

Pobudzanie nutacji ziemi przez niepływowe procesy w oceanach – najnowsze oszacowania i perspektywy

Aleksander Brzeziński

Centrum Badań Kosmicznych PAN
ul. Bartycka 18A, 00-716 Warszawa
alek@cbk.waw.pl

SEMINARIUM

Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji

Poznań, 23-24 czerwiec 2005 roku

Sesja II: Dynamika Ziemi

PLAN PREZENTACJI

Wprowadzenie

Teoria

definicje i oznaczenia

równanie ruchu

Analiza danych

zbiory danych

redukcja danych

analiza

Rezultaty

Wnioski i perspektywy dalszych badań

LITERATURA

Brzeziński, A., R. M. Ponte and A. H. Ali (2004). Nontidal oceanic excitation of nutation and diurnal/semidiurnal polar motion revisited, *J. Geophys. Res.*, **109**, No. B11, doi: 10.1029 / 2004JB003054.

WPROWADZENIE

Pobudzane przez dobowy cykl termiczny zmiany rozkładu mas atmosfery i oceanów oraz zmiany wiatrów i prądów oceanicznych powodują dobowe fluktuacje momentu pędu tych dwóch ośrodków, które z kolei na mocy prawa zachowania momentu pędu wywołują ruchy nutacyjne Ziemi stałej. Są to zaburzenia niewielkie w porównaniu z precesją-nutacją lunisolarną, poniżej 1 milisekundy łuku (mas - *milliarcsecond*). Z drugiej strony, ich wielkość przewyższa aktualną precyzję wyznaczeń parametrów nutacyjnych, zatem powinny być one brane pod uwagę w procesie modelowania precesji-nutacji. Te niewielkie składowe są również niezwykle ważne z punktu widzenia procesów fizycznych, które je wywołują.

Opisywana praca jest kontynuacją wcześniejszych badań (Petrov i in., 1998). Nowy szereg czasowy oceanicznego momentu pędu (OAM - *ocean angular momentum*) o wysokiej rozdzielczości czasowej (okres próbkowania 1 godzina) obliczony z barotropowego numerycznego modelu cyrkulacji oceanu (Ponte i Ali, 2002), został wykorzystany do obliczenia wpływu oceanu na precesję-nutację Ziemi. Jednym z ważnych celów jest stwierdzenie, na ile dynamiczna reakcja oceanu na oddziaływanie atmosfery różni się w zakresie częstotliwości nutacyjnych od dwóch prostych modeli reakcji stosowanych często w praktyce, tzw. reakcja odwróconego barometru (IB – *inverted barometer*), oraz non-IB czyli reakcja sztywnego oceanu. Przeprowadzony jest szczegółowy bilans pobudzania nutacji prostej rocznej oraz porównanie z wyznaczeniami VLBI. Podjęto także próbę zdefiniowania problemów, które wymagają dalszych badań.

DEFINICJE I OZNACZENIA

- Równikowa funkcja efektywnego momentu pędu (*effective angular momentum* – EAM)

$$\chi = \chi_1 + i\chi_2 = \chi^p + \chi^w, \text{ gdzie } i = \sqrt{-1} \quad (1)$$

χ^p : składowa materii (ciśnienie, wysokość oceanu)

χ^w : składowa ruchu (wiatr, prądy)

- Niebieska funkcja EAM (*celestial EAM* – CEAM)

$$\chi' = -\chi e^{i\Phi} \quad (2)$$

$\Phi \approx \Omega(t - t_o) + \Phi_o$: czas gwiazdowy Greenwich

- Zespólona reprezentacja nutacji

$$P = X + iY = \Delta\psi \sin \varepsilon_o + i\Delta\varepsilon \quad (3)$$

X, Y : współrzędne niebieskie bieguna

$\Delta\psi, \Delta\varepsilon$: nutacja w długości i nachyleniu

- Nutacje kołowe

$$P_\ell(t) = i \left(a_\ell^{ip} + i a_\ell^{op} \right) e^{is_\ell \theta_\ell(t)} \quad (4)$$

a_ℓ^{ip}, a_ℓ^{op} : amplitudy *in-phase* i *out-of-phase*

$\theta_\ell(t)$: standardowy argument nutacji

$s_\ell = 1$ lub -1 tak, by iloczyn $s_\ell \theta_\ell(t)$ wzrastał/malał gdy nutacja jest prosta/wsteczna

RÓWNANIE RUCHU

- Szerokopasmowe równanie Liouville'a (Brzeziński, 1994) wyrażone w układzie niebieskim

$$(\partial_t - i\sigma'_c)(\partial_t - i\sigma'_f) P = -i\sigma_c[(\partial_t - i\sigma'_f)(\chi'^p + \chi'^w) + (\partial_t - i\sigma'_c)(a_p\chi'^p + a_w\chi'^w)] \quad (5)$$

gdzie

∂_t : pochodna względem czasu

$\sigma'_c = \sigma_c + \Omega$: częstotliwość Chandlera wyrażona w układzie niebieskim

$\sigma'_f = \sigma_f + \Omega$: częstotliwość FCN wyrażona w układzie niebieskim

$$a_p = 9.2 \times 10^{-2}, \quad a_w = 5.5 \times 10^{-4}$$

oraz

$$\sigma_c = 2\pi F_c (1 + i/2Q_c) \quad \sigma'_f = 2\pi F'_f (1 - i/2Q'_f)$$

- Równanie w dziedzinie częstotliwości

$$P(\sigma') = \frac{\sigma_c}{\sigma'_c - \sigma'}[\chi'^p(\sigma') + \chi'^w(\sigma')] + \frac{\sigma_c}{\sigma'_f - \sigma'}[a_p\chi'^p(\sigma') + a_w\chi'^w(\sigma')] \quad (6)$$

gdzie σ' oznacza częstotliwość nutacji odniesioną do układu nieruchomego w przestrzeni.

Dane

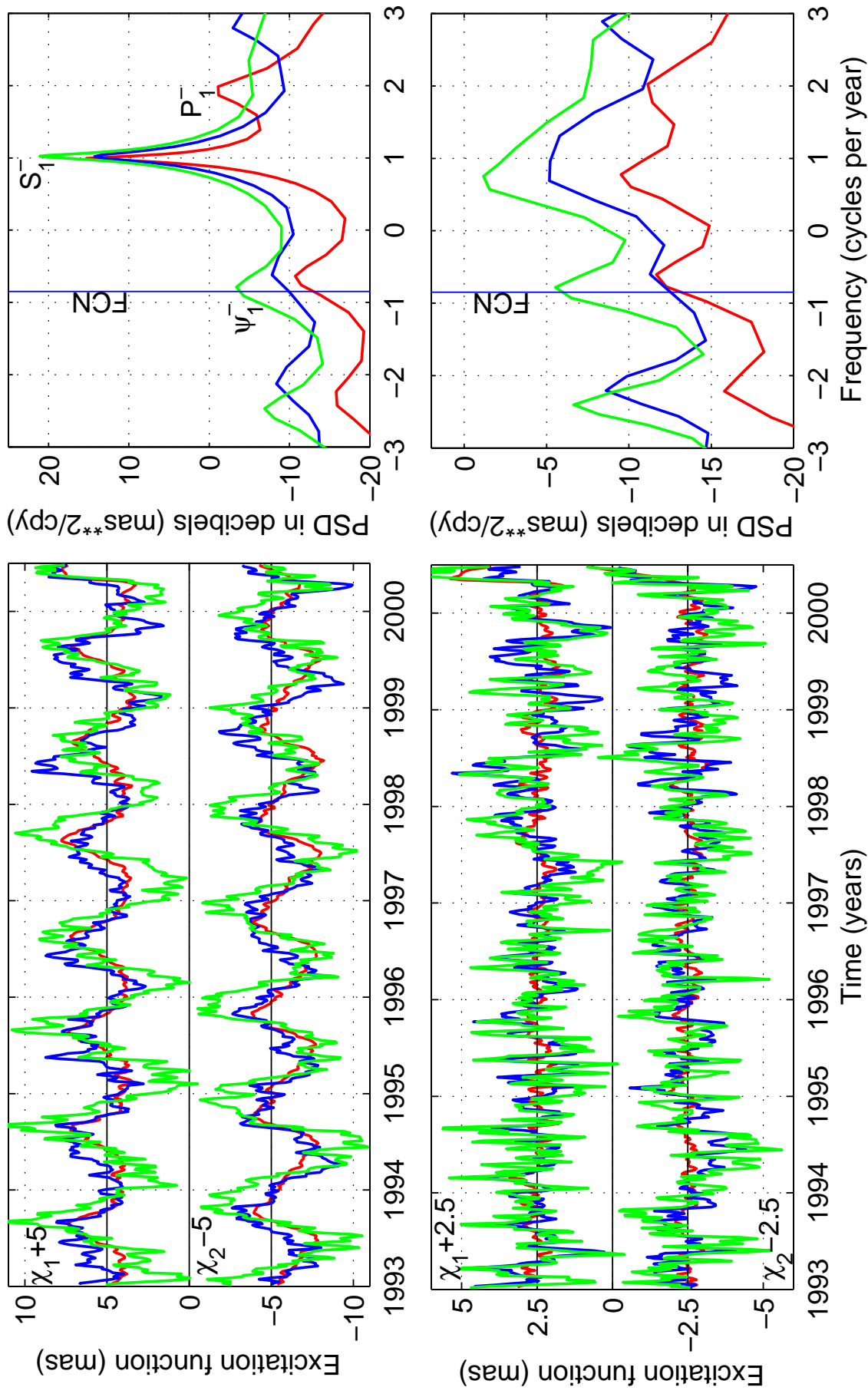
- Szereg OAM otrzymany z barotropowego modelu oceanu pobudzanego przez 6-godzinne pola wiatrów i ciśnienia z modelu *NCEP/NCAR reanalysis*, odniesiony do powierzchni oceanu uwzględniającej poprawkę IB (*inverted barometer*) (Ponte i Ali, 2002); okres: styczeń 1993 \rightarrow czerwiec 2000, $\Delta t = 1$ godz.
- Szereg AAM otrzymany z rezultatów projektu *NCEP/NCAR reanalysis* (Kalnay i in. 1996; Salstein i Rosen, 1997); okres: 1948 \rightarrow 2001, $\Delta t = 6$ godz.

Redukcja danych

- Obliczenie szeregów OAM i AAM odniesionych do układu niebieskiego przez zastosowanie metody demodulacji zespolonej dla częstotliwości $-\Omega$, r-nie (2). Wygładzenie i interpolacja ze stałym krokiem 5 dni.

Analiza danych

- Zastosowano identyczną procedurę do następujących szeregów: AAM, AAMIB, OAM, AAMIB+OAM, z których każdy został zredukowany do wspólnego interwału czasu 1993.0 – 2000.5.
- Przeprowadzono analizę widmową metodą maksimum entropii (MEM) i wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów parametry modelu składającego się z sumy zespolonych sinusoid z okresami ± 1 , $\pm 1/2$, $\pm 1/3$ roku oraz wielomianu 1-go stopnia
- Do parametrów modelu zastosowano funkcję przenoszenia (*transfer function*), r-nie (6), w celu policzenia atmosferycznych i oceanicznych zaburzeń parametrów nutacji
- Po usunięciu modelu przeprowadzono powtórna analizę nieregularnych rezydów



Rysunek 2. Składowa materii układu atmosfera/ocean dla różnych modeli reakcji oceanu na oddziaływanie atmosfery: non-IB (AAM - niebieski), IB (AAMIB - czerwony) i dynamiczna (AAMIB+OAM - zielony). Dolne wykresy zostały wykonane dla danych po odjęciu modelu opisanego w Tabeli 1.

Tabela 1: Atmosferyczne i oceaniczne efekty w nutacji. Oszacowanie wykonano dla danych z okresu 1993.0 – 2000.5. Zastosowano te same rozwinięcia, jak w pracy (Bizouard i in., 1998).

a) Składowe periodyczne. Faza funkcji wzbudzenia odnosi się do epoki J2000, faza nutacji do standardowego argumentu. Jednostki: stopnie dla fazy oraz mas (μ as) dla amplitud funkcji wzbudzenia (nutacji).

Term	Celestial period	EXCITATION		NUTATION					
		amplitude	phase	in-phase	out-of-phase				
		ψ_1^- wave		retrograde annual					
Air pressure	−365.26	0.196	±0.057	79.3	±16.7	100.1	±37.7	−29.5	±37.8
Air pressure IB		0.137	±0.036	140.5	±15.2	51.8	±27.2	51.3	±27.2
Wind		2.155	±0.301	147.5	±8.0	6.9	±2.3	9.2	±2.3
Ocean mass		0.233	±0.073	−175.7	±18.0	3.1	±39.9	124.0	±39.9
Ocean currents		0.181	±0.091	−141.0	±28.8	−0.6	±0.7	0.8	±0.7
AAM						107.0	±37.8	−20.3	±37.9
AAMIB						58.7	±27.3	60.5	±27.3
OAM+AAMIB						61.2	±48.3	185.3	±48.3
		S_1^- wave		prograde annual					
Air pressure	365.26	1.775	±0.056	171.1	±1.8	−7.5	±2.5	−72.5	±2.5
Air pressure IB		1.461	±0.037	134.2	±1.4	−40.8	±2.1	−44.0	±2.1
Wind		13.548	±0.274	−17.4	±1.2	−7.1	±0.7	−26.9	±0.7
Ocean mass		1.758	±0.084	105.0	±2.7	−68.6	±4.3	−22.3	±4.3
Ocean currents		2.173	±0.092	46.9	±2.4	3.4	±0.3	−2.9	±0.3
AAM						−14.6	±2.6	−99.4	±2.6
AAMIB						−47.9	±2.2	−70.9	±2.2
OAM+AAMIB						−113.1	±4.8	−96.1	±4.8

Tabela 1: (c.d.)

a) Składowe periodyczne.

Term	Celestial period	EXCITATION		NUTATION					
		amplitude	phase	in-phase	out-of-phase				
		P_1^- wave							
Air pressure	182.62	0.212	± 0.061	73.3	± 16.4	4.4	± 2.2	-3.3	± 2.2
Air pressure IB		0.475	± 0.027	-91.9	± 3.2	-11.3	± 0.9	4.7	± 0.9
Wind		18.342	± 0.258	-168.3	± 0.8	-6.2	± 0.6	-38.9	± 0.6
Ocean mass		0.640	± 0.092	118.2	± 8.3	16.4	± 2.7	2.2	± 2.7
Ocean currents		0.279	± 0.073	98.1	± 15.0	-0.6	± 0.2	0.1	± 0.2
AAM						-1.8	± 2.3	-42.2	± 2.3
AAMIB					-17.5	± 1.1	-34.2	± 1.1	
OAM+AAMIB						-1.7	± 2.9	-31.9	± 2.9

b) Przemieszczenie bieguna niebieskiego odniesione do epoki J2000. Jednostki: mas dla funkcji wzbudzenia i μ as dla współrzędnych bieguna.

Term	EXCITATION		CELESTIAL POLE					
	χ_1	χ_2	$d\psi \sin(\varepsilon)$	$d\varepsilon$				
	K_1^- wave		constant					
Air pressure	0.273	± 0.064	-0.280	± 0.061	-25.5	± 11.5	25.4	± 11.5
Air pressure IB	0.054	± 0.036	-0.846	± 0.030	-6.1	± 3.7	77.9	± 3.2
Wind	-15.624	± 0.280	2.657	± 0.278	-27.3	± 0.7	4.6	± 0.6
Ocean mass	-0.006	± 0.087	0.609	± 0.087	1.4	± 8.3	-56.1	± 8.3
Ocean currents	0.106	± 0.082	0.171	± 0.083	0.2	± 0.3	0.3	± 0.3
AAM					-52.8	± 11.5	30.0	± 11.5
AAMIB					-33.4	± 3.8	82.5	± 3.3
OAM+AAMIB					-31.8	± 9.1	26.7	± 8.9

Tabela 2: Bilans wzbudzenia dla nutacji rocznej prostej (składowa S_1 funkcji wzbudzenia)

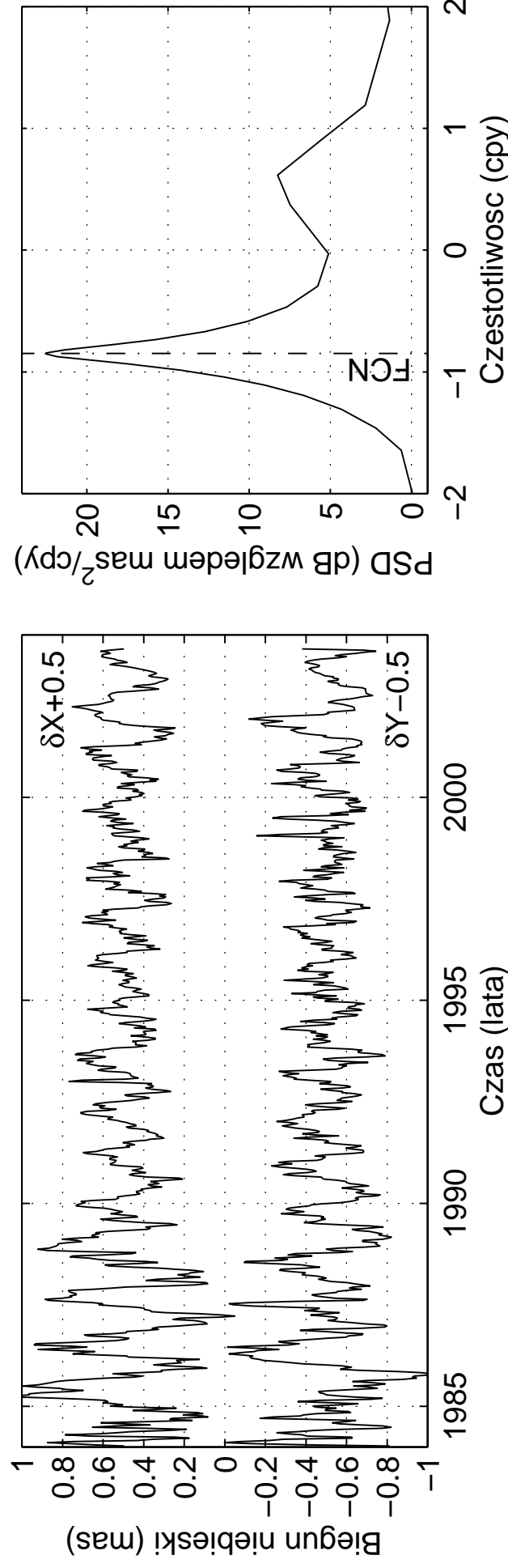
	in-phase	out-of-phase
Mathews <i>et al.</i> (2002)		
Anelasticity	10	4
Ocean tide load	21	−23
Ocean tide currents	0	1
CMB electromagnetic coupling	0	−3
ICB electromagnetic coupling	14	−3
Sun-synchronous	10.4	−108.2
This work		
AAM	−14.6	−99.4
AAMIB	−47.9	−70.9
AAMIB+OAM	−113.1	−96.1

WNIOSKI

- Obliczenia pokazały, że nowy szereg OAM o wysokiej rozdzielczości czasowej jest dużo lepszy, niż ten użyty przez Petrowa i in. (1998).
- Wpływ dynamicznie sprzężonego układu atmosfera-ocean na parametry składowych nutacji jest istotny jedynie w następujących przypadkach
 - stałe przemieszczenie bieguna $\delta\psi \sin \varepsilon_0 = -32 \mu\text{s}$, $\delta\varepsilon = 27 \mu\text{s}$;
 - nutacja roczna wsteczna $A = 195 \mu\text{s}$;
 - nutacja roczna prosta $A = 148 \mu\text{s}$;
 - nutacja półroczna prosta $A = 32 \mu\text{s}$.
- Porównanie czynników pobudzających nutację roczną prostą odpowiadającą pływowi S_1 z wyznaczeniami VLBI pokazuje, że dynamiczny model daje gorsze wyniki, niż non-IB
 - \Rightarrow oczekuje się poprawy reprezentacji harmoniki S_1 w modelu cyrkulacji oceanu;
 - \Rightarrow pozostałe elementy budżetu powinny być przeliczone na nowo.
- Model dynamiczny pokazuje znaczący wzrost mocy w otoczeniu rezonansowej częstotliwości FCN w porównaniu z modelami IB i non-IB.
- Nieregularna składowa OAM+AAMIB jest znacząco skorelowana z szeregiem non-IB AAM
 - \Rightarrow w odróżnieniu od zjawisk długookresowych (zmiany sezonowe, ruch Chandlera itd.), w przypadku nutacji szereg non-IB AAM jest lepszy, niż AAMIB.

CO DALEJ?

- Analiza pobudzenia swobodnej oscylacji FCN przez układ atmosfera-ocean



- Liczenie „geodezyjnej” funkcji pobudzenia nutacji i porównanie jej z danymi AAM, OAM (prezentacja Sergeja Bolotina, referat na kongres Dynamic Planet 2005 w Australii)
- Oczekujemy nowych, poprawionych wyznaczeń AAM, a przede wszystkim OAM