

ALEKSANDER BRZEZIŃSKI

Centrum Badań Kosmicznych

Polska Akademia Nauk

Warszawa

NOWY MODEL PRECESYJNO-NUTACYJNY

ZARYS TREŚCI: Rezolucja B1.6 XXIV Zgromadzenia Generalnego Międzynarodowej Unii Astronomicznej w Manchesterze w 2000 roku zaleca zastąpienie od początku roku 2003 modelu precesji IAU1976 oraz teorii nutacji IAU1980 nowym modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000. Model ten określa chwilowy kierunek bieguna niebieskiego w Geocentrycznym Niebieskim Systemie Odniesienia z dokładnością do 0.2 mas (milisekundy łuku). Jednocześnie zakłada się kontynuację monitorowania niezamodelowanych reziduum nutacyjnych, zawierających m.in. sygnał swobodnej nutacji jądra FCN, za pomocą techniki radiointerferometrii długich baz VLBI. Nowy model precesyjno-nutacyjny wykorzystuje rozwiązanie dla modelu Ziemi sztywnej autorstwa Souchay i in. (1999) oraz współczynniki transformacji uwzględniające deformacje Ziemi, obliczone przez Mathewsa i in. (2002) – model MHB2000. Model MHB2000 poprawia teorię IAU1980 poprzez uwzględnienie takich efektów, jak lepkość płaszczka, pływy oceaniczne, elektromagnetyczne sprzężenie między ciekłym jądrem i płaszczem, czy też pewne nieliniowe wyrazy pomijane we wcześniejszych rozwinięciach.

Zgodnie z definicją Pośredniego Bieguna Niebieskiego CIP zawartą w Rezolucji B1.7 Zgromadzenia Generalnego IAU w Manchesterze, model IAU2000 zawiera wyrazy nutacyjne o okresach dłuższych niż 2 doby. Składowe o okresach krótszych, głównie dobowe i półdobowe o łącznej wielkości rzędu 0.1 mas, określane często mianem „subdiurnal nutations”, są interpretowane jako zmiana kierunku bieguna CIP w układzie związanym z Ziemią, czyli jako ruch bieguna. Model tych składowych został opracowany i włączony do IERS Conventions 2003 jako element transformacji między układami niebieskim i ziemskim.

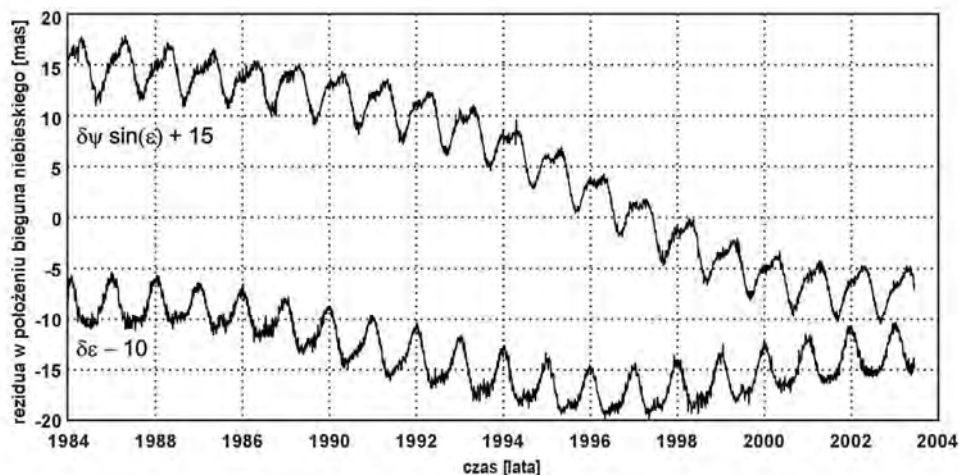
Niniejsze opracowanie jest próbą syntetycznego opisu modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000. Oprócz aspektów teoretycznych przedstawiono genezę i szczegóły organizacyjne działań, które doprowadziły do uzgodnienia nowego modelu, a także listę zagadnień i problemów, które w opinii autora wymagają kontynuacji badań.

1. WPROWADZENIE

W roku 1979 Międzynarodowa Unia Astronomiczna (IAU) przyjęła model nutacji „The IAU1980 Theory of Nutation” (Seidelmann 1982) jako obowiązujący standard do stosowania łącznie z modelem precesji IAU1976. Była to teoria geofizyczna autorstwa Johna Wahra z USA. Obliczona została dla modelu Ziemi sprężystej z ciekłym jądrem, bez oceanów i atmosfery (Wahr 1981) i z wykorzystaniem modelu precesyjno-nutacyjnego dla Ziemi sztywnej (Kinoshita 1977; Kinoshita i in. 1979). Przyjęty model opisywał ruchy w przestrzeni inercjalnej tzw. Niebieskiego Bieguna Efemerydalnego *CEP* (Celestial Ephemeris Pole) zdefiniowanego w raporcie (Seidelmann 1982).

Porównania przewidzianych teorią wartości kątów nutacyjnych w długości i nachyleniu ekliptyki z obserwacjami radiointerferometrii długich baz (Very Long Baseline Interferometry, VLBI) wykazały już w drugiej połowie lat 80. systematyczne rozbieżności rzędu 10 milisekund łuku (mas – milliarcseconds) (rys. 1). Dla porównania, dokładność wyznaczeń parametrów orientacji przestrzennej Ziemi EOP (Earth Orientation Parameters) wynosiła już wtedy nieco poniżej 1 mas, a obecnie osiągnęła poziom 0.1 mas. Podczas Zgromadzenia Generalnego IAU w 1994 roku (Haga) przyjęto Rezolucję C1, w której zalecano prowadzenie regularnych wyznaczeń poprawek obserwacyjnych do teorii nutacji IAU1980 oraz poproszono Międzynarodową Służbę Ruchu Obrotowego Ziemi IERS (International Earth Rotation Service) o przygotowanie empirycznego modelu tych poprawek. Uchwalono również Rezolucję B8, powołującą wspólną grupę roboczą IAU/IUGG (Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki) – Working Group on the Non-Rigid Earth Nutation Theory – pod przewodnictwem Veronique Dehant z Belgii w celu opracowania nowego modelu precesyjno-nutacyjnego dla Ziemi niesztywnej.

Prace grupy roboczej, w których uczestniczyło międzynarodowe grono badaczy w liczbie około 30 osób, trwały 6 lat. Szczegóły dyskusji oraz wstępne wnioski opisane są w obszernym raporcie (Dehant i in. 1999). Osiągnięto konsensus, w wyniku którego zaproponowano IAU nowy, znacznie dokładniejszy model (rys. 2). Model został przyjęty podczas Zgromadzenia Generalnego IAU w 2000 roku (Manchester) jako model precesyjno-nutacyjny IAU2000, a następnie zatwierdzony przez Zgromadzenie Ogólne IUGG w 2003 roku (Sapporo). Grupa robocza IAU/IUGG rozwiązała się formalnie w 2000 roku, ale przez kolejne 3 lata kontynuowała prace w zbliżonym składzie jako grupa robocza Komisji 19 IAU „Earth Rotation”. Dyskutowano zarówno zagadnienia techniczne związane z implementacją nowego modelu, jak i problemy naukowe. Ważnym rezultatem było uzgodnienie modelu perturbacji lunisolarnych bieguna niebieskiego o okresach dobowych i krótszych względem układu inercjalnego (Brzeziński i Mathews 2003; Dehant i Brzeziński 2004).



Rys. 1. Rezidua obserwacyjne VLBI w stosunku do modelu precesji IAU1976 i teorii nutacji IAU1980. Wykorzystano rozwiązanie EOP (IERS C04) dostępne pod adresem internetowym <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04>

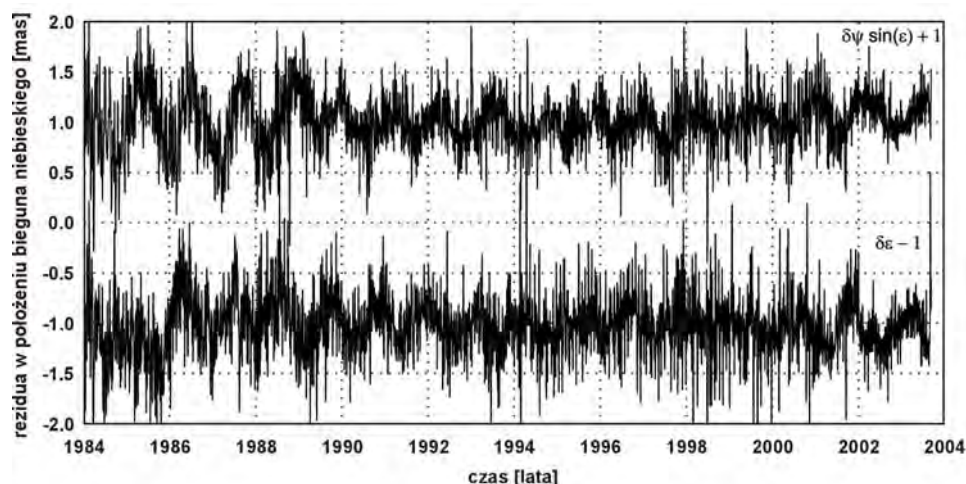
Celem niniejszego opracowania jest omówienie wybranych zagadnień dotyczących modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000. Na początku przedstawiono nowy model na tle innych rezolucji IAU, dotyczących transformacji między systemami współrzędnych ziemskich i niebieskich (rozdział 2). Następnie w rozdziale 3 przedyskutowano niektóre aspekty teoretyczne modelu. Oddzielnie opisano model nutacji o wysokich częstotliwościach (rozdział 4). W końcowym fragmencie pracy (rozdział 5) przedstawiono listę zagadnień i problemów odnoszących się do nowego modelu, które w opinii autora niniejszego opracowania wymagają kontynuacji badań.

2. MODEL PRECESYJNO-NUTACYJNY IAU2000 JAKO ELEMENT PAKIETU REZOLUCJI IAU

Powodem rozpoczęcia prac nad nowym modelem precesyjno-nutacyjnym były wykryte rozbieżności między teorią a obserwacjami VLBI. Jednakże ogromny postęp w zakresie osiąganych precyzji i rozdzielczości czasowej obserwacji dotyczących globalnych układów współrzędnych i ruchu obrotowego Ziemi, jaki nastąpił w ostatnich dwóch dekadach, doprowadził do wielu innych zmian w standardach, definicjach i modelach rekomendowanych przez IAU. Szczegółowy opis można znaleźć w rozdziale „Objaśnienia” Rocznika Astronomicznego na rok 2004 (Kryński i Sękowski 2003) bądź w IERS Conventions 2003 (IERS 2004). Poniżej omówione zostaną jedynie te zmiany, które miały znaczenie dla opracowania oraz implementacji modelu IAU2000.

Teoria nutacji IAU1980 opisywała ruch bieguna *CEP*, którego definicja (Seidelmann 1982) przyjmowała w sposób niejawnny, że obserwacje parametrów ruchu obrotowego Ziemi są uśredniane w obrębie jednej doby. Pojawienie się możliwości wyznaczeń EOP z rozdzielczością rzędu godzin pociągało za sobą konieczność uściślenia definicji bieguna *CEP*. Jest to ciekawe zagadnienie z zakresu kinematyki ruchu obrotowego Ziemi, a źródłem niejednoznaczności jest używanie pięciu parametrów EOP do opisu zjawiska, które ma w rzeczywistości trzy stopnie swobody. Te parametry to: współrzędne x , y bieguna w układzie ziemskim, dwa parametry nutacyjne (kąty $\delta\psi$, $\delta\varepsilon$ lub, równoważnie, współrzędne X , Y bieguna w układzie niebieskim), wreszcie jako piąty parametr opisujący składową oś rotacji, czyli spin (czas uniwersalny *UTI* lub, równoważnie, zmiana długości doby LOD). Każdą perturbację współrzędnych x , y bieguna można wyrazić jako zmianę parametrów nutacyjnych i na odwrót; np. (Brzeziński i Capitaine 1993). Definicja bieguna powinna jednoznacznie określać, które perturbacje składowej równikowej ruchu obrotowego Ziemi traktujemy jako ruchy bieguna, a które jako nutację, przy jednoczesnym uwzględnieniu specyfiki technik obserwacyjnych. Nowa definicja Pośredniego Bieguna Niebieskiego *CIP* (Celestial Intermediate Pole), który zastąpił *CEP*, została przyjęta w Rezolucji B1.7 IAU z 2000 roku (Manchester). Stwierdza ona, że ruch bieguna *CIP* w układzie niebieskim (czyli nutacja) obejmuje wszystkie składowe harmoniczne o okresach dłuższych niż 2 dni, a pozostałe zaburzenia są traktowane jako ruchy w układzie ziemskim (czyli ruch bieguna). W konsekwencji, model IAU2000 obejmuje jedynie precesję i wyrazy długookresowe nutacji. Zaburzenia lunisolarne położenia bieguna *CIP* o okresach dobowych i krótszych odniesionych do nieobracającego się układu (rozdział 4) są wydzielone i reprezentowane jako model ruchu bieguna.

Istotne znaczenie dla implementacji modelu IAU2000 miało przyjęcie w Rezolucji B2 IAU z 1997 roku (Kyoto) nowej definicji niebieskiego systemu odniesienia *ICRS* (International Celestial Reference System) poprzez pozycje odległych obiektów pozagalaktycznych. W konsekwencji, transformacja między systemami niebieskim i ziemskim nie wymaga znajomości położenia płaszczyzny ekliptyki i punktu równonocy. Używane tradycyjnie w opisie nutacji kąty $\delta\psi$, $\delta\varepsilon$ można zastąpić przez współrzędne X , Y bieguna *CIP* w układzie niebieskim i dla nich sformułować model precesyjno-nutacyjny. W aproksymacji liniowej zachodzi następująca zależność: $X = \delta\psi \sin\varepsilon_0$, $Y = \delta\varepsilon$, gdzie ε_0 jest średnim nachyleniem ekliptyki do równika, odniesionym do epoki J2000.0 (Brzeziński i Capitaine 1993). Implementacja modelu IAU2000 opisana w (IERS 2004, Chapter 5) i dostępna w postaci programów komputerowych, obejmuje oba warianty, tzn. $\delta\psi$, $\delta\varepsilon$ bądź X , Y , zostawiając wybór użytkownikowi. Różnice między wyznaczeniami VLBI parametrów nutacyjnych a modelem precesyjno-nutacyjnym IAU2000 są pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Rezydua obserwacyjne VLBI w stosunku do modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000. Wykorzystano rozwiązanie EOP (IERS C04) dostępne pod adresem internetowym <http://hpiers.obspm.fr/eoppc/eop/eopc04>

3. ASPEKTY TEORETYCZNE MODELU

Efekt precesyjno-nutacyjny powstaje w wyniku grawitacyjnego oddziaływania Księżyca, Słońca, oraz w niewielkim stopniu planet, na obracającą się Ziemię. Ściślej mówiąc, chodzi o składową wektora momentu sił, która jest równoległa do płaszczyzny równikowej. Moment sił można wyrazić jako funkcję potencjału pływowego, który opisuje siły zewnętrzne, oraz pola grawitacyjnego Ziemi, które z kolei odzwierciedla rozkład mas w bryle naszej planety. Zarówno potencjał grawitacyjny Ziemi, jak i potencjał pływowy przedstawiany jest na ogół w postaci rozwinięcia w szereg harmonik kulistych

$$U = \sum_{l=0}^{\infty} \sum_{j=0}^l U_{lj} \quad u = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{j=0}^l u_{lj} \quad (1)$$

gdzie l oznacza stopień a j rząd składowej harmonicznej (np. Moritz i Mueller 1987). Składowa potencjału grawitacyjnego Ziemi U_{lj} wyraża się poprzez współczynniki Stokesa C_{lj} , S_{lj} , natomiast składowa potencjału pływowego $u_{lj}(t)$ jest szeregiem trygonometrycznym o częstotliwościach bliskich $j\Omega$, gdzie $\Omega = 7.292\,115 \times 10^{-5}$ rad/s oznacza częstotliwość dobowej rotacji Ziemi względem gwiazd. Zatem dla $j=0$ potencjał opisuje pływy długookresowe, dla $j=1$ – pływy dobowe, dla $j=2$ – pływy półdobowe itd. Znajomość rozwinięć harmonicznych U i u wystarcza do obliczenia momentu sił zewnętrznych działających na Ziemię (np. Woolard 1953; Brzeziński i Capitaine 2002; Brzeziński 2003), co z kolei daje możliwość obliczenia odpowiadającego zaburzenia w ruchu obrotowym Ziemi. Tabela 1 przedstawia wszystkie wyrazy zaburzenia w składowych równikowych ruchu obrotowego Ziemi przekra-

czające poziom 0.1 mikrosekundy łuku (μas – microarcsecond). Poszczególne wiersze przedstawiają efekt oddziaływania składowej u_{lj} potencjału pływowego na masę, której rozkład wyraża się poprzez składową U_{kn} potencjału grawitacyjnego Ziemi. Każdy wiersz daje się przedstawić w postaci rozwinięcia trygonometrycznego. Jak zostało wcześniej wspomniane, występuje niejednoznaczność polegająca na tym, że każde zaburzenie w składowej równikowej rotacji można traktować równoważnie bądź jako nutację, bądź jako ruch bieguna. I tak, długookresowe nutacje odpowiadają dobowym wstecznym ruchom bieguna, dobowe proste nutacje odpowiadają długookresowym ruchom bieguna¹ itd.

Tabela 1. Perturbacje lunisolarne w składowej równikowej ruchu obrotowego Ziemi. Zestawienie uwzględnia wszystkie składowe, dla których całkowity efekt przekracza poziom 0.1 μas . Ostatnia kolumna pokazuje sumę wartości bezwzględnych amplitud większych niż 0.01 μas

Geopotencjał	Potencjał pływowy	Nutacja	Ruch bieguna	Efekt sumaryczny [μas]
U_{l0} dla $l = 2, 3, \dots$	u_{l1}	długo- okresowe*	dobowe wsteczne	nutacja $>10^7$ + precesja $50'' \cdot 29/\text{rok}$
U_{31}	u_{30}	dobowe proste	długo- okresowe*	91.3
U_{41}	u_{40}			1.0 + dryft 5.7 $\mu\text{as}/\text{rok}$
U_{22}	u_{21}	półdobowe proste	dobowe proste*	51.6
U_{32}	u_{31}			0.2
U_{33}	u_{32}	1/3 doby proste	półdobowe proste*	0.1
U_{31}	u_{32}	dobowe wsteczne	półdobowe wsteczne*	0.8
U_{32}	u_{33}	półdobowe wsteczne	1/3 doby wsteczne*	0.1

* reprezentacja, która jest zgodna z nową definicją bieguna pośredniego CIP (IERS 2004)

Dominującym efektem w zestawieniu z tabeli 1 jest precesja i długookresowa nutacja opisywane przez konwencjonalne modele IAU. Efekt precesyjno-nutacyjny jest wynikiem oddziaływania składowych tesseralnych u_{l1} (dobowych) potencjału pływowego na składowe strefowe U_{l0} potencjału grawitacyjnego Ziemi, dla $l \geq 2$, przy przeważającym udziale (prawie 99%) harmonik drugiego stopnia ($l = 2$). Warto odnotować, że w przypadku harmonik

¹ Dwuwymiarowe harmoniki opisują ruchy jednostajne po okręgu bądź w kierunku ruchu wskazówek zegara i wtedy nazywamy je wstecznymi, bądź w kierunku przeciwnym, zgodnie z obrotem dobowym Ziemi, i wtedy nazywamy je prostymi.

strefowych potencjału współczynnik Stokesa S_{10} znika, natomiast współczynnik C_{10} jest często opisywany symbolem J_1 . Współczynnik J_2 , wyrażający spłaszczenie dynamiczne Ziemi, tzw. współczynnik dynamiczny figury Ziemi (Kryński i Sękowski 2003, s. 175), jest jednym z fundamentalnych parametrów geodezyjnych.

Najczęściej stosowanym sposobem liczenia modelu nutacji jest metoda dwustopniowa, polegająca na wykonaniu najpierw obliczeń dla Ziemi sztywnej, a potem pomnożeniu amplitud przez tzw. funkcję przenoszenia (*transfer function*) uwzględniającą rzeczywistą budowę i deformacje Ziemi. W ten sposób rozdziela się aspekty astronomiczne, które ograniczają się do pierwszego kroku, od aspektów geofizycznych. W przypadku precesji występuje brak zależności rozwiązań od deformacji Ziemi, zatem procedura ogranicza się do pierwszego kroku.

3.1. Precesja-nutacja Ziemi sztywnej

W latach 1994–2000 powstały 3 szeregi nutacyjne dla Ziemi sztywnej o wysokiej precyzji: SMART97 (Bretagnon i in. 1997, 1998), REN2000 (Souchay i Kinoshita 1996, 1997; Souchay i in. 1999), RDAN97 (Roosbeek i Dehant 1998). Ich autorzy uwzględnili wszystkie efekty powyżej poziomu 1 μ s. Jedną z ważnych konkluzji Grupy Roboczej IAU/IUGG było stwierdzenie, że precyzja szeregów nutacyjnych dla Ziemi sztywnej jest dostatecznie wysoka w porównaniu z dokładnością obserwacji. Różnice między wymienionymi trzema rozwiązaniami nie przekraczają kilkudziesięciu μ s w dziedzinie czasu, a zatem są zdecydowanie większe niż oszacowana wewnętrzna dokładność. Z drugiej strony różnice te są jednak poniżej poziomu dokładności obserwacyjnych, zatem niemożliwe jest stwierdzenie, który z szeregów jest najlepszy. To widać również w Rezolucji B1.6 IAU (IERS 2004; Kryński i Sękowski 2003, s. 218) dotyczącej modelu IAU2000, która wymienia wszystkie trzy szeregi. Procedura opisana w IERS Conventions 2003 (IERS 2004, Chapter 5) i dostępna poprzez witrynę internetową IERS Convention Center, wykorzystuje szereg REN2000, dodatkowo przeskalowany przez czynnik 1.000 012 249 w celu uwzględnienia zmiany spłaszczenia dynamicznego wynikającej z obserwacyjnej poprawki do precesji równika ziemskiego.

3.2. Model budowy Ziemi

Policzenie funkcji przenoszenia dla modelu nutacji wymagało przyjęcia modelu budowy wewnętrznej Ziemi. Punktem wyjścia był model PREM (**P**reliminary **R**eference **E**arth **M**odel) Dziewońskiego i Andersona (1981), który jest modelem warstwowym, skonstruowanym przy założeniu hydrostatycznej równowagi pod działaniem grawitacji własnej masy Ziemi i sił odśrodkowych związanych z jej rotacją. Model PREM wymagał modyfikacji w celu otrzymania zgodności obliczonych i wyznaczonych z obserwacji parametrów ta-

kich, jak główne momenty bezwładności, spłaszczenie dynamiczne Ziemi, spłaszczenie powierzchni granicznych, przede wszystkim granicy między płaszczem a jądrem. Odstępstwa od założenia równowagi hydrostatycznej można było wytłumaczyć procesami konwekcji w lepkosprężystym płaszczu (Dehant i in. 1999).

Spłaszczenie granicy jądro–płaszcz obliczone na podstawie okresu rezonansowego FCN (Free Core Nutation) otrzymanego z wyznaczeń techniką VLBI parametrów nutacyjnych, różni się w istotnym stopniu od spłaszczenia obliczonego przy założeniu hydrostatycznej równowagi. Zgodność z obserwacjami otrzymuje się poprzez powiększenie spłaszczenia o wartość wynikającą ze zwiększenia różnicy między promieniem równikowym a promieniem biegunowym o około 500 m. Tę różnicę otrzymuje się przy założeniu, że sprzężenie między jądrem i płaszczem wynika wyłącznie z sił bezwładności. Jeśli dodatkowo uwzględnimy oddziaływania elektromagnetyczne na granicy jądro–płaszcz, różnica redukuje się do około 380 m (Mathews i in. 2002). Dla porównania, precyzja wyznaczeń kątów nutacyjnych z pomiarów VLBI przekłada się na 2.5 m w spłaszczeniu granicy jądro–płaszcz.

3.3. Funkcja przenoszenia

Grupa Robocza „Non-Rigid Earth Nutation Theory” zarekomendowała IAU model funkcji przenoszenia MHB2000 (Mathews i in. 2002). Wiele parametrów modelu zostało dopasowanych do obserwacji VLBI, ale sposób parametryzacji jest zgodny z prawami fizyki, co umożliwia interpretację fizyczną rezultatów. W uzasadnieniu stwierdzono: „W chwili obecnej jest to najbardziej zgodny z obserwacjami model skonstruowany w oparciu o prawa fizyki Ziemi”. Model MHB2000 uwzględnia elektromagnetyczne sprzężenie na granicach płaszcz – ciekłe jądro oraz ciekłe jądro – stałe jądro wewnętrzne, wpływ oceanu, lepkość płaszczu, efekty atmosferyczne, wreszcie poprawki do globalnego dynamicznego spłaszczenia oraz geometrycznego spłaszczenia jądra. Punktem wyjścia jest układ dynamiczny złożony z czterech liniowych równań różniczkowych dla zmiennych zespolonych. Rozwiązania układu szukano w dziedzinie częstotliwości. Aby opisać rozwiązanie, oznacmy przez σ częstotliwość składowej nutacyjnej odniesioną do układu związanego z Ziemią i wyrażoną w cyklach na dobę gwiazdową. A zatem wprowadzonej wcześniej średniej częstotliwości kątowej obrotu Ziemi Ω odpowiada $\sigma = 1$. Jeśli częstotliwość nutacji chcemy odnieść do układu inercjalnego (niebieskiego), wówczas należy ją wyrazić jako $\tau = \sigma + 1$. Niech dalej $\tilde{\eta}(\sigma)$ oznacza amplitudę nutacji o częstotliwości σ , a $\tilde{\eta}_r(\sigma)$ wartość amplitudy dla modelu Ziemi sztywnej (indeks r jest skrótem od ang. *rigid*). Funkcja przenoszenia przyjmuje następującą postać

$$T(\sigma, e) = \frac{\tilde{\eta}(\sigma)}{\tilde{\eta}_r(\sigma)} = R + R'(1 + \sigma) + \sum_{\alpha=1}^4 \frac{R_\alpha}{\sigma - \sigma_\alpha} \quad (2)$$

gdzie $e = (C - A)/A$ oznacza spłaszczenie dynamiczne Ziemi, A , C średni równikowy i osiowy moment bezwładności Ziemi, zaś R , R' , R_α dla $\alpha = 1, 2, 3, 4$ są zespolonymi współczynnikami. Częstotliwości σ_α są częstotliwościami drgań własnych w składowej równikowej rotacji Ziemi: kołysanie Chandlera CW (Chandler Wobble), swobodna nutacja jądra wsteczna (FCN) oraz prosta PFCN (Prograde Free Core Nutation), swobodne kołysanie stałego jądra wewnętrznego ICW (free Wobble of the Inner Core). Podobnie jak współczynniki R , σ_α są wielkościami zespolonymi, w których część urojona wyraża rozpraszanie energii. Jedną z konsekwencji jest to, że nigdy nie ma osobliwości w wyrażeniu (2) (σ jest wielkością rzeczywistą, a zatem nie może być równa σ_α).

Funkcja przenoszenia $T(\sigma, e)$ przyjmuje wartość 1 dla $\sigma = -1$, czyli dla $\tau = 0$, co oznacza, że precesja jest zawsze taka sama jak dla Ziemi sztywnej, o ile jest zachowana wartość spłaszczenia e . Dodatkowo, $T = 0$ dla $\sigma = e$. Istnieją również inne postacie równania (2), uwzględniające wymienione dwa warunki (Mathews i in. 2002).

Interesujące jest porównanie wpływu poszczególnych członów rezonansowych na funkcję przenoszenia T . Wypiszmy w tym celu numeryczną wartość parametrów:

$$\begin{aligned} \text{CW: } R_1 &= -(5.46425 + i0.79322) \times 10^{-4} & \text{Re}(\sigma_1) &= 0.002601 \\ \text{FCN: } R_2 &= -(1.13686 + i0.02555) \times 10^{-4} & \text{Re}(\sigma_2) &= -1.0023181 \\ \text{PFCN: } R_3 &= (3.62650 + i1.37204) \times 10^{-7} & \text{Re}(\sigma_3) &= -0.99903 \\ \text{ICW: } R_4 &= -(4.32089 + i0.30306) \times 10^{-8} & \text{Re}(\sigma_4) &= 0.000413471 \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie Re oznacza część rzeczywistą liczby zespolonej. Porównanie współczynników R_α pokazuje, że zdecydowanie ważniejsze są wyrazy związane z rezonansem Chandlera i FCN. Współczynnik R_2 jest co prawda około 5 razy mniejszy niż R_1 , jednakże różnica ta może być w pełni skompensowana przez mianownik. Wynika to stąd, że dla wyrazów nutacyjnych $\sigma \approx -1$, zatem w przypadku FCN ($\alpha = 2$) mianownik może przyjmować bardzo małe wartości. Dla rezonansu Chandlera ($\alpha = 1$) mianownik jest bliski -1 i niewiele się zmienia w paśmie nutacyjnym.

Model nutacji jest przedstawiany jako szereg trygonometryczny dla współrzędnych X , Y bieguna CIP w układzie niebieskim, bądź w ujęciu klasycznym dla kątów ψ w długości i ε w nachyleniu ekliptyki. Ścisłej mówiąc, są to szeregi Poissona w których (dla wariantu ψ , ε) amplituda jest wielomianem stopnia 1, natomiast argument funkcji trygonometrycznej jest wielomianem stopnia 4. Dla interwałów czasu rzędu lat rozwinięcia te można trakto-

wać jako szeregi trygonometryczne. Dla ustalonego σ , lub równoważnie τ , wyraz nutacyjny opisuje ruch eliptyczny z okresem równym $1/\tau$ dób gwiazdowych względem układu inercjalnego. Aby zastosować funkcję przenoszenia, należy każdą składową nutacji przedstawić jako sumę dwóch ruchów jednostajnych po okręgu o tym samym okresie, ale przeciwnych kierunkach: nutację wsteczną, zgodną z ruchem wskazówek zegara, której częstotliwość jest ujemna $-|\tau|$, oraz nutację prostą o częstotliwości dodatniej $+|\tau|$. Opis transformacji można znaleźć w pracy (Bizouard i in. 1998, Appendix C) lub w (IERS 2004, Chapter 5).

Na zakończenie zauważmy, że ponieważ funkcja przenoszenia przyjmuje wartości zespolone, zmienia więc ona nie tylko amplitudę składowej nutacyjnej, ale również jej fazę.

3.4. Efekty oceaniczne i atmosferyczne

Ocean i atmosfera mają niewielki, choć dobrze mierzalny wpływ na ruch precesyjno-nutacyjny Ziemi: stałe przemieszczenie bieguna w układzie inercjalnym rzędu 8 mas oraz zmiana amplitud nutacyjnych na poziomie dziesiątych części mas. Największe jest oddziaływanie pływów oceanicznych, które indukują okresowe fluktuacje tensora bezwładności Ziemi stałej poprzez zmiany obciążenia dna oceanu. Dodatkowo, wywoływane przez pływy prądy morskie powodują zmiany momentu pędu oceanu, które są przekazywane do płaszczka. Mathews i in. (2002) wykorzystali model pływu oceanicznego i odpowiadających mu zmian momentu pędu oceanu, obliczony przez Chao i in. (1996). Model ten został policzony z wykorzystaniem danych altimetrii satelitarnej, dla fal o dominujących amplitudach. W przypadku pływów dobowych, które oddziałują na nutacje, były to składowe K_1 , P_1 , O_1 i Q_1 odpowiadające stałemu przemieszczeniu bieguna CIP w przestrzeni oraz składowym nutacji o okresach $T = +182.6$, $+13.7$, $+9.1$ dób. Mathews i in. (2002) dokonali ekstrapolacji modelu Chao i in. (1996) na inne fale dobowe, stosując wariant metody zaproponowanej oryginalnie w pracy (Wahr i Sasao 1981). Najważniejsze rezultaty wynikające z pływowych zmian poziomu oceanu to 1.35 mas dla -18.6 lat, 0.84 mas dla $+182.6$ dób, 0.28 mas dla -365.3 dób i 0.17 dla $+18.6$ lat. Wkład prądów pływowych jest zdecydowanie mniejszy – osiągają maksimum 0.12 mas dla składowej $+13.6$ dób. Główne zaburzenie pływowe, pochodzące od fali K_1 , daje stałe przemieszczenie bieguna w przestrzeni rzędu 8 mas, ale jest to element definicji średniego położenia bieguna CIP i nie wchodzi do modelu precesyjno-nutacyjnego.

Niepływowe zaburzenia nutacji pochodzące z układu atmosfera-ocean są związane z dobowym cyklem termicznym. Cykl ten generuje w atmosferze falę dobową poruszającą się względem Ziemi wraz ze Słońcem, czyli w kierunku wstecznym i z okresem 1 doby słonecznej. Oznaczamy ją S_1 , stosując nomenklaturę pływową. Sezonowe modulacje fali S_1 generują dodatkowo jej listki boczne, składowe P_1 i K_1 dla modulacji rocznej oraz π_1 i ψ_1 dla modula-

cji półrocznej. Harmoniki S_1 , P_1 , π_1 i ψ_1 zaburzają nutacje o okresach odpowiednio +365.3, +182.6, +121.7 oraz -365.3 dób; oddziaływanie harmoniki K_1 było omawiane wcześniej w kontekście perturbacji pływowych. Bizouard i in. (1998) wykorzystali szereg czasowy 6-godzinnych wyznaczeń zmian momentu pędu atmosfery AAM (Atmospheric Angular Momentum) do oszacowania wpływu atmosfery na nutację. Przy założeniu braku reakcji oceanu na dobowe fluktuacje atmosfery otrzymali oni następujące oszacowania: 77 μs dla składowej +365.3 d, 53 μs dla -365.3 d, 45 μs dla +182.6 d oraz 115 μs dla stałego przemieszczenia bieguna.

Powyższe oszacowania atmosferycznego pobudzenia nutacji są obciążone dużą dozą niepewności. Po pierwsze, wyznaczenia z innych dostępnych szeregów AAM próbkowanych 4 razy na dobę dają istotnie różne rezultaty. Po drugie, reakcja oceanu na dobowe zmiany w atmosferze jest procesem dynamicznym i może prowadzić do innych wyników niż przyjęty model statyczny (Brzeziński i in. 2004). Dodatkowo, obserwacje VLBI mogą zawierać systematyczne błędy zsynchronizowane z ruchem Słońca, np. wynikające z deformacji termicznej anten; zob. podrozdział „VLBI Antenna Thermal Deformation” w (IERS 2004, Chapter 7). Błędy te przenoszą się na wyznaczenia amplitudy nutacji rocznej prostej. Mając na uwadze wymienione wyżej ograniczenia, Mathews i in. (2002) poprzestali na wprowadzeniu do amplitudy nutacji rocznej prostej – poprawki empirycznej „Sun-synchronous” o wartości zespolonej -0.0104 i 0.1082 mas.

4. SKŁADOWE NUTACJI O WYSOKICH CZĘSTOTLIWOŚCIACH

Jak pokazuje tabela 1, zjawisko precesji astronomicznej i długookresowej nutacji wynika z oddziaływania grawitacyjnego Księżyca i Słońca na te elementy rozkładu mas Ziemi, które wyrażają się poprzez harmoniki strefowe U_{10} ($l \geq 2$) pola grawitacyjnego. Jeśli uwzględnić odstępstwa od symetrii obrotowej, opisane przez harmoniki U_{22} (trójosiowość figury dynamicznej Ziemi) oraz U_{lj} , dla stopnia $l > 2$ oraz rzędu $j \neq 0$, wówczas pojawiają się niewielkie (rzędu 0.1 mas) zaburzenia w kierunku osi Ziemi, których wspólną cechą są bardzo krótkie okresy względem układu niebieskiego (dobowe, półdobowe itd.). Zgodnie z przyjętą definicją bieguna *CIP*, perturbacje te powinny być odniesione do układu związanego z Ziemią, czyli traktowane jako ruchy bieguna. W związku z tym, nie są one uwzględnione w modelu precesyjno-nutacyjnym IAU2000, niemniej ich model powinien być brany pod uwagę jako element praktycznej realizacji bieguna *CIP*.

Podczas Zgromadzenia Generalnego IAU w roku 2000 została powołana grupa robocza Komisji 19 IAU, której zadaniem było rozwiązywanie problemów związanych z wdrażaniem przyjętych rezolucji. Jeden z tematów, którego koordynatorem był autor niniejszego opracowania, brzmiał „pytania

dotyczące nutacji subdobowych”. Wiosną roku 2002 odbyła się dyskusja mająca na celu uzgodnienie modelu, który mógłby być umieszczony w IERS Conventions. Bardzo proste rozwiązanie zakładające dwuwarstwowy model budowy Ziemi zostało zaproponowane w pracach (Brzeziński 2001, 2003), (Brzeziński i Capitaine 2002). Współczynniki rozwinięcia zarekomendowanego do IERS Conventions (IERS 2004, Tab. 5.1) zostały wzięte ze znacznie bardziej złożonego modelu (Mathews i Bretagnon 2003), ale z porównania wynika, że różnica między tymi dwoma rozwiązaniami nie przekracza $0.2 \mu\text{s}$ dla współczynników rozwinięcia harmonicznego i $1 \mu\text{s}$ w dziedzinie czasu, co daje odpowiednio 0.2% i 1% całkowitego efektu (Brzeziński i Mathews 2003).

Rozwiązanie opisujące ruch bieguna składa się z 16 członów długookresowych oraz 10 członów dobowych prostych. Każda ze składowych długookresowych jest kombinacją harmoniki wstecznej i prostej, a zatem opisuje ruch eliptyczny. Bardzo interesujący z punktu widzenia fizyki zjawiska jest wyraz opisujący liniowy dryft bieguna w kierunku 131°E z prędkością $5.7 \mu\text{s}/\text{rok}$. Jest on około 500 razy mniejszy i odbywa się w przeciwnym kierunku niż obserwowany trend w ruchu bieguna.

Brzeziński i Mathews (2003) porównali obliczony model do zaburzeń geofizycznych występujących w tym samym zakresie częstotliwości. W przypadku dobowych prostych ruchów bieguna wywołanych bezpośrednim działaniem potencjału pływowego nakładają się one na efekty atmosferyczne o podobnej wielkości, lecz nieco różniących się częstotliwościami, oraz na zaburzenia wywoływane przez pływ oceaniczny. Te ostatnie mają podobne widmo, ale są około 10 razy większe i ich faza różni się o blisko 90° . Jest mało prawdopodobne, aby w dającej się przewidzieć przyszłości model pływu oceanicznego był wystarczająco dokładny dla obserwacyjnej weryfikacji omawianego tu efektu. W przypadku składowych długookresowych sytuacja jest bardziej optymistyczna. Występujące w modelu częstotliwości różnią się zarówno od częstotliwości sezonowych, gdzie mamy znacznie większe zaburzenia atmosferyczne, jak i od częstotliwości długookresowych pływów oceanicznych. A zatem dla dostatecznie długich i dokładnych szeregów czasowych obserwacji ruchu bieguna mamy szansę wyodrębnić z nich wyrazy o długich okresach odpowiadające modelowi przedstawionemu w tabeli 5.1 IERS Conventions 2003.

5. MODELOWANIE I MONITOROWANIE PARAMETRÓW NUTACYJNYCH: CO DALEJ?

Przyjęcie przez IAU i zatwierdzenie przez IUGG modelu precesyjno-nutacyjnego IAU2000 było zwieńczeniem pewnego etapu prac badawczych i wysiłku organizacyjnego, ale z całą pewnością nie oznacza zamknięcia tematu. Poniżej przedstawiono wykaz zagadnień i problemów, które w opinii autora niniejszego opracowania wymagają kontynuacji badań. Wiele innych

zagadnień jest omówionych w pracach (Dehant i Brzeziński 2004; Dehant i in. 2003).

Na pierwszym miejscu należy wymienić efekty atmosferyczne i oceaniczne. Bizouard i in. (1998) pokazali, że nieregularne zmiany momentu pędu atmosfery AAM (tzn. po odjęciu modelu harmonicznego) pobudzają zmiany kątów nutacyjnych na poziomie 0.1 mas, czyli zbliżonym do szacowanej precyzji nowego szeregu precesyjno-nutacyjnego. Zrozumienie i modelowanie tych nieregularnych zaburzeń jest zatem niezbędnym elementem jakichkolwiek działań, których celem byłaby dalsza poprawa precyzji standardowego modelu. To z kolei można osiągnąć poprzez stworzenie i regularne wyznaczanie modelu zmian czasowych momentu pędu układu atmosfera-ocean. Model ten powinien

- a) mieć dużą rozdzielczość czasową (okres próbkowania 6 godzin lub krótszy),
- b) być wewnętrznie zgodny, tzn. te same globalne pola zmian ciśnienia atmosferycznego i prędkości wiatrów powinny być wykorzystywane do wyznaczania AAM jak i do wymuszania modelu globalnej cyrkulacji oceanu, który z kolei dostarcza danych do liczenia OAM (**O**cean **A**ngular **M**omentum),
- c) wykorzystywać jak największą liczbę obserwacji.

Od pewnego czasu dysponujemy szeregami czasowymi AAM z okresem próbkowania 6 godzin. Przykładem jest jednorodny szereg NCEP/NCAR, zaczynający się w 1948 roku i uaktualniany na bieżąco, który został wykorzystany w pracy (Bizouard i in. 1998). W przypadku szeregów OAM, które opisują dynamiczną reakcję oceanu na oddziaływanie atmosfery, sytuacja jest znacznie gorsza. Wyznaczenia o dużej rozdzielczości czasowej mają charakter eksperymentalny i wykorzystują uproszczone modele oceanu. Oszacowania dokonane w pracy (Brzeziński i in. 2004) wskazują, że niepływowe zmiany w oceanie mogą mieć istotny wpływ na nutację Ziemi. Porównanie z obserwacjami VLBI w przypadku nutacji rocznej prostej pokazało jednak, że dodanie OAM do AAM pogarsza zgodność. Istnieje potrzeba dalszych prac mających na celu wiarygodne wyznaczanie OAM z wysoką rozdzielczością czasową.

Znacznie prostszym zadaniem, które powinno być rozwiązane w najbliższej przyszłości, jest policzenie na nowo modelu pływowych zmian momentu pędu oceanu. Model z pracy (Chao i in. 1996) wykorzystany do konstrukcji funkcji przenoszenia MHB2000 wydaje się być zdecydowanie przestarzały. Obecnie dysponujemy wielokrotnie dłuższymi ciągami obserwacji zmian powierzchni oceanu, otrzymanymi z altimetrii satelitarnej. Wykorzystanie tych danych z całą pewnością poprawi wiarygodność modelu pływu oceanicznego i odpowiadającego mu modelu pływowych zmian OAM.

Istotnym problemem jest modelowanie swobodnej nutacji jądra FCN, pseudoharmonicznego sygnału obecnego w zmianach kątów nutacyjnych wyznaczanych techniką VLBI (rys. 2). Ważne jest wyznaczanie parametrów

FCN, okresu T i współczynnika dobroci Q na podstawie przebiegu sygnału oraz zdefiniowanie źródła jego pobudzenia. Należy również tworzyć modele matematyczne, które mogłyby być wykorzystywane zarówno do opisu *a posteriori* przebiegu FCN, jak i do prognozowania przyszłych wartości (Brzeziński i Kosek 2004).

Obecność składowych nieregularnych w obserwacjach nutacji, takich jak sygnał FCN oraz nutacja roczna o zmieniającej się w czasie amplitudzie, wskazuje na konieczność dalszego monitorowania zmian czasowych kątów nutacyjnych. Model IAU2000 wraz z poprawkami empirycznymi zapewnia najwyższą dokładność transformacji między ziemskim i niebieskim systemem odniesienia. Prowadzone regularne obserwacje nutacji (rys. 2), uzupełnione komplementarnymi danymi geofizycznymi, stanowią również niezwykle cenny materiał do badań interpretacyjnych.

Na zakończenie należy wspomnieć o możliwości wykorzystania bogatych doświadczeń uzyskanych przy modelowaniu precesji i nutacji Ziemi do badania innych ciał Układu Słonecznego. Proponowane są misje satelitarne, które pozwalałyby wyznaczać parametry ruchu obrotowego innych planet. Porównanie obserwacji z modelem nutacji planety dałoby z kolei możliwość „zajrzenia do jej wnętrza”, np. stwierdzenie, czy posiada ona ciekłe jądro. Zaawansowane prace studialne były przeprowadzone dla Marsa; zob. np. (Dehant i in. 2000).

PODZIĘKOWANIA

Praca wykonana w ramach realizacji finansowanego ze środków Ministerstwa Nauki i Informatyzacji projektu badawczego Nr 5 T12E 039 24. Składam podziękowanie prof. J. Kryńskiemu, redaktorowi monografii, oraz recenzentowi pracy prof. W. Góralowi za cenne uwagi i sugestie, które przyczyniły się do poprawy poziomu prezentowanego materiału.

BIBLIOGRAFIA

- Bizouard Ch., Brzeziński A., Petrov S., 1998, *Diurnal atmospheric forcing and temporal variations of the nutation amplitudes*, Journal of Geodesy, Vol. 72, pp. 561–577.
- Bretagnon P., Rocher P., Simon J.-L., 1997, *Theory of the rotation of the rigid Earth*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 319, pp. 305–317.
- Bretagnon P., Francou G., Rocher P., Simon J.-L., 1998, *SMART97: a new solution for the rotation of the rigid Earth*, Astronomy and Astrophysics, Vol. 329, pp. 329–338.
- Brzeziński A., 2001, *Diurnal and subdiurnal terms of nutation: a simple theoretical model for a nonrigid Earth*, in: Proc. Journées 2000 Systèmes de Référence Spatio-Temporels, (ed.) N. Capitaine, Paris Observatory, pp. 243–251.

- Brzeziński A., 2003, *Lunisolar perturbations in polar motion at a microarcsecond truncation level*, in Em. Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.h.c.mult. Dr.techn. Helmut Moritz, Festschrift zum 70. Geburtstag, herausgegeben von N. Kühtreiber, Inst. für Geodäsie, Technische Universität Graz, pp. 55–66.
- Brzeziński A., Capitaine N., 1993, *The use of the precise observations of the Celestial Ephemeris Pole in the analysis of geophysical excitation of Earth rotation*, Journal of Geophysical Research, Vol. 98, pp. 6667–6675.
- Brzeziński A., Capitaine N., 2002, *Lunisolar perturbations in Earth rotation due to the triaxial figure of the Earth: geophysical aspects*, Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2001, (ed.) N. Capitaine, Paris Observatory, pp. 51–58.
- Brzeziński A., Kosek W., 2004, *Free core nutation: stochastic modeling versus predictability*, Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2003, (eds.) A. Finkelstein, N. Capitaine, pp. 99–106.
- Brzeziński A., Mathews P.M., 2003, *Recent advances in modelling the lunisolar perturbation in polar motion corresponding to high frequency nutation: report on the discussion of the IAU Comm. 19 WG on Nutation*, Proc. Journées Systèmes de Référence Spatio-Temporels 2002, (eds.) N. Capitaine, M. Stavinschi, Ars Docendi, Paris, pp. 101–108.
- Brzeziński A., Ponte R.M., Ali A.H., 2004, *Non-tidal oceanic excitation of nutation and diurnal/semidiurnal polar motion revisited*, Journal of Geophysical Research - Solid Earth, Vol. 109, doi: 10.1029/2004JB003054.
- Chao B.F., Ray R.D., Gipson M.J., Egbert G.D., Ma Ch., 1996, *Diurnal/semidiurnal polar motion excited by oceanic tidal angular momentum*, Journal of Geophysical Research, Vol. 101, No B9, pp. 20,151–20,163.
- Dehant V. i inni, 1999, *Considerations concerning the non-rigid earth nutation theory*, Cel. Mech. Dynamical Astr., Vol. 72, pp. 245–310.
- Dehant V., Van Hoolst T., Defraigne P., 2000, *Comparison between the nutations of the planet Mars and the nutations of the Earth*, Surveys in Geophysics, Vol. 21, pp. 89–110.
- Dehant V., Brzeziński A., 2004, *Working Group on Nutation*, Proc. XXV IAU General Assembly, (ed.) O. Engvold, Transactions of the International Astronomical Union, Vol. XXVB, Astronomical Society of the Pacific, Provo, USA (w druku).
- Dehant V., Feissel-Vernier M., de Viron O., Ma C., Yseboodt M., Bizouard Ch., 2003, *Remaining error sources in the nutation at the sub-milliarcsecond level*, Journal of Geophysical Research, Vol. 108, doi: 10.1029/2002JB001763.
- Dziewoński A.D., Anderson D.L., 1981, *Preliminary Reference Earth Model*, Phys. Earth planet. Inter., Vol. 25, pp. 297–356.

- IERS, 2004, *IERS Conventions 2003*, (eds.) D. McCarthy, G. Petit, IERS Technical Note No 32, Verlag des Bundesamtes für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, (<http://www.iers.org/iers/products/conv/>).
- Kinoshita H., 1977, *Theory of the rotation of the rigid Earth*, *Celestial Mechanics*, Vol. 15, pp. 277–326.
- Kinoshita H., Nakajima K., Kubo Y., Nakagawa I., Sasao T., Yokohama K., 1979, *Note on nutation in ephemerides*, *Publ. Int. Lat. Obs. Mizusawa*, Vol. 12, pp. 71–108.
- Kryński J., Sękowski M., 2003, *Rocznik Astronomiczny na rok 2004*, Redaktor naukowy J. Kryński, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa.
- Mathews P.M., Herring T.A., Buffet B.A., 2002, *Modeling of nutation-precession: New nutation series for non-rigid Earth, and insights into the Earth's interior*, *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, doi: 10.1029/2001JB000390.
- Mathews P.M., Bretagnon P., 2003, *Polar motions equivalent to high frequency nutations for a non-rigid Earth with inelastic mantle*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 400, pp. 1113–1128.
- Moritz H., Mueller I.I., 1987, *Earth Rotation: Theory and Observation*, Ungar, New York.
- Roosbeek F., Dehant V., 1998, *RDAN97: an analytical development of rigid Earth nutation series using the torque approach*, *Celest. Mech. Dynamical Astron.*, Vol. 70, pp. 215–253.
- Seidelmann P.K., 1982, *1980 IAU Theory of Nutation: the final report of the IAU working group on nutation*, *Celestial Mechanics*, Vol. 27, pp. 79–106.
- Souchay J., Kinoshita H., 1996, *Corrections and new developments in rigid Earth nutation theory: I. Lunisolar influence including indirect planetary effects*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 312, pp. 1017–1030.
- Souchay J., Kinoshita H., 1997, *Corrections and new developments in rigid Earth nutation theory: II. Influence of second-order geopotential and direct planetary effect*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 318, pp. 639–652.
- Souchay J., Loysel B., Kinoshita H., Folgueira M., 1999, *Corrections and new developments in rigid Earth nutation theory: III. Final tables 'REN-2000' including crossed-nutation and spin-orbit coupling effects*, *Astronomy and Astrophysics*, Vol. 318, pp. 639–652.
- Wahr J.M., 1981, *The forced nutations of an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth*, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 64, pp. 705–727.
- Wahr J.M., Sasao T., 1981, *A diurnal resonance in the ocean tide and in the Earth's load response due to the resonant free, 'core nutation'*, *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, Vol. 64, pp. 747–765.

Woolard E.W., 1953, *Theory of the rotation of the Earth around its center of mass*, *Astron. J.*, 58, 2; also *Astronomical papers Prepared for the Use of the American Ephemeris and Nautical Almanac*, XV, Part I.

ALEKSANDER BRZEZIŃSKI
Space Research Centre
Polish Academy of Sciences
Warsaw

NEW PRECESSION-NUTATION MODEL

S u m m a r y

Resolution B1.6 of the XXIV IAU General Assembly (Manchester, 2000) recommends that, beginning on 1st January 2003 the IAU1976 precession model and the IAU1980 theory of nutation be replaced by the new IAU2000 precession-nutation model. This model determines the instantaneous direction of the celestial pole in the Geocentric Celestial Reference System with an accuracy of 0.2 milliseconds of arc (mas). The resolution encourages also the continuation of VLBI observations to monitor the non-modelled nutation residuals including the unpredictable free core nutation signal. The new precession-nutation model relies upon the Souchay et al. (1999) rigid Earth solution and the non-rigid Earth transfer function MHB2000 of Mathews et al. (2002) which improves the IAU1980 theory of nutation by taking into account such effects as mantle anelasticity, ocean tides, electromagnetic coupling produced between the liquid core and the mantle, and by the consideration of nonlinear terms that have been ignored in earlier solutions.

According to the definition of the Celestial Intermediate Pole (*CIP*) given by Resolution B1.7 of the XXIV IAU General Assembly in Manchester, the IAU2000 model contains all the nutation terms with periods longer than 2 days. Other terms with shorter periods, mainly diurnal and semidiurnal of the total size of about 0.1 mas, frequently designated as "sub-diurnal nutations", are interpreted as a change of the direction of the *CIP* in the terrestrial frame, that is as polar motion. The corresponding model has been worked out and included into the IERS Conventions 2003 as an element of the transformation between the celestial and the terrestrial reference systems.

This paper is an attempt of a concise description of the IAU 2000 precession-nutation model. The theoretical aspects as well as the organizing efforts that led to the consensus on new model are discussed. A list of problems that to the author's opinion need further investigation is also presented.

