - ▶ Externí síly (Měsíc, Slunce, planety) způsobují slapové tření a deformace tělesa, t.j. změny tensoru setrvačnosti (zonální složky jsou dlouhoperiodické), což způsobuje změny rychlosti rotace:
 - Postupné zpomalování + široké spektrum period od 14 dní po 18.6 roku.
 - ▶ Geofyzikální vlivy
 - dominantní půlroční a roční člen (zonální větry) + dekadové variace (změny na rozhraní jádra a pláště).

Poloha osy z v nerotující nebeské soustavě (úhly ψ , θ), a úhel vlastní rotace φ se odvodí integrací Eulerových kinematických rovnic:

$$\begin{aligned}\dot{\psi} \sin \theta &= -\omega_1 \sin \varphi - \omega_2 \cos \varphi \\ \dot{\theta} &= -\omega_1 \cos \varphi + \omega_2 \sin \varphi \\ \dot{\varphi} &= \omega_3 - \dot{\psi} \cos \theta\end{aligned}$$

Při této integraci **jsou geofyzikální vlivy potlačeny** (jsou krátkoperiodické v nebeské soustavě), a **externí síly jsou zesíleny** (jsou dlouhoperiodické).

Geofyzikální vlivy na orientaci Země -rekapitulace:

■ Atmosféra:

- ▶ Excitace Chandlerova pohybu pólu;
- ▶ Vynucený pohyb pólu (tlak vzduchu);
- ▶ Vynucené změny rychlosti rotace (vítr);
- ▶ Excitace nutace...

■ Oceány:

- ▶ Prodloužení Chandlerovy periody o cca 35 dní;
- ▶ Excitace Chandlerova pohybu;
- ▶ Vynucený pohyb pólu (sezónní, kvazi-denní);
- ▶ Excitace nutace...

■ Viskozita pláště:

- ▶ Tlumení Chandlerova pohybu;
- ▶ Posun fází nutačních členů...

- Elasticita pláště:
 - Prodloužení Chandlerovy periody o cca 125 dní;
 - Frekvenčně závislé změny amplitud nutačních členů.
- Změny na rozhraní jádra a pláště:
 - Dekádové změny rychlosti rotace.
- Tekuté vnější jádro:
 - Retrográdní volná nutace jádra - Free Core Nutation (RFCN):
 - $P = 430$ dní (v nebeské soustavě);
 - Prográdní volná rotace jádra - Free Core Nutation (PFCN):
 - $P = 1020$ dní (v nebeské soustavě);
 - Zkrácení Chandlerovy periody o cca 30 dní;
 - Rezonanční efekty amplitud nutačních členů blízkých RFCN.
- Tuhé vnitřní jádro:
 - Volná nutace vnitřního jádra - Inner Core Wobble (ICW):
 - $P = 2400$ dní (v terestrické soustavě);
 - Rezonanční efekty amplitud nutačních členů blízkých ICW.

Geofyzikální excitace - náš příspěvek

- Předneseno na Valných zasedáních 2015:
 - IUGG v Praze (C. Ron a J. Vondrák: Geophysical excitation of Earth orientation);
 - IAU v Honolulu (J. Vondrák a C. Ron: Earth orientation parameters: excitation by atmosphere, oceans and geomagnetic jerks).
- Používáme numerickou integraci Brzezińského širokopásmových Liouvillových rovnic, platných pro zjednodušený model Země:
 - viskózně-elastický plášť,
 - tekuté jádro.

Brzeziňského širokopásmové Liouvillový rovnice (komplexní):

V terestrické soustavě (pohyb pólu):

$$\begin{aligned} \ddot{p} - i(\sigma_C + \sigma_f)\dot{p} - \sigma_C\sigma_f p = \\ = -\sigma_C \left\{ \sigma'_f(\chi_p + \chi_w) + \sigma_C(a_p\chi_p + a_w\chi_w) + i[(1+a_p)\dot{\chi}_p + (1+a_w)\dot{\chi}_w] \right\} \end{aligned}$$

V nebeské soustavě (nutace):

$$\begin{aligned} \ddot{P} - i(\sigma'_C + \sigma'_f)\dot{P} - \sigma'_C\sigma'_f P = \\ = -\sigma'_C \left\{ \sigma'_f(\chi'_p + \chi'_w) + \sigma'_C(a_p\chi'_p + a_w\chi'_w) + i[(1+a_p)\dot{\chi}'_p + (1+a_w)\dot{\chi}'_w] \right\} \end{aligned}$$

p, P je pohyb osy rotace v terestrické a nebeské soustavě;
 σ_C, σ_f je Chandlerova a FCN frekvence v terestrické soustavě;
 σ'_C, σ'_f je Chandlerova a FCN frekvence v nebeské soustavě;
 χ_p, χ_w (χ'_p, χ'_w), jsou excitace v terestrické (nebeské) soustavě;
 $a_p = 9.200 \times 10^{-2}$, $a_w = 2.628 \times 10^{-4}$ jsou numerické konstanty.

Excitace (efektivní funkce momentu hybnosti) χ atmosféry (oceánů), definované Barnesem et al., 1983:

- Bezrozměrné veličiny, vyjadřující excitace:
 - ▶ χ_p (tlakový, nebo hmotový člen) vyvolaný změnami hmoty atmosféry, počítaný z měřených hodnot tlaku vzduchu na povrchu Země;
 - ▶ χ_w (větrný, nebo pohybový člen) vyvolaný pohybem atmosféry, počítaný z měřených rychlostí větru v různých výškách.

Geomagnetické jerky (GMJ): náhlé změny sekulárních změn intenzity geomagnetického pole, trvající několik měsíců až rok. Řada autorů poukázala nedávno na fakt, že náhlé změny amplitudy/fáze parametrů orientace Země nastávají poblíž epoch GMJ.

Numerická integrace Liouvillových rovnic

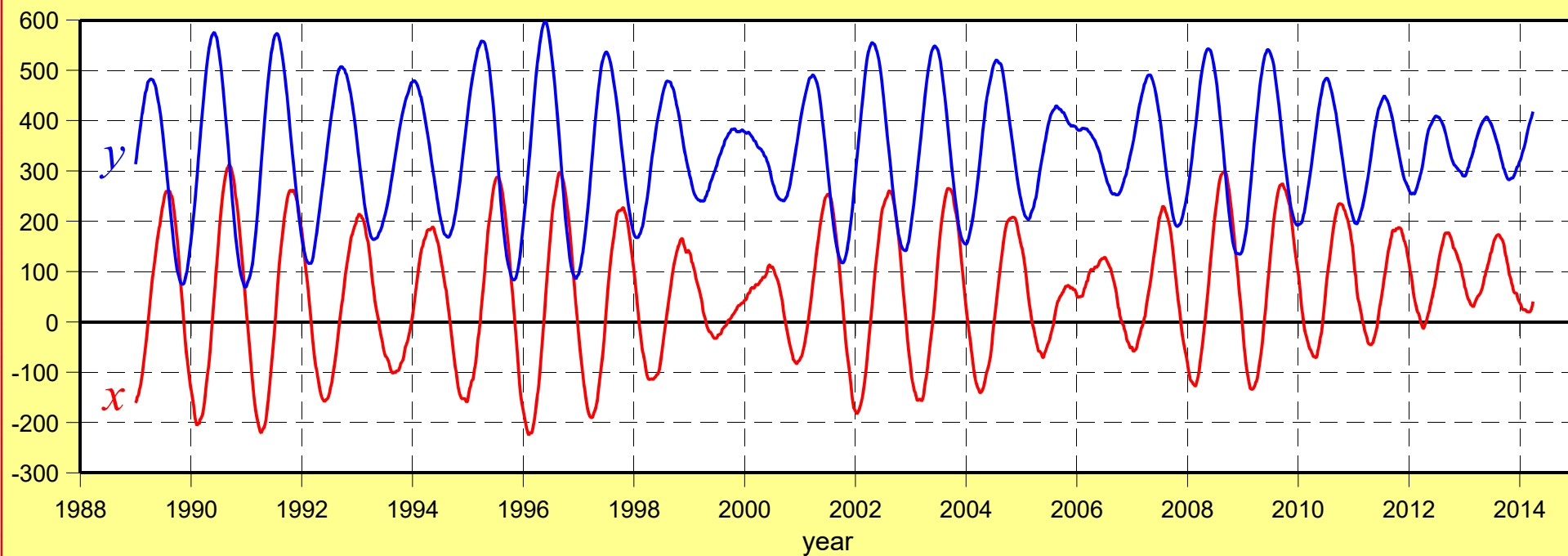
- Brzezińského širokopásmové L. r. jsou diferenciální rovnice druhého řádu v komplexní formě:
 - Používáme standardní metodu Runge-Kutta 4. řádu, proceduru rk4 z Numerical recipes (Press et al. 1992), přepsanou do komplexní formy
 - Namísto jedné rovnice druhého řádu používáme jednoduchou substituci k jejímu rozdělení do dvou rovnic prvního řádu,
 - Počáteční hodnotu první derivace $dp/dt(0)$, $dP/dt(0)$ volíme tak, abychom se zbavili rychlého (skoro-jednodenního) prográdního pohybu,
 - Hledáme počáteční hodnotu $p(0)$, $P(0)$ tak, abychom dostali nejleší souhlas s pozorovanými hodnotami pohybu pólu (odchylek nebeského pólu).

Použitá data (v intervalu 1989.00-2014.25):

- Pohyb pólu a změny délky dne:
 - řešení IERS C04 s jednodenním krokem.
- Odchyšky nebeského pólu pozorované pomocí VLBI:
 - řešení IVS ivs14q1X.eops s nepravidelným krokem 1-7 dní.
- Atmosférické a oceánické excitace - funkce momentu hybnosti $\chi_{1,2,3}$:
 - NCEP/NCAR (atmosféra) s krokem 6h + ECCO (oceány) s krokem 1d.
- Geomagnetické jerky - kvazi-impulsové excitace o šířce 200 dní:
 - Epochy 1991.0, 1994.0, 1999.0, 2003.5, 2004.7, 2007.5, 2011; amplitudy takové, aby dávaly nejlepší souhlas s pozorováním.

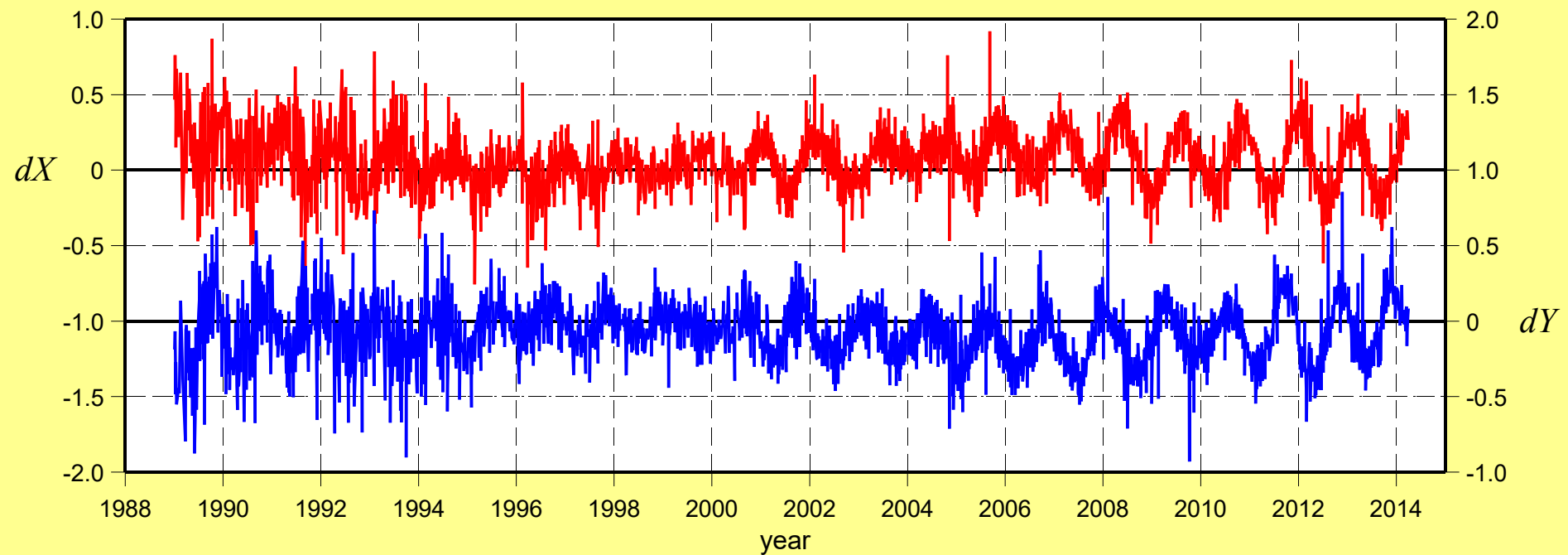
Pohyb pólu [mas]

IERS C04



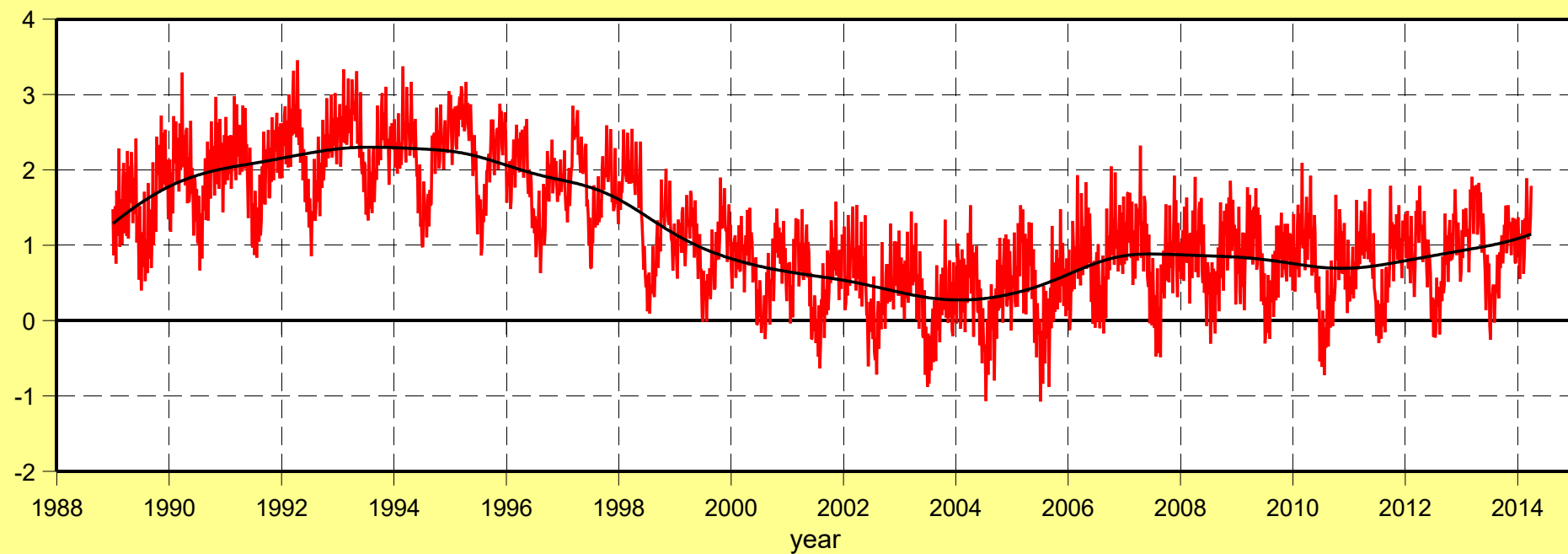
Odchyľky nebeského pólu [mas]

IVS



Délka dne [ms]

IERS C04

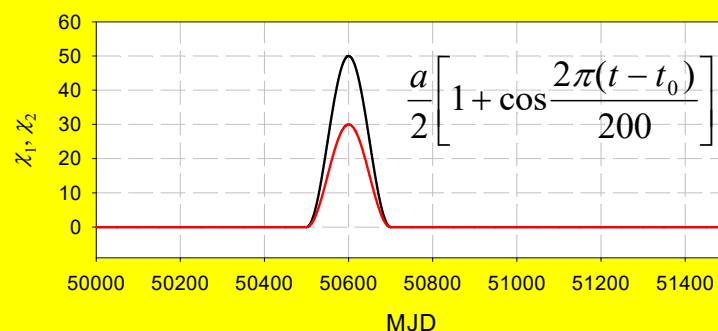


■ Geofyzikální excitace:

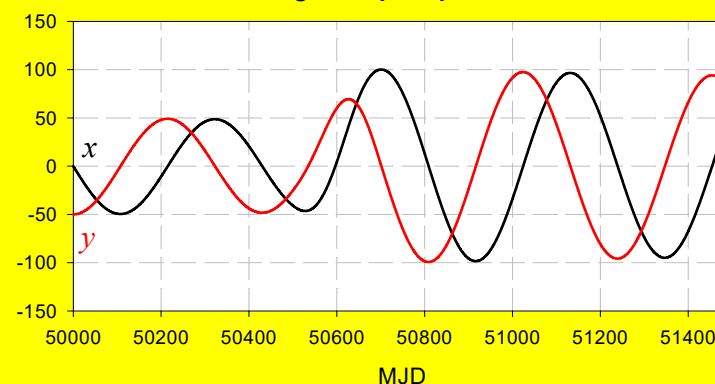
- NCEP/NCAR atmosférické funkce momentu hybnosti, bez korekce IB (ekvivalentní “zamrzlým” oceánům) a s korekcí IB (ekvivalentní oceánům, reagujícím inverzně proporcionálně na změny atmosférického tlaku),
- ECCO oceánické funkce momentu hybnosti (pouze pro pohyb pólu a délku dne, pro nutaci je třeba kratší krok než 1 den),
- Geomagnetické jerky (GMJ). Excitace modelujeme kvazi-impulsní funkcí zvonového tvaru, centrovanou v epochách GMJ, širokou 200 dní. Amplitudy jsou odhadnuty tak, aby daly nejlepší souhlas s pozorováním.

Simulovaný efekt GMJ

schematic excitations



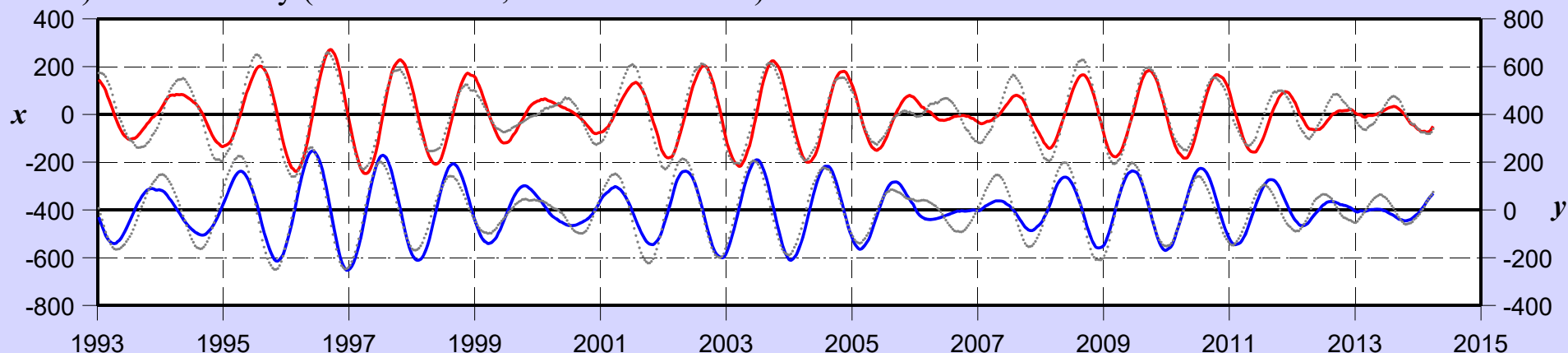
integrated pole position



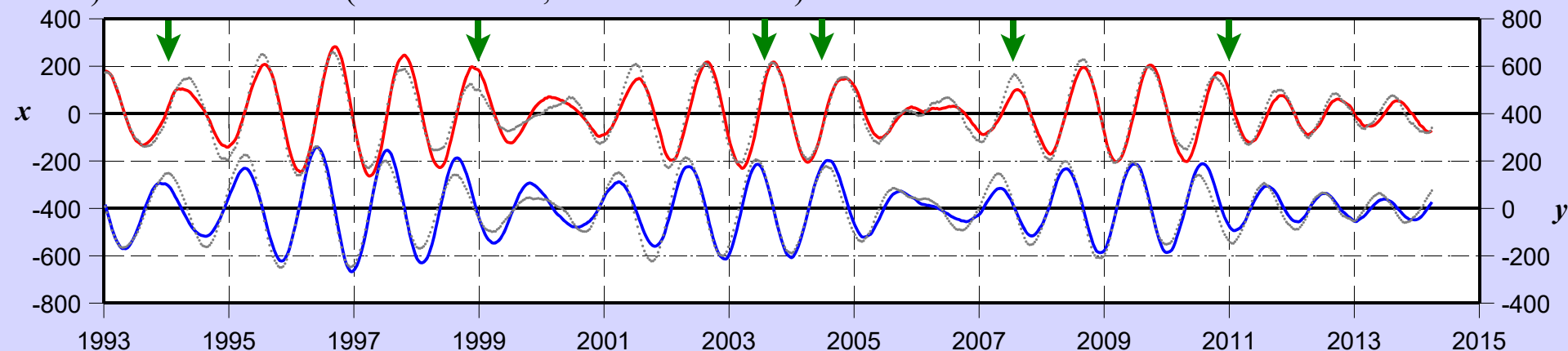
Výsledky - pohyb pólu (bez dlouhoperiodické části)

Atmosféra s korekcí IB (+GMJ)

a) NCEP IB only (rms=59.9 mas, correlation=0.932)



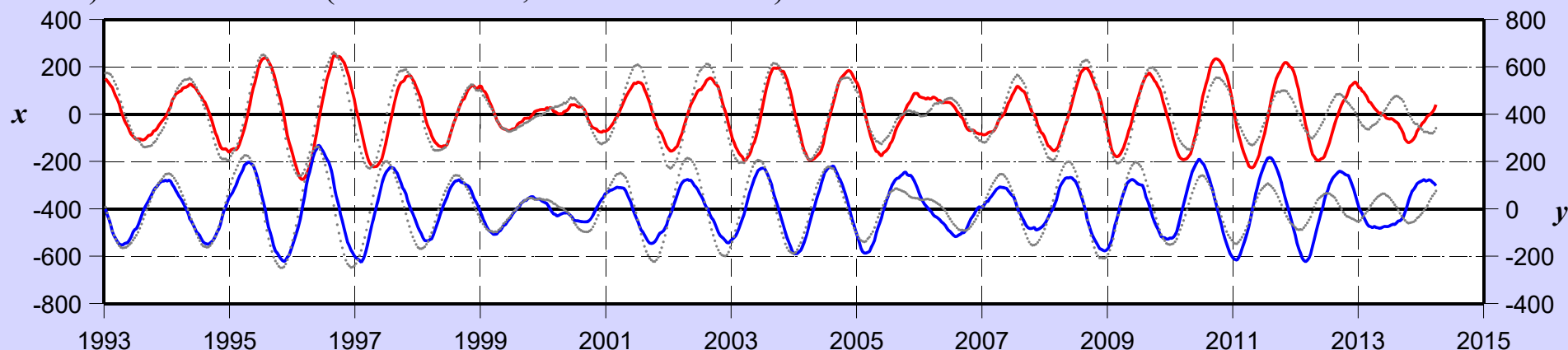
b) NCEP IB + GMJ (rms=47.6 mas, correlation=0.958)



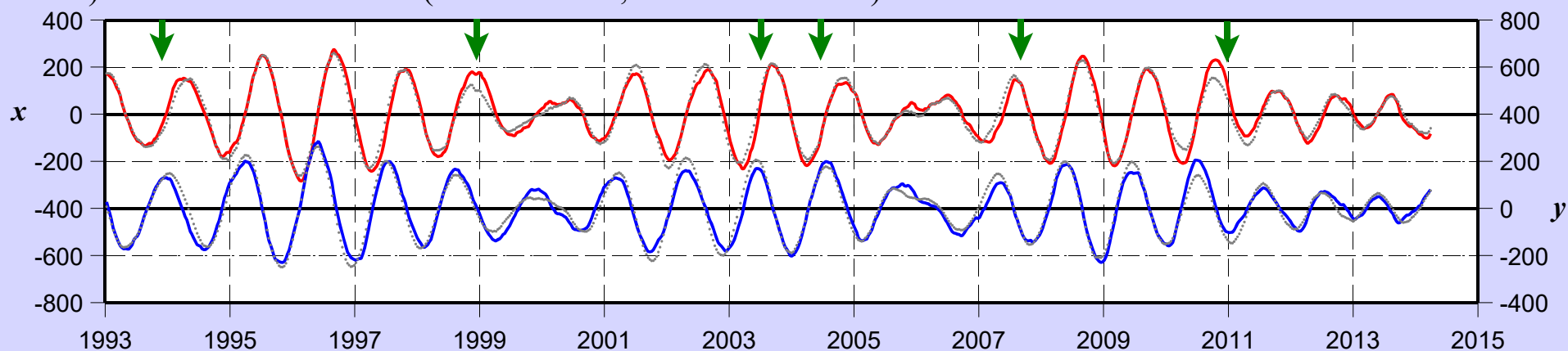
Výsledky - pohyb pólu (bez dlouhoperiodické části)

Atmosféra bez korekce IB + oceány (+GMJ)

a) NCEP + ECCO (rms=77.9 mas, correlation=0.886)



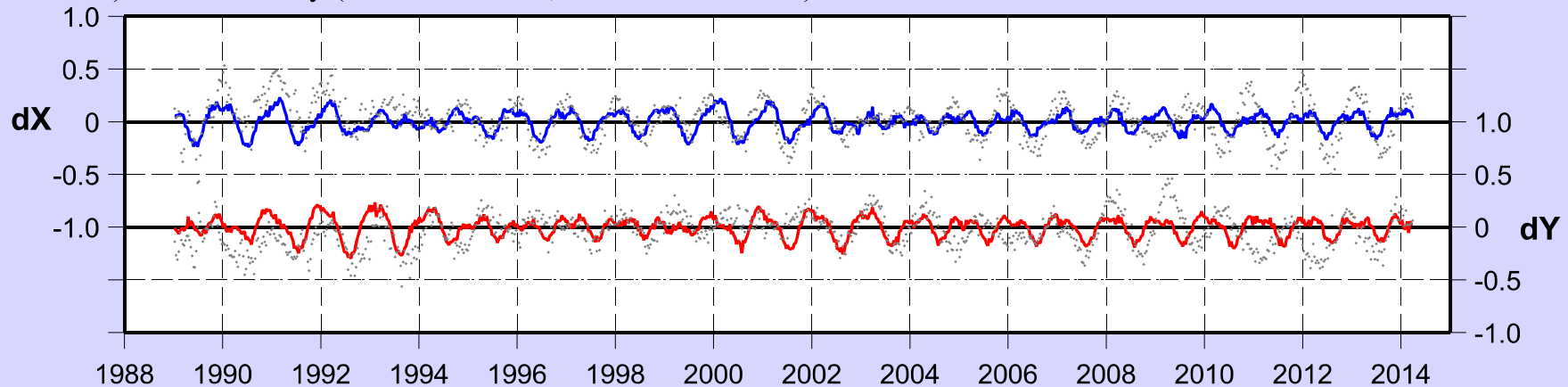
b) NCEP + ECCO + GMJ (rms=39.9 mas, correlation=0.971)



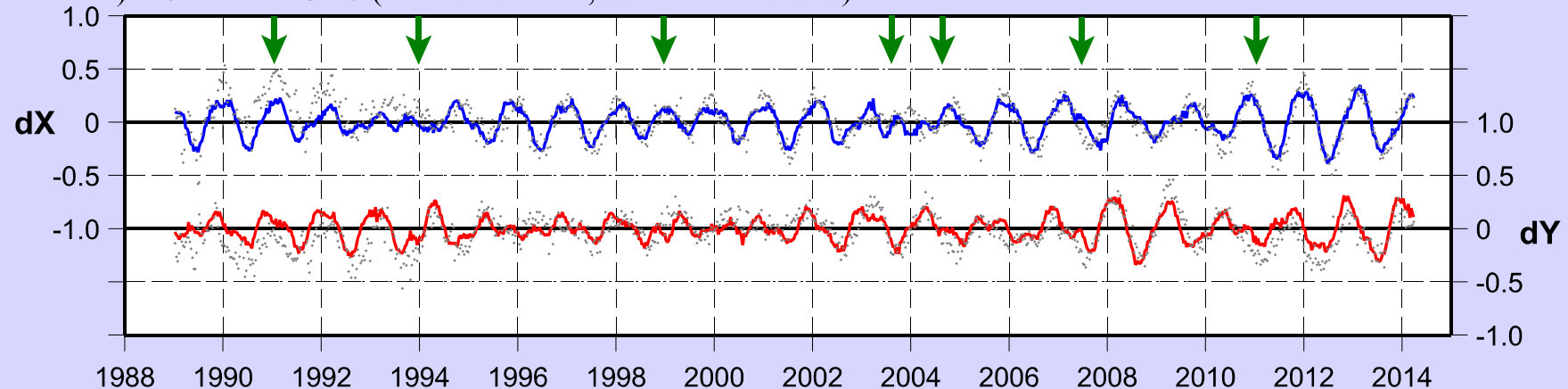
Výsledky - odchylky nebeského pólu

Atmosféra s korekcí IB (+GMJ)

a) NCEP IB only (rms=0.224 mas, correlation=0.425)



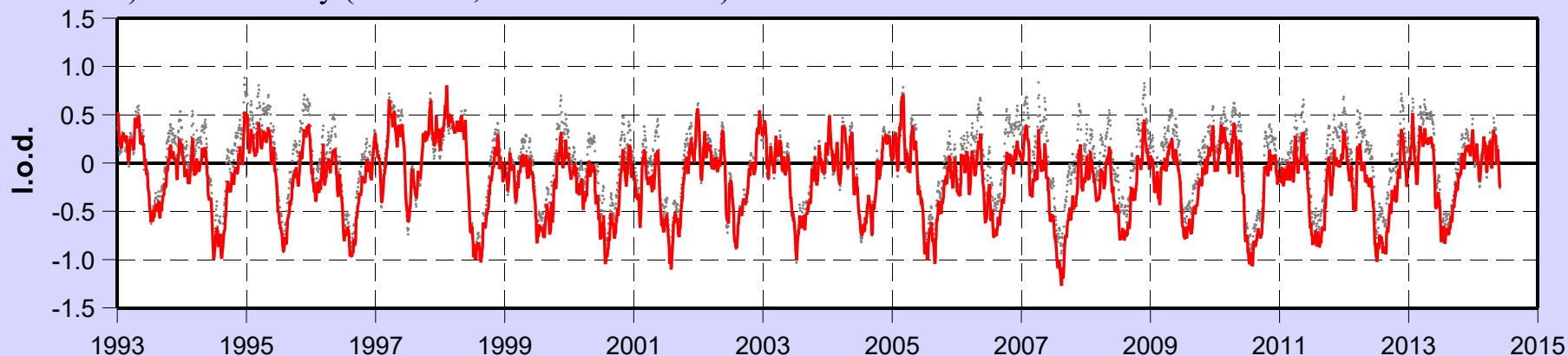
b) NCEP IB + GMJ (rms=0.174 mas, correlation=0.703)



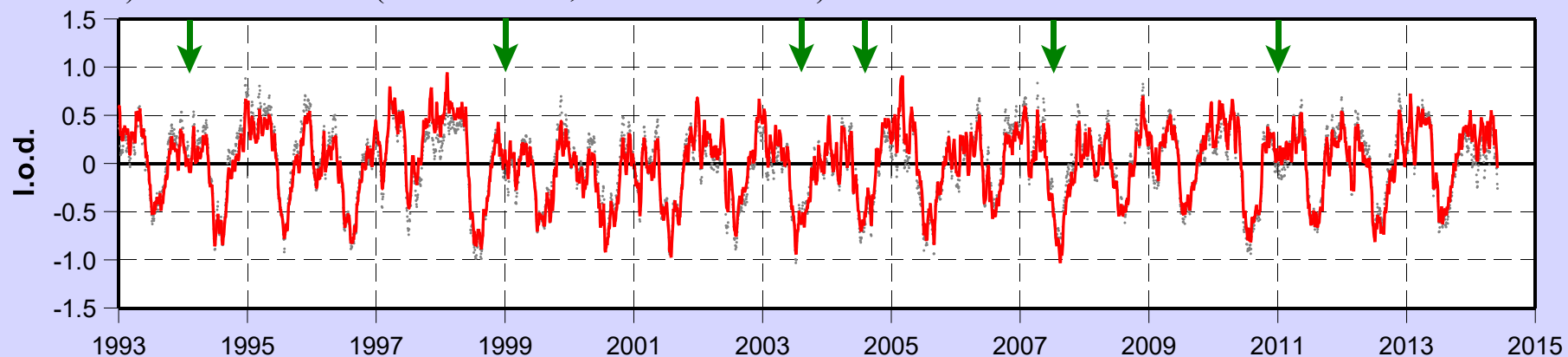
Výsledky - délka dne (bez dlouhoper. a slapové části)

Atmosféra s korekcí IB (+GMJ)

a) NCEP IB only (0.206 ms, correlation=0.864)



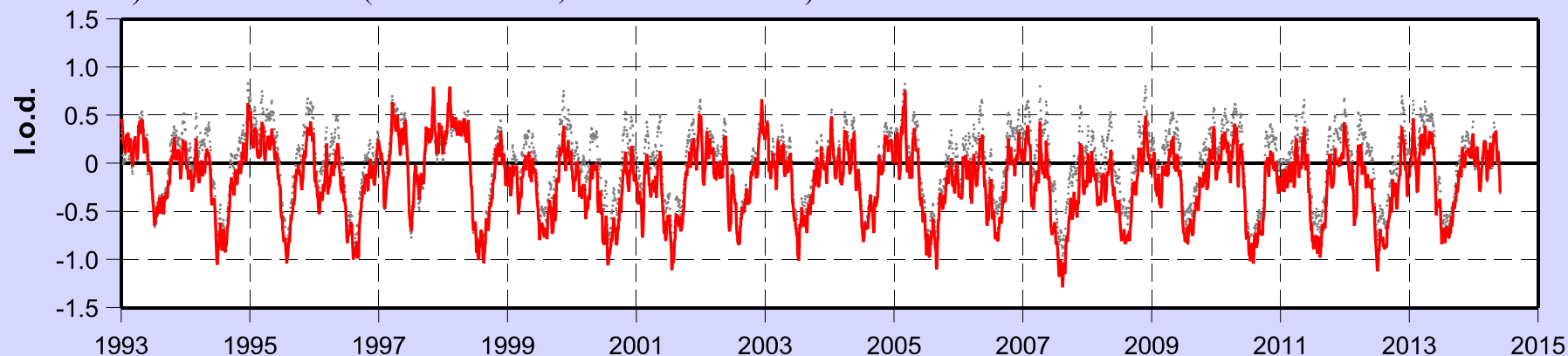
b) NCEP IB + GMJ (rms=0.109 ms, correlation=0.958)



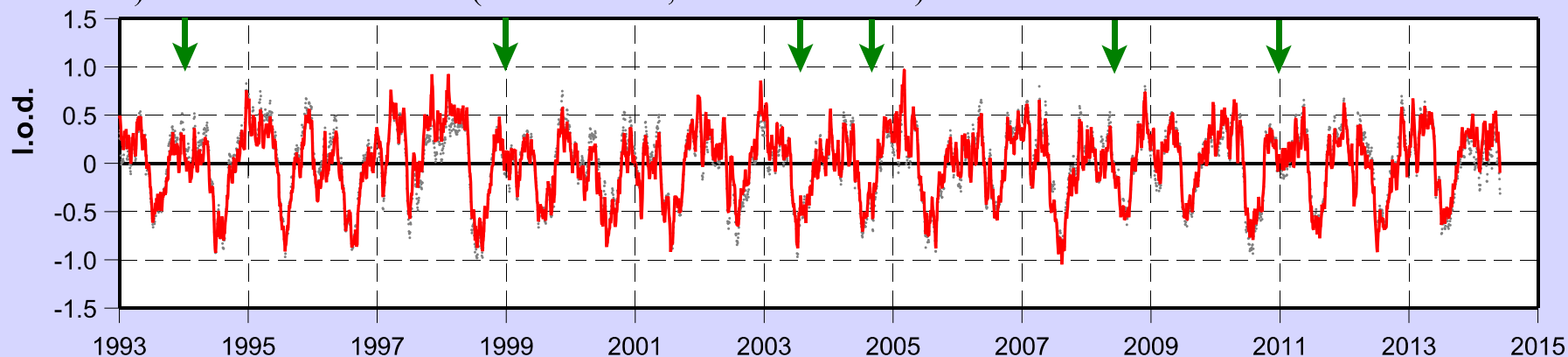
Výsledky - délka dne (bez dlouhoper. a slapové části)

Atmosféra bez korekce IB + OAM (+GMJ)

a) NCEP + ECCO (rms=0.215 ms, correlation=0.851)



b) NCEP + ECCO + GMJ (rms=0.105 ms, correlation=0.960)



Závěry

- Atmosférické a oceánické excitace jsou odpovědné za významnou část pozorovaných změn parametrů orientace Země, souhlas s pozorováním ale není zcela uspokojivý;
- Dodatečné kvazi-impulsové excitace, aplikované v epochách geomagnetických jerků, podstatně vylepšují souhlas ve všech pěti parametrech orientace Země:
 - ▶ Amplitudy excitací GMJ jsou srovnatelné s ostatními geofyzikálními excitacemi;
 - ▶ Nejlepší souhlas pro pohyb pólu a nutaci se dosáhne, jestliže NCEP atmosférická + ECCO oceánická excitace se kombinuje s efekty GMJ;
 - ▶ V případě délky dne je vliv oceánů marginální, ale aplikace GMJ rovněž vylepšuje podstatně souhlas s pozorováním.

Závěry

- Nejsme schopni nabídnout fyzikální vysvětlení mechanismu přenosu excitace od GMJ na orientaci Země, pouze demonstrujeme nápadnou shodu mezi oběma fenomény.
- Je však známo, že geomagnetická vazba mezi tekutým jádrem a pláštěm Země má měřitelný efekt v rotaci Země.
- Je tedy vysoká pravděpodobnost, že GMJ způsobuje náhlé změny této vazby, což se dále projeví v orientaci Země.

