

VÝZKUM ROTACE ZEMĚ

minulost a současnost

Jan Vondrák, Astronomický ústav AV ČR, v.v.i.

- Parametry orientace Země;
- Teorie rotace Země;
- Pozorovací techniky a pozorované změny orientace Země.

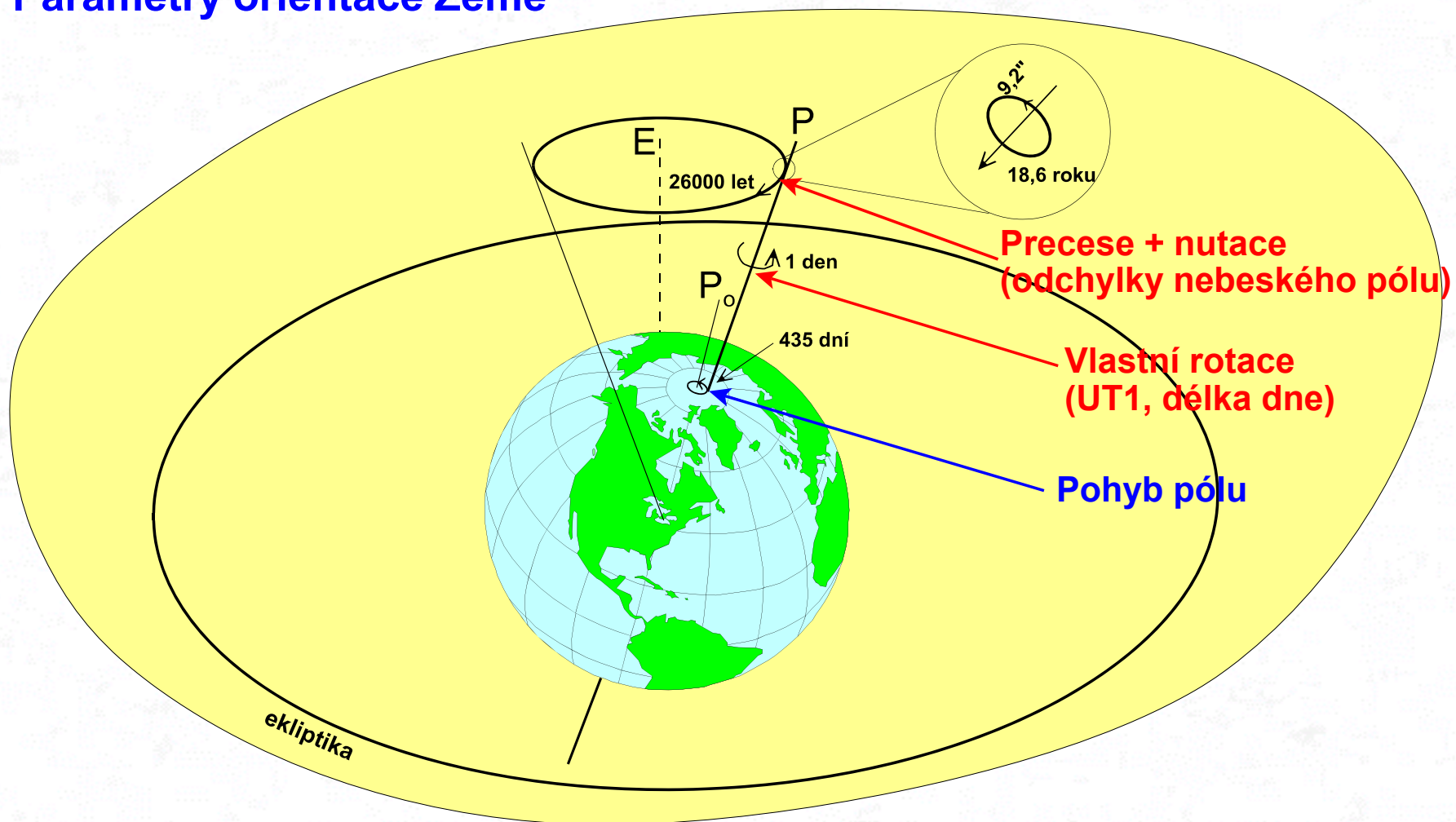


PARAMETRY ORIENTACE ZEMĚ

- Rotace Země **v širším smyslu** - celková orientace tělesa (precese-nutace, pohyb pólu, vlastní rotace), ovlivňovaná:
 - ▶ vnějšími vlivy (Měsíc, Slunce, planety);
 - ▶ vnitřními vlivy (vnitřní stavba Země, přesuny hmot na rozhraní pláště a jádra, v oceánech, hydrosféře, atmosféře...).
- R. Z. má fundamentální význam v astronomii, zejména pro transformaci mezi nebeským a pozemským souřadnicovým systémem, ale i další aplikace v příbuzných oborech:
 - kosmická navigace;
 - geofyzika;
 - geodézie atd...



Parametry orientace Země



Stručná historie výzkumu rotace:

- **precese** známa již Hipparchovi (2. stol. př. Kr.);
- **pohyb pólu** teoreticky předpověděl Euler (1765), observačně zjistil Küstner (1884/5), 2 hlavní složky zpřesnil Chandler (1891), od r. 1899 Mezinárodní šířková služba (ILS) pro sledování pohybu pólu;
- **nutaci** pozoroval Bradley a teoreticky ji vysvětlil Euler (polovina 18. stol.), od té doby neustálé zpřesňování modelu;
- **změny rychlosti rotace**: projevy sekulárního zpomalování v pohybu Měsíce pozoroval Haley (1695), později je studoval Laplace (18. stol.) a vliv na rotaci Země naznačil G. Darwin (konec 19. stol.). Teprve v 1. pol. 20. stol. observačně zjištěny dekádové a sezónní variace.

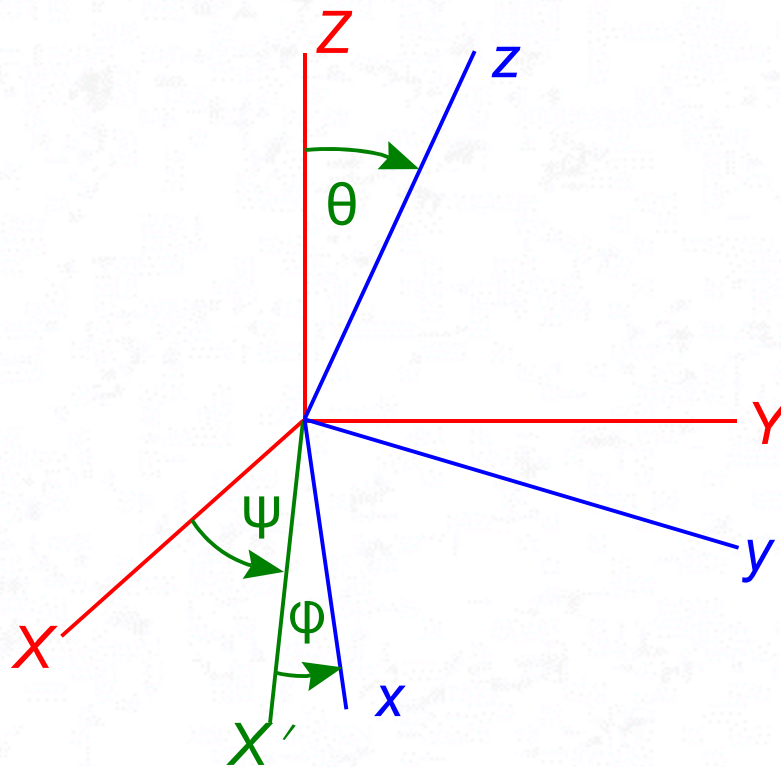


Teorie rotace Země

Časově proměnný vztah mezi dvěma soustavami:

xyz - rotující, spojená se Zemí

XYZ - nerotující, vázaná na mimogalaktické objekty



Eulerovy úhly:

ψ precesní úhel

θ nutační úhel

ϕ úhel vlast. rotace



II. impulsová věta: časová změna točivosti = moment vnějších sil

v rotující soustavě xyz:

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

Pro obecné netuhé těleso platí $\mathbf{H} = \mathbf{C}\boldsymbol{\omega} + \mathbf{h}$, a odtud Liouvillovy rovnice

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

\mathbf{C} je tensor setrvačnosti, $\boldsymbol{\omega}$ vektor rotace, \mathbf{h} relativní moment hybnosti a \mathbf{L} moment vějšších sil.



$$\mathbf{C} = \begin{pmatrix} A + c_{11} & c_{12} & c_{13} \\ c_{12} & A + c_{22} & c_{23} \\ c_{13} & c_{23} & C + c_{33} \end{pmatrix} \quad \mathbf{h} = \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{pmatrix}$$

Označíme-li $h = h_1 + ih_2$, $c = c_{13} + ic_{23}$, $L = L_1 + iL_2$

$m = (\omega_1 + i\omega_2) / \Omega$, $m_3 = \omega_3 / \Omega$ (Ω je střední rychlost rotace Země)

$\Psi = [\Omega^2 c + \Omega h - i(\Omega \dot{c} + \dot{h} - L)] / \Omega^2 (C - A)$ (excitační funkce)

$\Psi_3 = -(\Omega \dot{c}_{33} + \dot{h}_3 - L_3) / C\Omega$

dostaneme linearizované L. rovnice v **komplexním tvaru**:

$$m + i\dot{m} / \sigma_E = \Psi$$

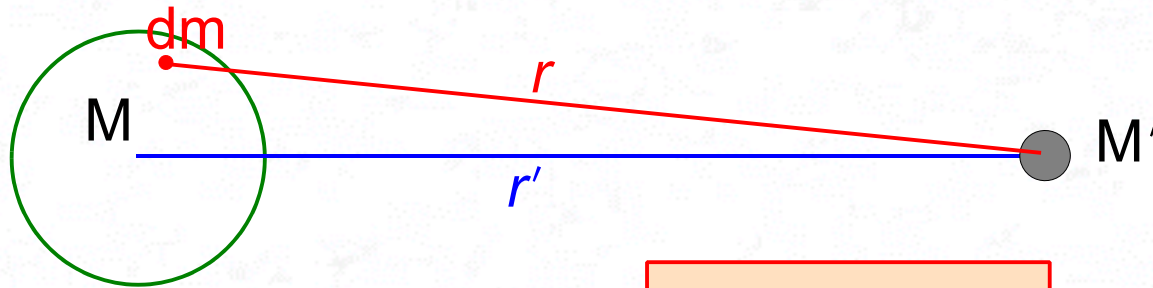
$$\dot{m}_3 = \dot{\Psi}_3$$

c - vliv rotačních, slapových deformací
+ změn tlaku vzduchu,

h - vliv větru, oceánického proudění atd..



Moment vnějších sil L (Měsíc, Slunce, planety):



Silová funkce:
$$U = GM' \int_M \frac{dm}{r}$$

$$L = \mathbf{r}' \times \text{grad}U \quad \begin{cases} L_1 = z' \frac{\partial U}{\partial y'} - y' \frac{\partial U}{\partial z'} \\ L_2 = x' \frac{\partial U}{\partial z'} - z' \frac{\partial U}{\partial x'} \\ L_3 = y' \frac{\partial U}{\partial x'} - x' \frac{\partial U}{\partial y'} \end{cases}$$

Možno rozvinout do trigonometrické řady (na základě znalosti pohybu Měsíce, Slunce, planet).



Řešením Liouvillových rovnic dostaneme vektor rotace ω v rotující soustavě, tj. pohyb pólu $(x = \omega_1 / \Omega, y = -\omega_2 / \Omega)$

a relativní změny rychlosti rotace (ω_3 / Ω) .

Pohyb pólu:

Volná složka pohybu pólu (Chandler wobble), pro tuhou Zemi s Eulerovou periodou 305 dní (z pozorování 435 dní) + vynucené složky.

Při integraci L. rovnic se **geofyzikální vlivy stávají dominantními**, protože změny tenzoru setrvačnosti C a relativního momentu hybnosti h jsou v terestrické soustavě **dlohoperiodické**. Naopak, **vnější síly L mají vliv minimální**, protože mají **krátkoperiodický** charakter.



Rychlost rotace:

Pro tuhou Zemi je rychlost rotace konstantní, pro netuhou Zemi vedou slapové změny tenzoru setrvačnosti (Měsíc, Slunce, planety - zonální složky jsou dlouhoperiodické) + geofyzikální vlivy ke změnám rychlosti rotace.

Vnější vlivy - sekulární zpomalování (slapové tření) + 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).



Polohu osy z v nerotující nebeské soustavě (precese/nutace - úhly ψ , θ) a úhel vlastní rotace (φ) pak řeší Eulerovy kinematické rovnice:

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

Při integraci Eulerových kinematických rovnic se naopak **geofyzikální vlivy** potlačují, protože jsou v nebeské nerotující soustavě **krátkoperiodické**, a **vnější síly L** mají vliv **dominantní**, protože jsou **dlouhoperiodické**.

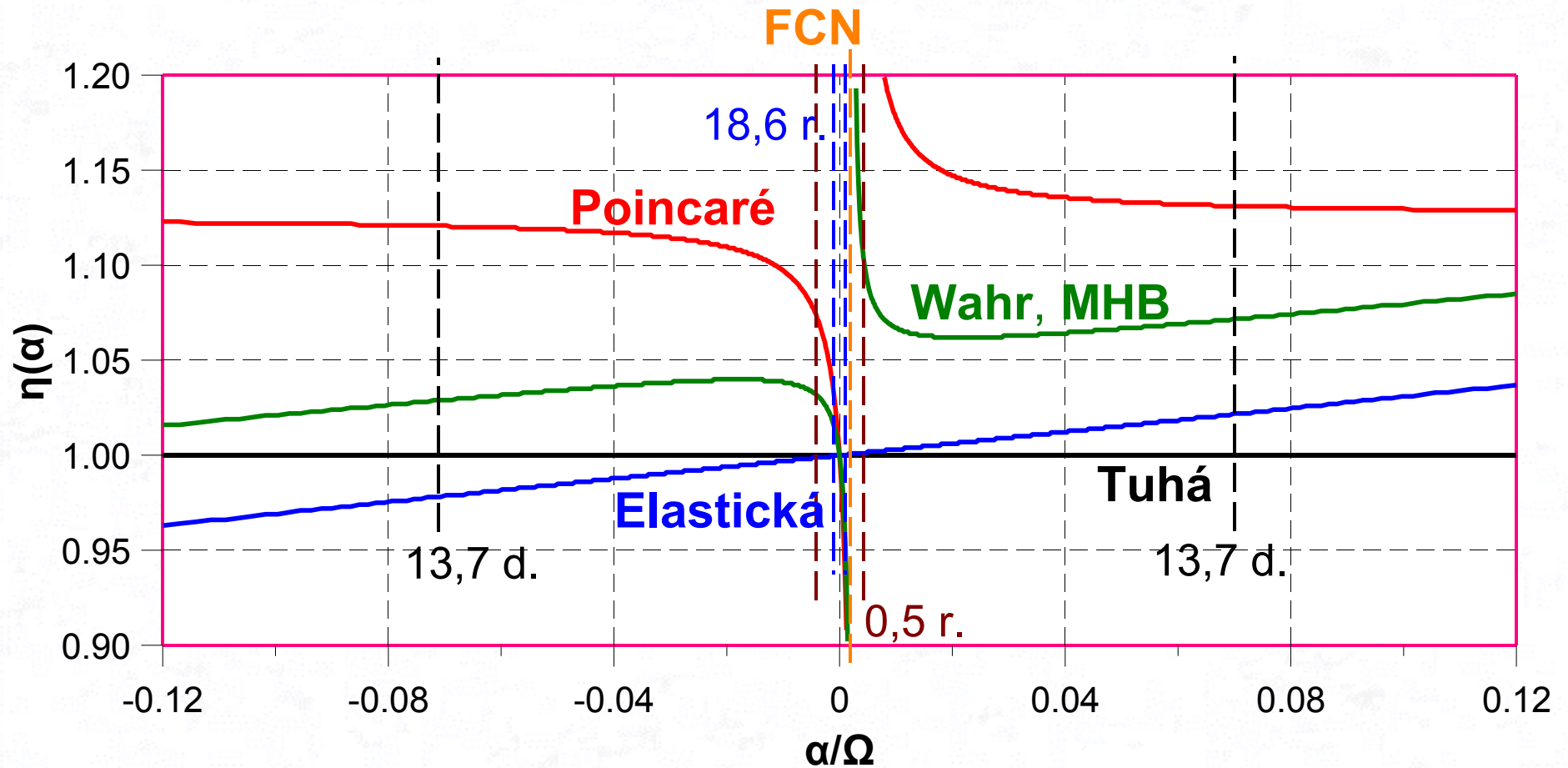


POSTUP ŘEŠENÍ TEORIE NUTACE:

- **rotace tuhé Země** pod vlivem vnějších těles (Měsíc, Slunce, planety);
- **vlivy modelovatelných netuhých částí Země** (elastický plášť, tekuté vnější jádro, tuhé vnitřní jádro ...): frekvenčně závislá přenosová funkce = poměr mezi amplitudou nutace a její hodnotou pro tuhou Zemi;



Přenosová funkce pro různé modely



Rekapitulace:

- Vnější síly (tělesa sluneční soustavy):
 - ▶ Dominantní vliv na precesi a nutaci;
 - ▶ Částečný vliv na rychlost rotace (slapové deformace);
- Vnitřní síly (geofyzikální):
 - ▶ Dominantní vliv na pohyb pólu (změny tensoru setrvačnosti);
 - ▶ Částečný vliv na rychlost rotace (změny tensoru setrvačnosti);
 - ▶ Malý vliv na nutaci;
- Precese jen velmi málo závisí na přijatém modelu vnitřní stavby Země (pouze na celkových momentech setrvačnosti).



Geofyzikální vlivy podrobněji:

- Vliv oceánů:
 - ▶ Prodloužení periody Chandlerova pohybu o cca 35 dní;
 - ▶ Excitace Chandlerova pohybu;
 - ▶ Vynucené pohyby pólu (sezónní, jednodenní);
 - ▶ Excitace FCN ...
- Vliv atmosféry:
 - ▶ Vynucené pohyby pólu (změny tlaku);
 - ▶ Vynucené změny rychlosti rotace (zonální větry)
 - ▶ Excitace FCN ...
- Viskozita pláště:
 - ▶ Postupné tlumení Chandlerova pohybu;
 - ▶ Fázový posuv nutačných členů ...



- Elasticita:
 - ▶ Prodloužení Chandlerovy periody o cca 125 dní;
 - ▶ Frekvenčně závislé změny amplitud nutace.
- Tekuté vnější jádro:
 - ▶ Retrográdní volný pohyb jádra (RFCN):
 - $P = 430$ dní (v nebeském systému);
 - ▶ Prográdní volný pohyb jádra (PFCN):
 - $P = 1020$ dní (v nebeském systému);
 - ▶ Zkrácení Chandlerovy periody o cca 30 dní;
 - ▶ Resonanční efekty ve velikosti amplitud nutace kolem FCN.
- Tuhé vnitřní jádro:
 - ▶ Volný pohyb vnitřního jádra (ICW):
 - $P = 2400$ (v terestrickém systému);
 - ▶ Resonanční efekty ve velikosti amplitud nutace kolem ICW.



Používané modely nutace:

- Do r. 1980 Woolard (1953):
 - Tuhá Země;
 - Vliv pouze Měsíce a Slunce;
 - 69 členů.
- 1984-2002 IAU1980 (Kinoshita 1977/ Wahr 1979):
 - Netuhá Země (stratifikovaný elastický plášť, tekuté jádro);
 - Vliv pouze Měsíce a Slunce;
 - 106 členů.
- 2003 - IAU2000 (Souchay et al. 1997/ Mathews et al. 2002):
 - Netuhá Země (viskózně-elastický plášť, vnější tekuté jádro, vnitřní pevné jádro, atmosféra, oceán, elmg. vazby vnější jádro-plášť, vnitřní-vnější jádro);
 - Vliv Měsíce, Slunce a planet;
 - 1360 členů



Pozorovací techniky:

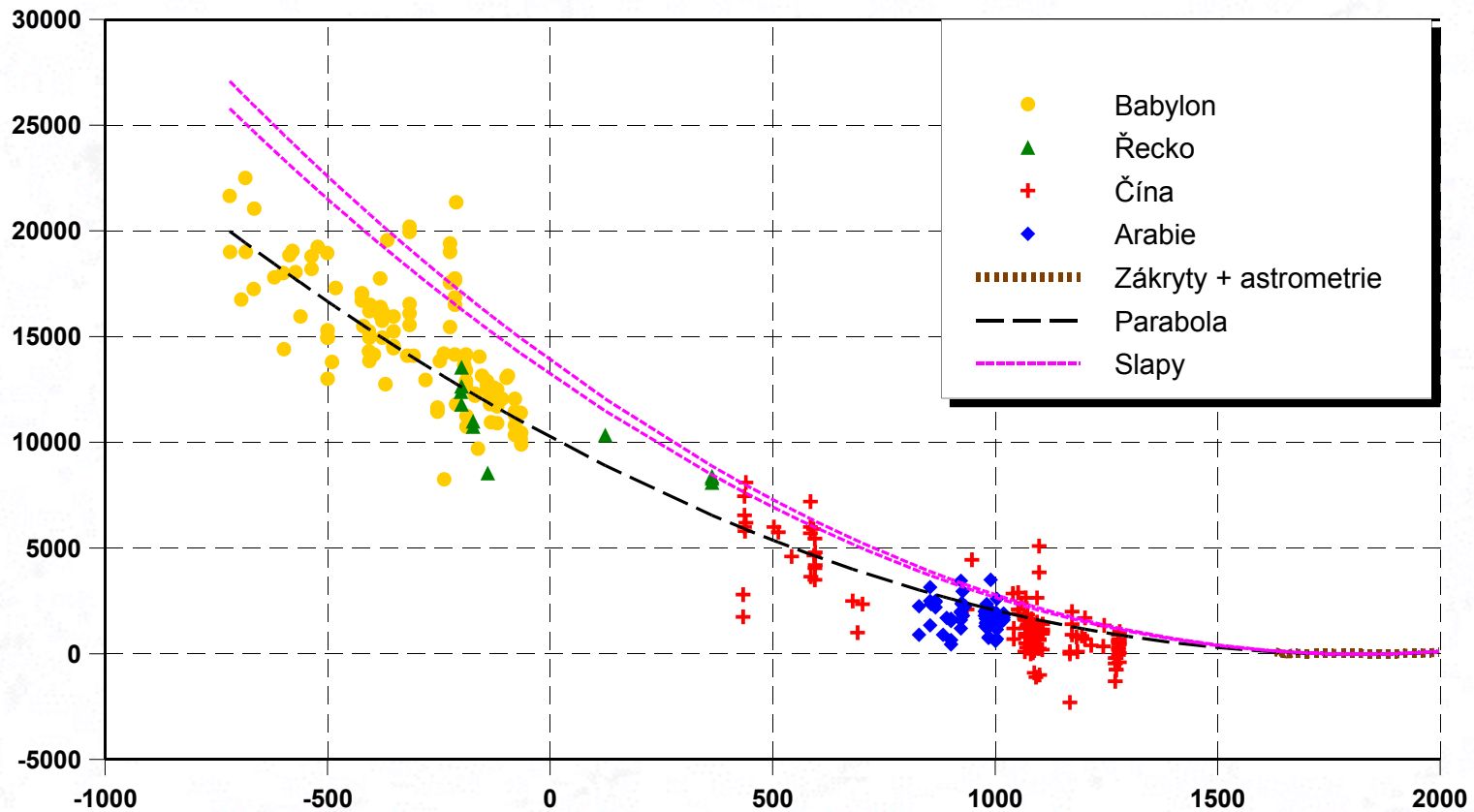
- Do cca 17. stol. (pouze vlastní rotace, precese):
 - ▶ Prosté oko (polohy hvězd, sluneční zatmění);
- Do konce 19. stol. (vlastní rotace, precese, nutace):
 - ▶ Dalekohled (polohy hvězd, zákryty hvězd Měsícem, přechody Venuše a Marsu přes Slunce).
- Do devadesátých let 20. stol. (všechny složky):
 - ▶ Optická astrometrie (zenitteleskop, pasážník, PZT, astroláb, cirkumzenitál...) - změny zeměpisných souřadnic.
- Od cca 1970:
 - ▶ Techniky kosmické goedézie (SLR, LLR, VLBI, GPS, DORIS).



Některé výsledky

A. Vlastní rotace

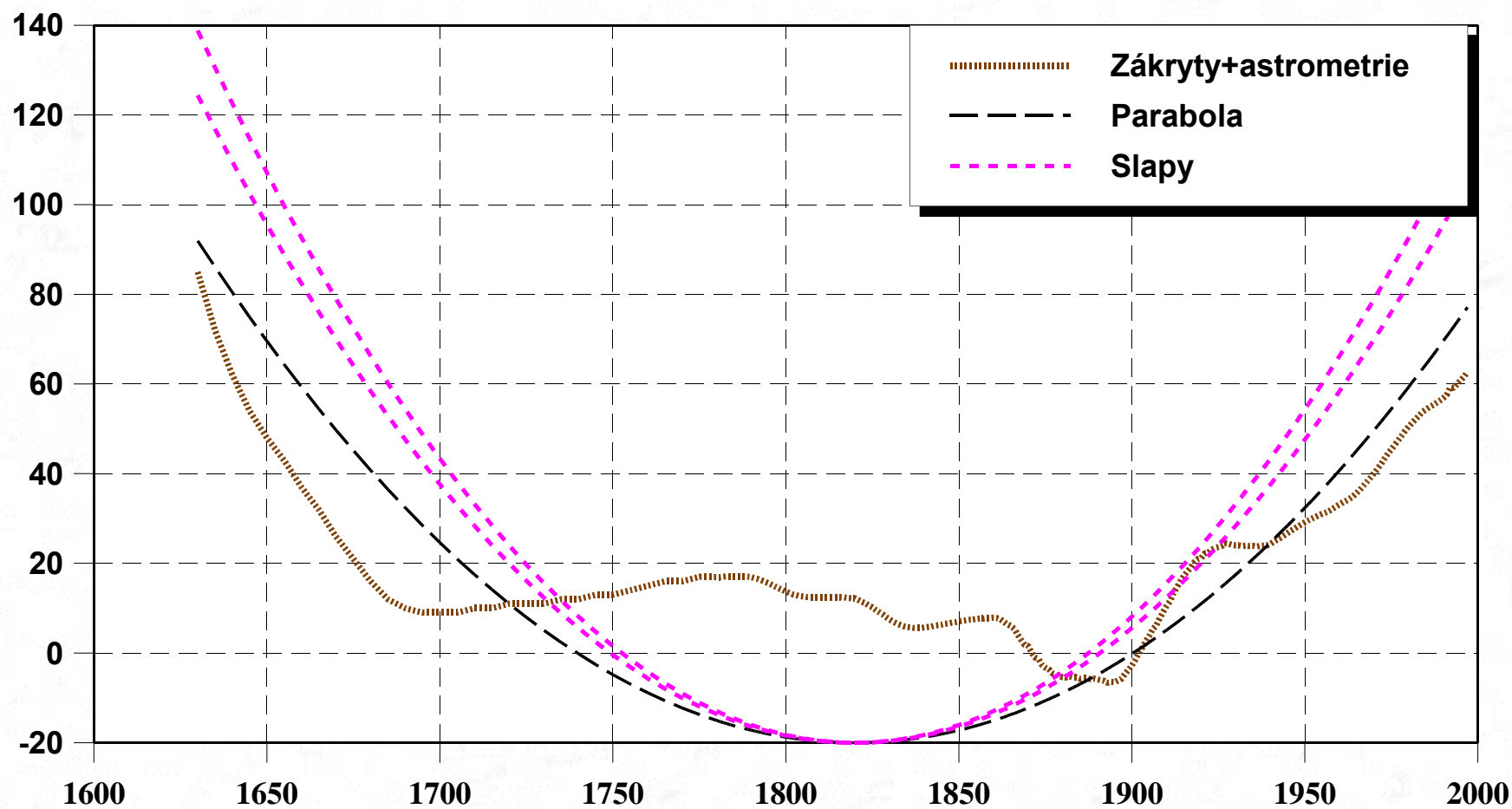
**ET-UT [sec] z pozorování zatmění (dle Stephenson 1997),
zákrytů hvězd Měsícem a astrometrických pozorování**



IX. Slovenská geofyzikálna konferencia, Bratislava, 22.-23. jún 2011

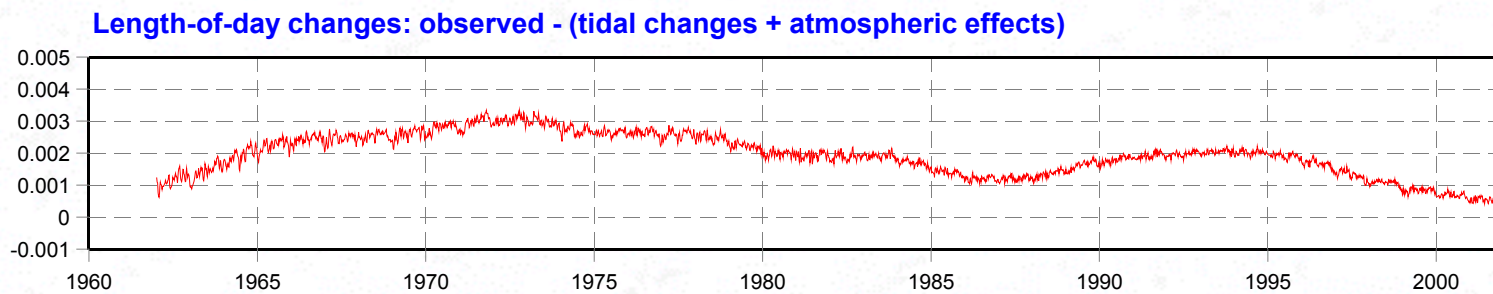
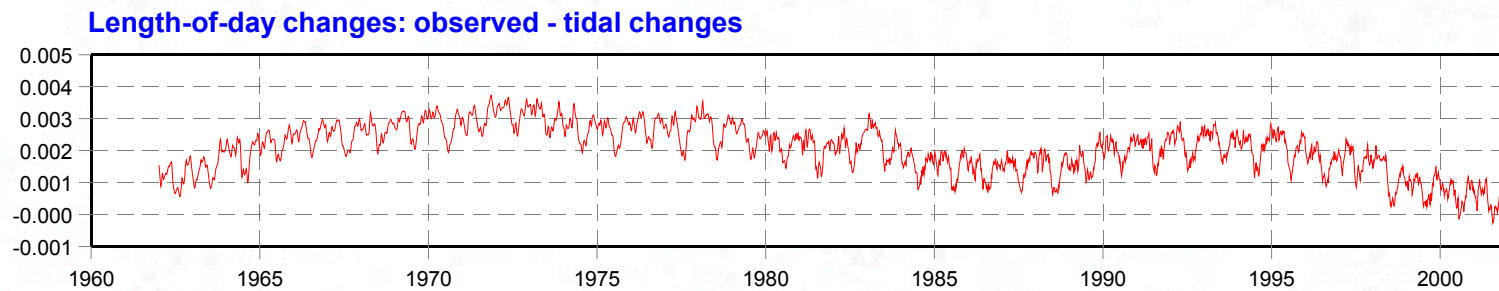
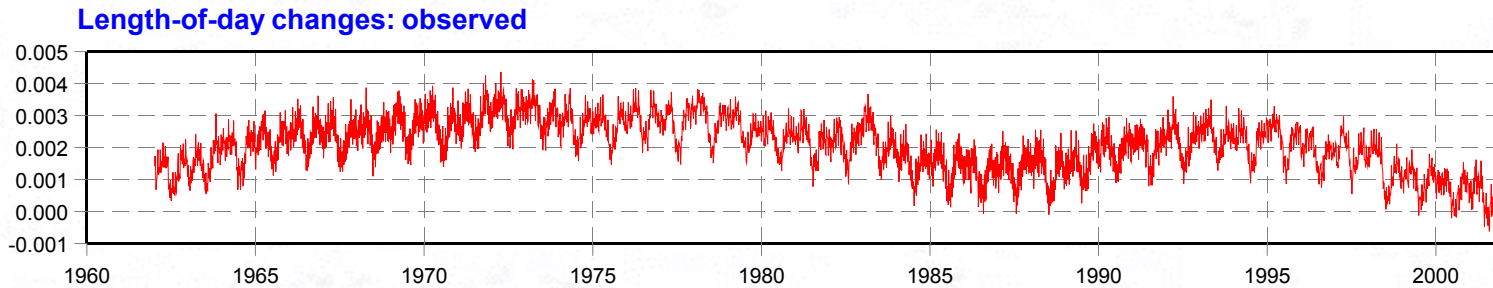


ET-UT [sec] z pozorování zákrytů hvězd Měsícem a z astrometrických pozorování



IX. Slovenská geofyzikálna konferencia, Bratislava, 22.-23. jún 2011

Variace délky dne z pozorování astrometrických a moderních kosmických technik (v sekundách)



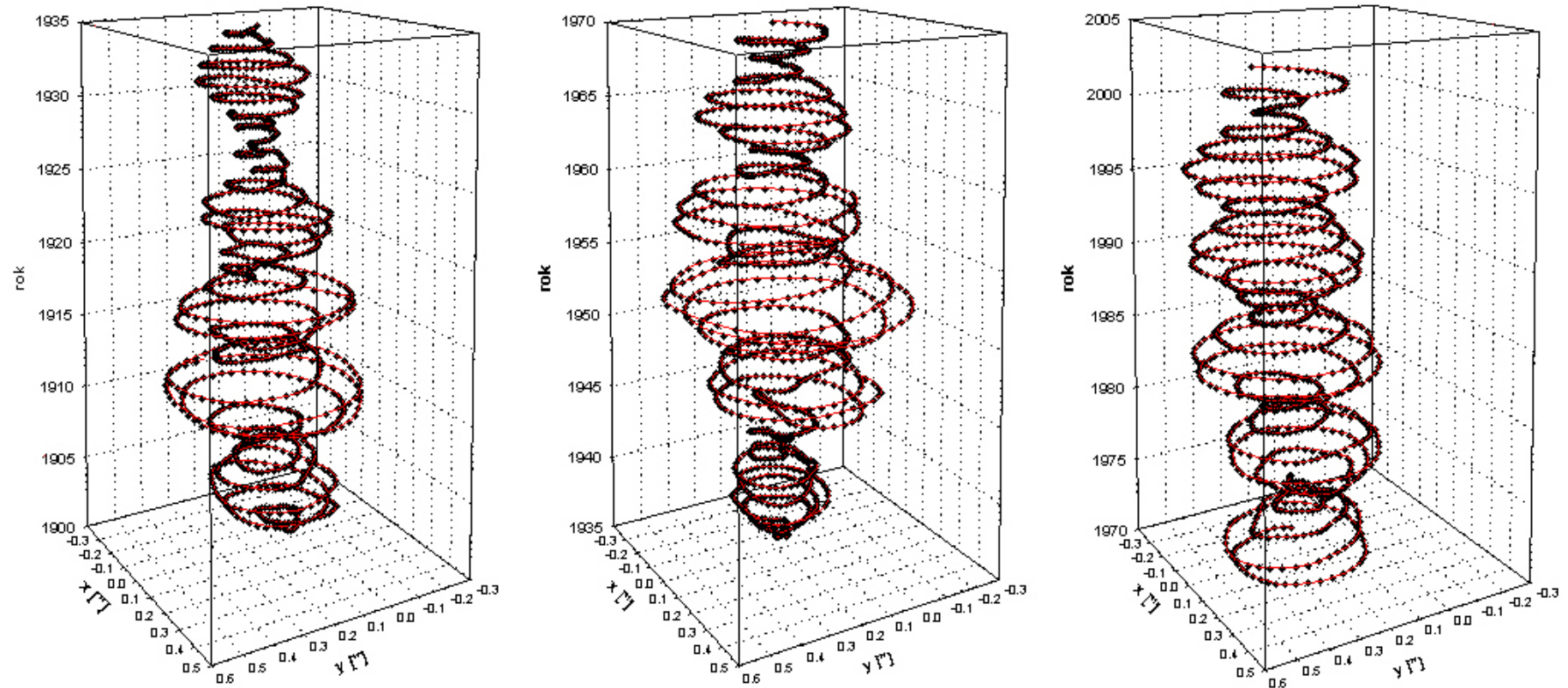
Změny rychlosti rotace - závěry:

- Postupné zpomalování rychlosti rotace:
 - Slapové tření, sekulární zmenšování zploštění Země.
- Dekádové kvaziperiodické změny:
 - Změny na rozhraní tekutého jádra a visko-elastického pláště.
- Změny o periodách několik dní - deset let:
 - Zonální proudění v atmosféře (delší periody);
 - Slapové změny hlavního momentu setrvačnosti Země (kratší periody).

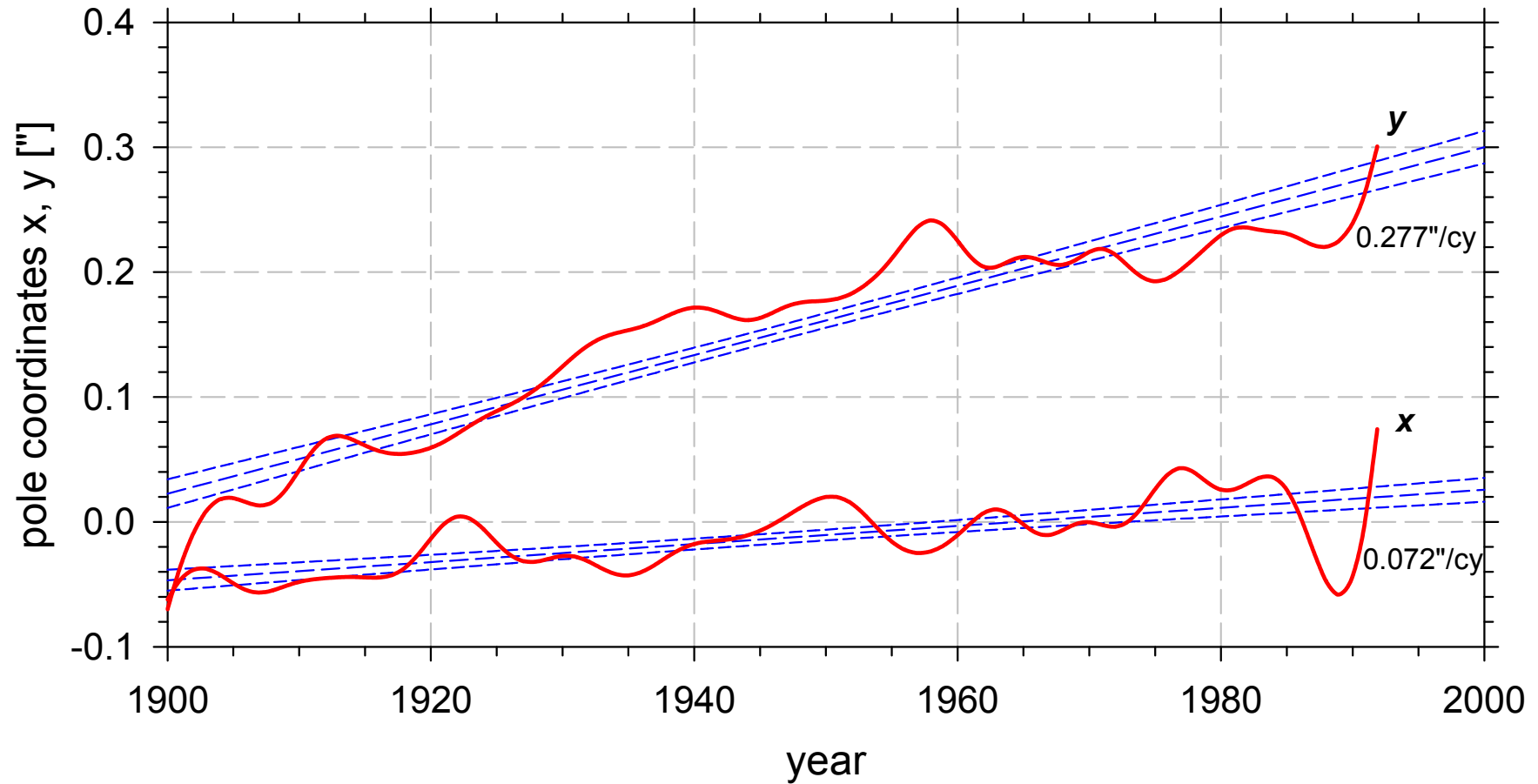


B. Pohyb pólu

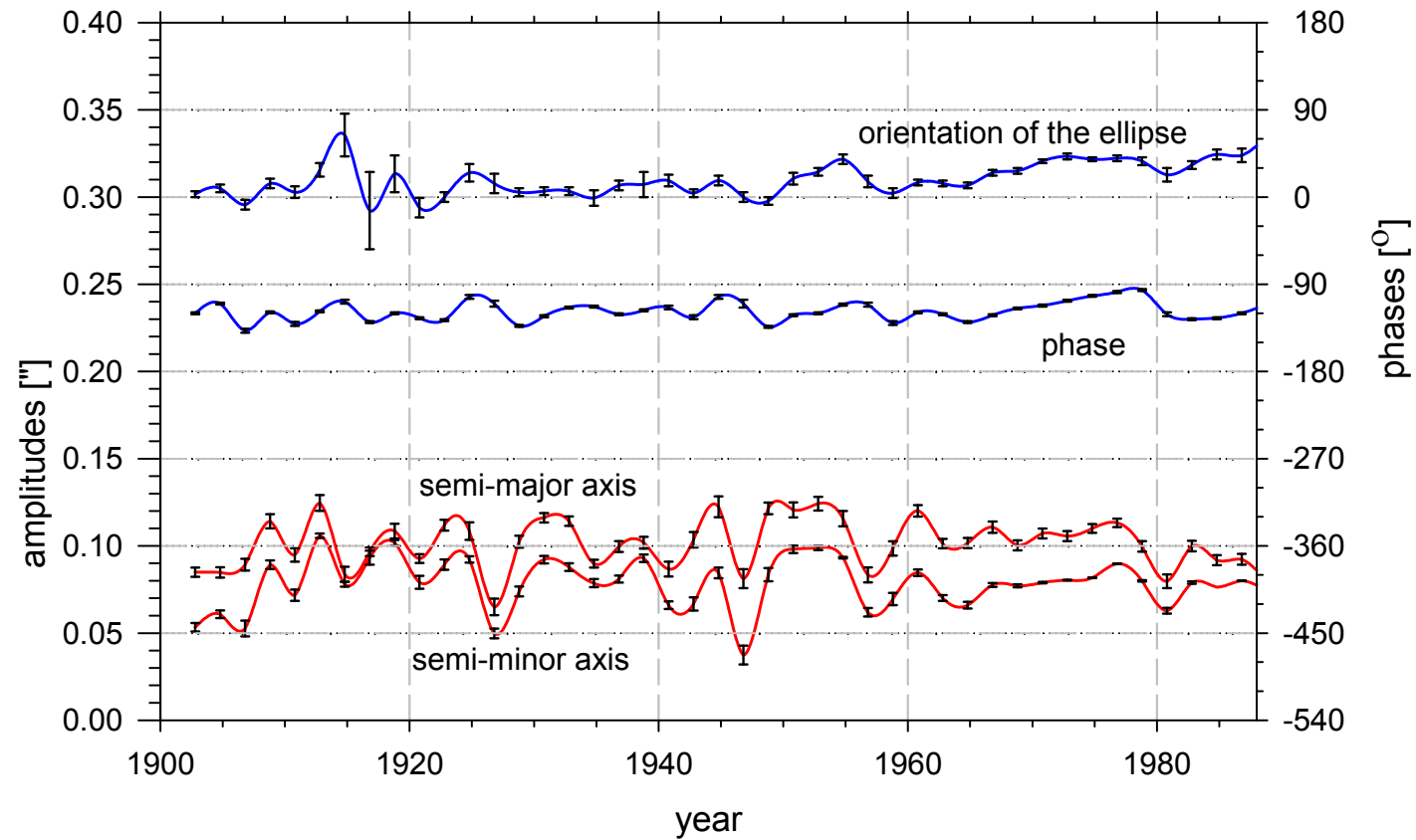
Kombinace astrometrických a moderních kosmických technik



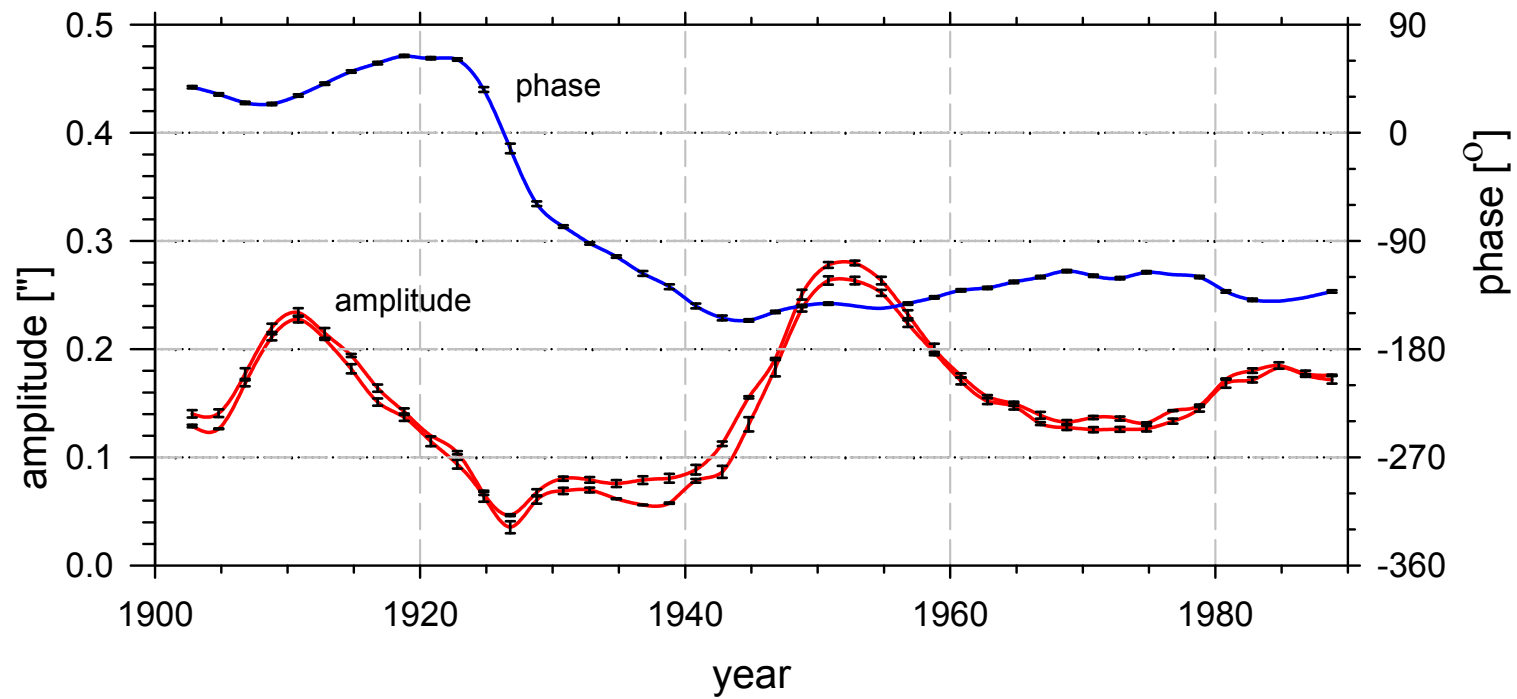
Secular and long-periodic polar motion



Parameters of annual wobble
(computed at 6y intervals)



Parameters of Chandler wobble
(computed at 6y intervals)



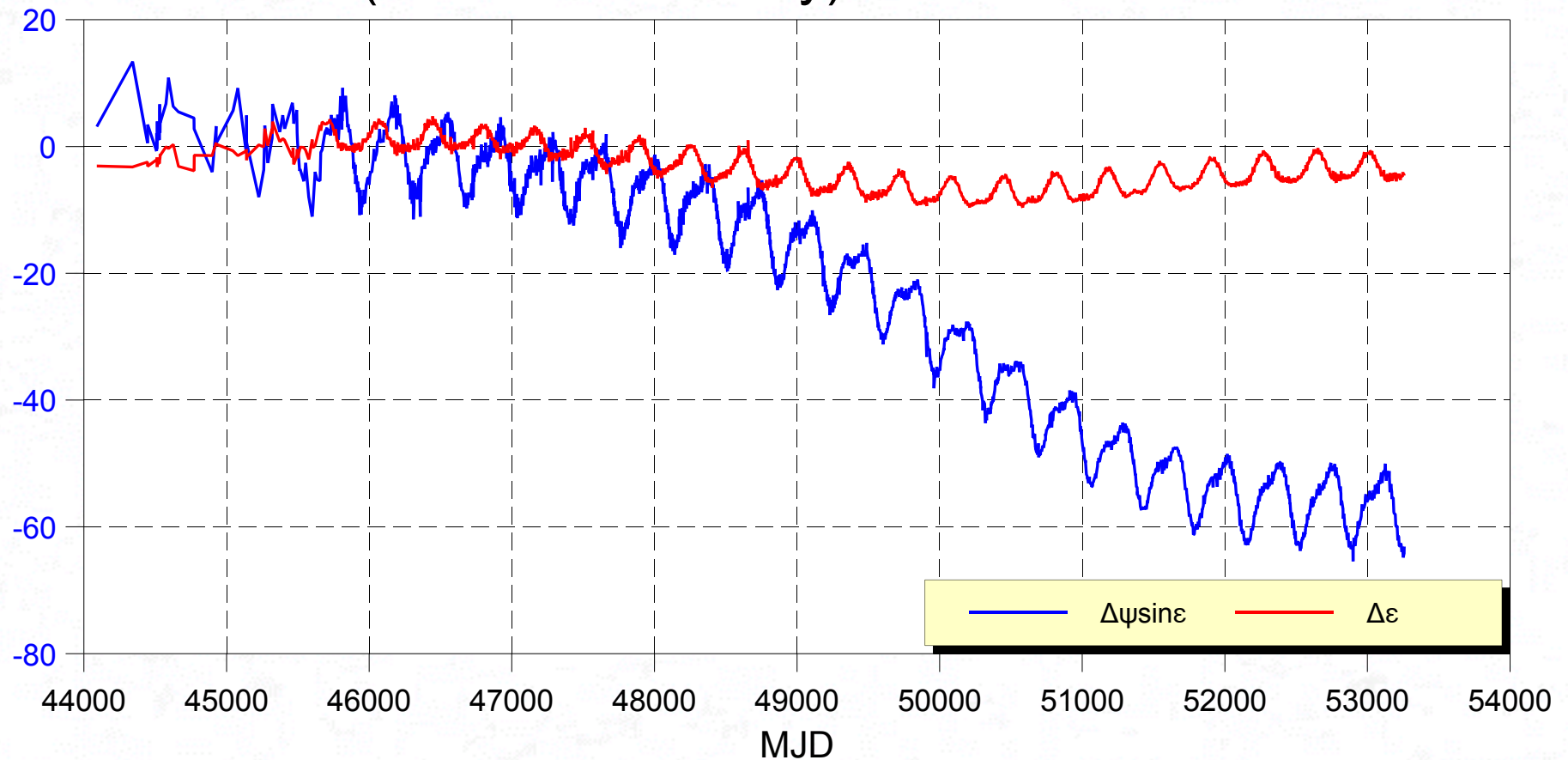
Pohyb pólu - závěry

- Sekulární/dlouhoperiodická složka:
 - ▶ Odlednění polárních oblastí.
- Roční složka:
 - ▶ Stabilnější nežli Chandlerovská;
 - ▶ Vynucená změnami tlaku vzduchu, pohyby oceánů a změnami podzemních vod.
- Chandlerovská složka ($P=435$ dní):
 - ▶ Nestabilní, proměnlivá amplituda i fáze;
 - Tlumená viskozitou pláště;
 - Excitovaná kombinovaným vlivem atmosféry a oceánu o frekvenci blízké 14 měsícům.

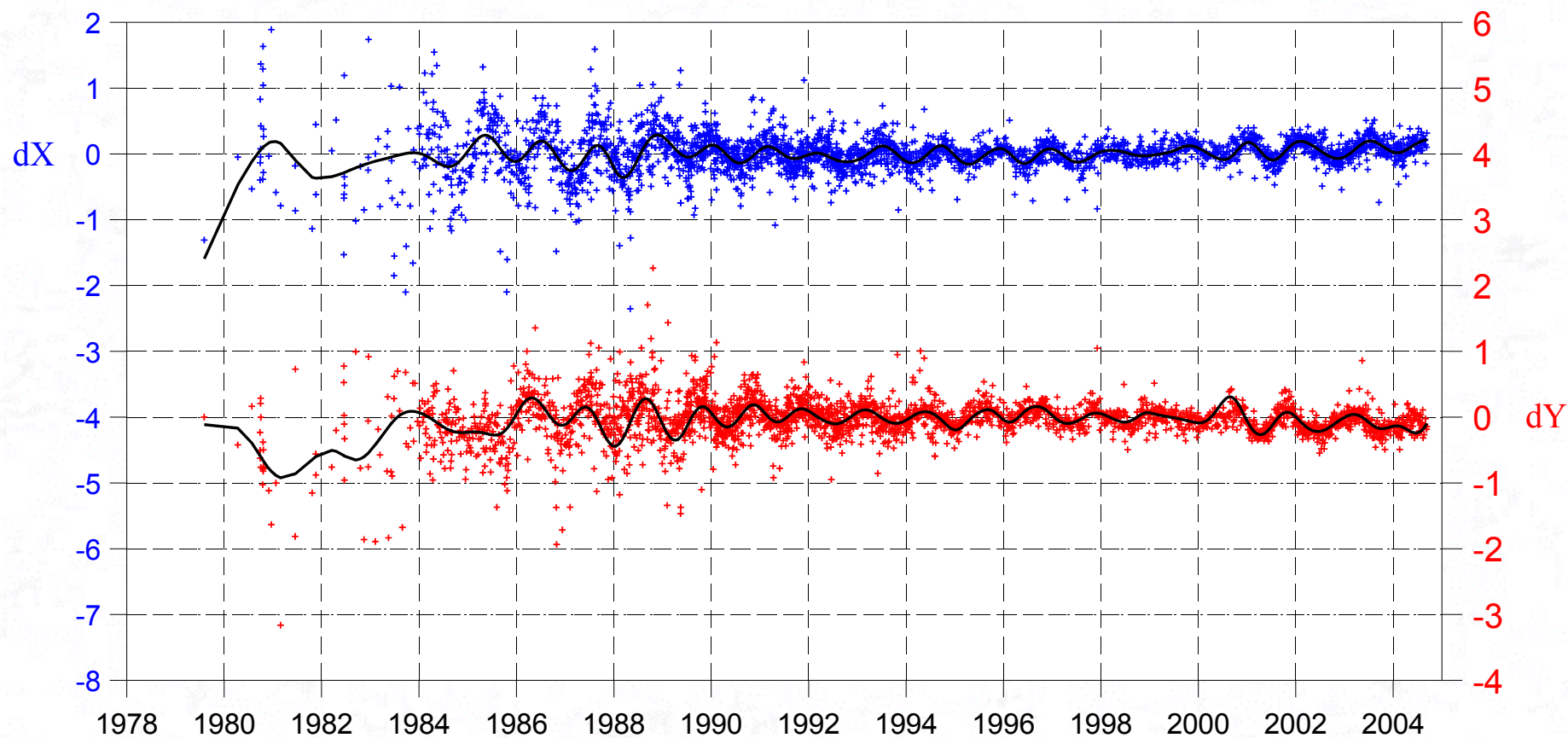


C. Odchyľky nebeského pólu

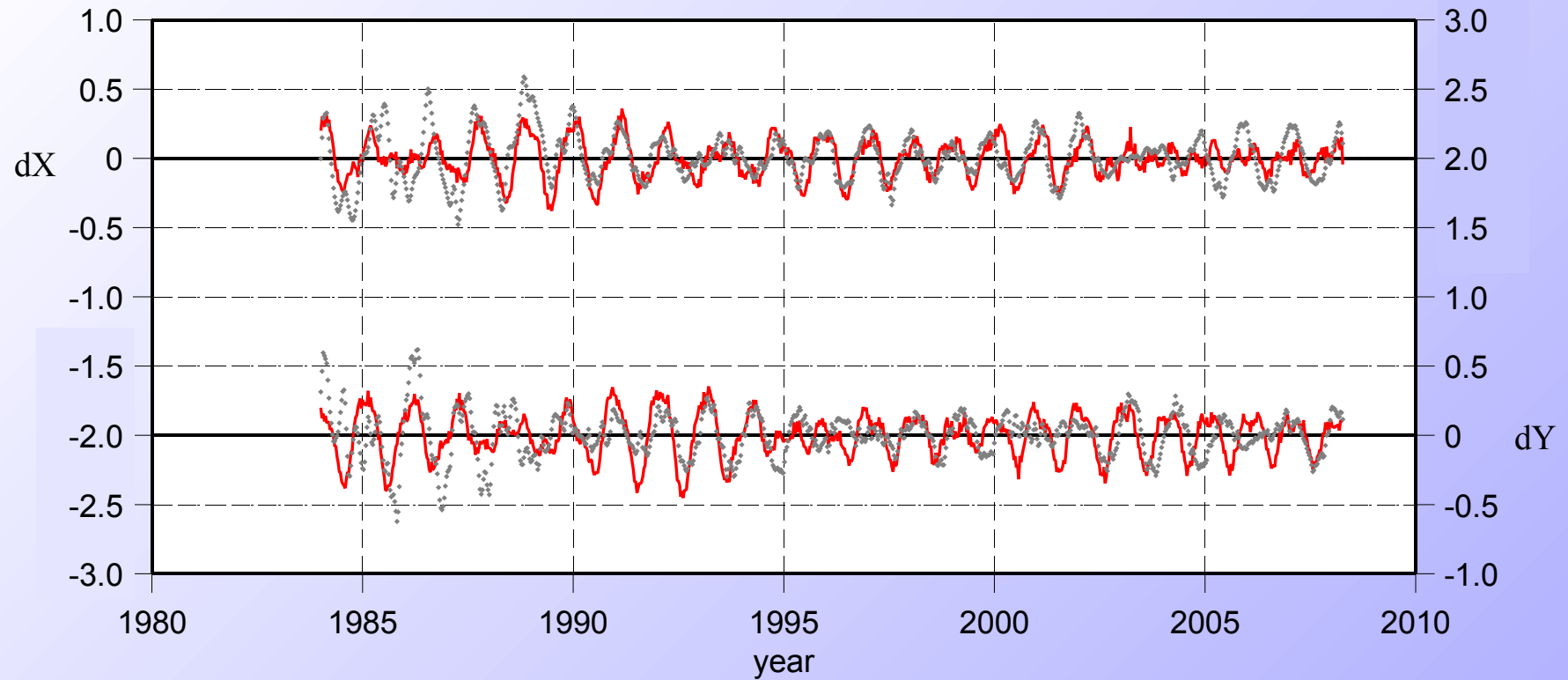
od IAU1980 (v tisícinach vteřiny)



od IAU2000 (v tisícinách vteřiny)



**Pozorované a integrované odchylky nebeského pólu
atmosféra NCEP AAM (pib+w), v 0,001"**



Odchyľky nebeského pólu - závěry

- Nový model IAU2000 souhlasí s pozorováním na úrovni $\pm 0,2$ mas;
- Dominantní odchyľka má periodu cca 435-460 dní a proměnlivou amplitudu $\approx 0,1$ mas (FCN);
- Významná je sezónní excitace atmosférou a oceány s amplitudou cca 0,1 mas.



Závěrem poznámka o vlivu zemětřesení

- Zemětřesení ovlivňují pouze rychlost rotace a pohyb pólu;
- Zemětřesení poblíž rovníku mají větší vliv na rychlost rotace, vliv na pohyb pólu roste se zeměpisnou šířkou;
- Vliv je velmi malý (nepozorovatelný v případě délky dne, na hranici pozorovatelnosti v případě pohybu pólu), ve srovnání s dominantním vlivem atmosféry a oceánů
 - ▶ (během roku kolísání délky dne o 1-2 milisekundy, pohyb pólu o amplitudě několika metrů):

zemětřesení	změna délky dne [μ s]	skok v poloze pólu [cm]
Sumatra 2004	-6,8	7
Chile 2010	-1,3	8
Japonsko 2011	-1,8	17

(podle R. Grosse, JPL Pasadena)

