



## Model pływowy IERS2003 i ocena możliwości jego weryfikacji na podstawie wyników opracowania obserwacji GNSS

JANUSZ BOGUSZ, MARIUSZ FIGURSKI

Wojskowa Akademia Techniczna, Wydział Inżynierii Lądowej i Geodezji,  
Centrum Geomatyki Stosowanej, 00-908 Warszawa, ul. S. Kaliskiego 2

**Streszczenie.** Niniejszy artykuł zawiera analizę możliwości korekcji pływowego modelu deformacji fizycznej powierzchni Ziemi opartego na standardach IERS2003, a wykorzystywanego w oprogramowaniu Bernese. Autorzy do tego celu wykorzystali stworzoną w Centrum Geomatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej metodę opracowania precyzyjnych obserwacji geodezyjnych w ramach krótkookresowych rozwiązań sieciowych. Jako dane posłużyły obserwacje wykonywane na punktach sieci ASG-EUPOS otrzymane na mocy porozumienia pomiędzy WAT a Głównym Urzędem Geodezji i Kartografii. Analiza pływowa metodą najmniejszych kwadratów potwierdziła, iż model pływowy oparty o parametry matematyczne wymaga wprowadzenia współczynników geodezyjnych, szczególnie w częstotliwościach, które są trudne do zamodelowania, takich jak K1, K2 czy PS11. W tych częstotliwościach analiza rezyduów obserwacji satelitarnych potwierdziła istnienie kilkumilimetrowych różnic. Otrzymany materiał stanowi świetną podstawę do badań zmian przestrzennych opisywanych parametrów i korelacji ich zmian np. z budową litosfery na terenie Polski.

**Słowa kluczowe:** pływy Ziemi, GNSS, geodezyjne szeregi czasowe

**Symbolne UKD:** 528.8

### 1. Wprowadzenie

Najpopularniejsze obecnie oprogramowanie geodezyjne wykorzystywane do zaawansowanego opracowania obserwacji satelitarnych to Bernese w wersji 5.0 [1]. Na 17 centrów obliczeniowych uczestniczących w tworzeniu europejskiego układu odniesienia (ETRF — *European Terrestrial Reference Frame*) w ramach projektu EPN (EUREF Permanent Network) 15 używa tego oprogramowania (stan na poło-

wę 2010 roku). Zjawisko pływów Ziemi ma znaczący wpływ na wyniki obserwacji geodezyjnych wykonywanych na jej fizycznej powierzchni.

Jego poprawne uwzględnienie w obserwacjach satelitarnych stanowi istotny element wpływający na ocenę wiarygodności otrzymanych rozwiązań. Model deformacji litosfery wywołany siłami pływowymi wykorzystywany w Bernese to model opracowany na podstawie konwencji IERS (*International Earth Rotation and Reference Systems Service*) z 2003 roku [2]. Konwencje te zawierają szereg zarówno założeń teoretycznych, jak i współczynników niezbędnych to oszacowania odpowiedzi lekko-sprężystej Ziemi na działanie sił pływowych. Ponieważ większość tych współczynników to parametry modelowe, więc analiza rezyduów obserwacji geodezyjnych wykonywanych na fizycznej powierzchni Ziemi powinna dać odpowiedź na pytanie, na ile dobrze oddają one opisywaną przez nie rzeczywistość.

## 2. Pływy Ziemi

Potencjał pola siły ciężkości Ziemi jest złożeniem potencjału grawitacyjnego i potencjału siły odśrodkowej jej ruchu obrotowego. Rozwinięcie w szereg harmonicznych sferycznych i sumowanie po całej objętości Ziemi daje w rezultacie [3]:

$$V = \sum_{n=0}^{\infty} \sum_{m=0}^{\infty} \left[ C_{nm} \frac{\bar{c}(\theta, \lambda)}{r^{n+1}} + S_{nm} \frac{\bar{s}(\theta, \lambda)}{r^{n+1}} \right], \quad (1)$$

gdzie:  $\bar{c}(\theta, \lambda), \bar{s}(\theta, \lambda)$  — znormalizowane elementarne harmoniczne sferyczne;  
 $C_{nm}, S_{nm}$  — współczynniki rozkładu masy wyznaczone na podstawie ortogonalności funkcji Legendre'a;  
 $r$  — odległość rozpatrywanego punktu fizycznej powierzchni Ziemi do jej środka masy.

Zjawisko pływów Ziemi z kolei jest związane ze złożeniem oddziaływań grawitacyjnych układów Ziemia–Księżyc oraz Ziemia–Słońce oraz sił odśrodkowych w ruchu obiegowym względem barycentrum. Potencjał pływowy może zostać zapisany w postaci [4]:

$$W_2 = -\frac{GM}{2} \frac{\rho^2}{r^3} (3 \cos^2 Z - 1), \quad (2)$$

gdzie:  $\rho$  — równikowy promień Ziemi;  
 $GM$  — parametr grawitacyjny;  
 $r$  — odległość pomiędzy środkami mas Ziemi oraz Księżyca lub Słońca;  
 $Z$  — odległość zenitalna Księżyca lub Słońca.

Gdy przekształcimy wyrażenie  $3 \cos^2 Z - 1$ , otrzymamy potencjał pływowy wyrażony wzorem Laplace'a:

$$W_2 = \frac{3}{4} \frac{GM\rho^2}{r^3} \left\{ \begin{array}{l} \cos^2 \varphi \cos^2 \delta \cos 2t + \\ + \sin 2\varphi \sin 2\delta \cos t + \\ + 3 \left( \sin^2 \varphi - \frac{1}{3} \right) \left( \sin^2 \delta - \frac{1}{3} \right) \end{array} \right\}. \quad (3)$$

W równaniu (3) poszczególne wyrazy reprezentują trzy typy sferycznych funkcji harmonicznych drugiego rzędu: sektorowe, tesseralne oraz strefowe.

W myśl dynamicznej teorii pływów do zmiennej potencjału pływowego  $W_2$  należy dodać również potencjał wynikający z deformacji pływowej Ziemi, a oprócz tego trzeba brać pod uwagę zmianę wartości początkowej potencjału ze względu na przesunięcie pionowe u stanowiska obserwacyjnego. I tak do opisu radialnych przemieszczeń materii wewnątrz modelu Ziemi, który stanowi kula o jednorodnej budowie, w której wnętrzu przed pojawieniem się sił pływowych panowała równowaga hydrostatyczna, wprowadza się pewną funkcję promienia  $H_2(r)$ . Funkcja ta wiąże wielkości radialnego przesunięcia u powierzchni Ziemi i potencjału pływowego  $W_2$  równaniem [4]:

$$U_2 = H_2(r) \frac{W_2}{g}, \quad (4)$$

gdzie  $\frac{W_2}{g}$  jest wysokością pływu statycznego. Dodatkowy potencjał wywołany deformacją pływową Ziemi wyrażony został przy pomocy funkcji promienia  $K_2(r)$ :

$$\Delta W_p = K_2(r) \cdot W_2. \quad (5)$$

Funkcje  $H_2(r)$  i  $K_2(r)$  wyznaczone zostały z rozwiązania układu równań opisujących stan równowagi modelu Ziemi. Powierzchniowe wartości tych funkcji  $h_2 = H_2(a)$  i  $k_2 = K_2(a)$  nazywamy liczbami Love'a. I tak liczba Love'a  $h_2$  opisuje stosunek wielkości radialnych przemieszczeń powierzchni Ziemi do wysokości pływu statycznego.

Stosunek wielkości dodatkowego potencjału wygenerowanego przez deformacje pływowe do wielkości pierwotnego potencjału pływowego opisuje liczba Love'a  $k_2$ .

Tak jak dla potencjału pływowego  $W_2$ , istnieją liczby Love'a dla harmonik pływowych wyższych rzędów. Liczby Love'a odpowiadające różnym harmonikom potencjału pływowego posiadają różne wartości liczbowe, ale ich sens fizyczny pozostaje niezmienny. Wprowadzenie dodatkowo przez Shidę jeszcze jednej

funkcji własności sprężystych Ziemi  $l_2(r)$  pozwoliło opisać zależności pomiędzy horyzontalnymi przemieszczeniami  $v$  i  $\omega$  punktów powierzchni skorupy ziemskiej a potencjałem pływowym  $W_2$  o postaci:

$$v_2 = \frac{L_2(a)}{g} \frac{\partial W_2}{\partial \theta}, \quad \omega_2 = \frac{L_2(a)}{g \sin \theta} \frac{\partial W_2}{\partial \lambda}. \quad (6)$$

Powierzchniową wartość funkcji  $l_2 = L_2(a)$  nazwano liczbą Shidy. Deformacje Ziemi oraz potencjału grawitacyjnego spowodowane działaniem pola sił pływowych można wyrazić za pomocą liniowej kombinacji liczb Love'a i Shidy, pomnożonej przez potencjał pływowy lub odpowiednią jego pochodną [4].

Dla określenia wartości liczb Love'a  $k$  i  $h$  wykorzystuje się głównie obserwacje długookresowych fal pływowych, najlepiej o okresie 18,6 lat (najmniejsza częstotliwość pływowa — okres obrotu linii węzłów orbity Księżyca). Dla absolutnie sztywnej Ziemi  $k = 0$  i  $h = 0$ . Dla Ziemi idealnie sprężystej  $h = 1$ .

Pływy Ziemi można ogólnie podzielić na pływy części stałej (ang. *solid Earth tides*), oceanów i atmosfery. Zagadnienie interakcji pomiędzy poszczególnymi typami pływów jest bardzo istotnym elementem teorii pływowych i w chwili obecnej szeroko dyskutowanym (w Polsce np. [5] czy [6]).

### 3. Model pływowy

#### 3.1. Zmiany potencjału

Najwygodniejszym sposobem opisu zmian potencjału Ziemi wynikających z jej elastycznej odpowiedzi na działanie sił pływowych jest modelowanie zmian współczynników harmonik sferycznych  $C_{nm}$  oraz  $S_{nm}$  w postaci poprawek  $\Delta C_{nm}$  oraz  $\Delta S_{nm}$  przedstawionych w funkcji liczby Love'a  $k$ .

Aby jednak scharakteryzować zmiany elastyczne wywołane przez składowe harmoniczne stopnia  $n$ -tego i rzędu  $m$ -tego, należy parametr  $k$  zróżnicować na jego nominalne wartości  $k_{nm}$ .

Z kolei z uwagi na eliptyczność Ziemi oraz istnienie siły Coriolisa wynikającej z jej ruchu obrotowego konieczne jest wprowadzenie trzech rodzajów parametrów zależnych częstotliwościowo:  $k_{nm}^{(0)}, k_{nm}^{(+)}, k_{nm}^{(-)}$ .

Z uwagi na asprężystość (sprężystość opóźnioną) płaszcz ziemskiego wielkości te będą dodatkowo miały niewielką część urojoną, co będzie się odbijać w przesunięciu fazowym deformacyjnej odpowiedzi Ziemi na działanie sił pływowych oraz drobnych zmianach częstotliwości w długookresowych falach pływowych:

$$k_{nm}^{(0)} \rightarrow \text{Re } k_{nm}^{(0)} + i \cdot \text{Im } k_{nm}^{(0)}.$$

Pływy Ziemi stałej w paśmie dobowym ( $nm = 21$ ) nie są w całości powodowane przez bezpośredni wpływ potencjału zakłócającego Księżyca, Słońca i planet, lecz zawierają w sobie również:

- wpływ oceanu i atmosfery (efekty pośrednie);
- wpływ wahań płaszczka w miejscu jego zetknięcia z jądrem Ziemi — nutacja swobodna jądra (FCN — *Free Core Nutation*) o okresie rezonansu  $23^h 52^m 45^s$ .

Redukcja efektu zmiany potencjału siły ciężkości Ziemi pod wpływem działania sił pływowych w myśl konwencji IERS2003 składa się z trzech kroków [2].

1. Na podstawie niezależnych częstotliwościowo wartości liczby Love'a  $k_{nm}$  poprawki do współczynników harmonik sferycznych wyliczane są w dziedzinie czasu:

$$\Delta\bar{C}_{nm} - i \cdot \Delta\bar{S}_{nm} = \frac{k_{nm}}{2n+1} \left[ \frac{GM_K}{GM_Z} \left( \frac{\rho}{r_K} \right)^3 \bar{P}_{nm}(\sin\Phi_K) e^{-im\Lambda_K} + \frac{GM_S}{GM_Z} \left( \frac{\rho}{r_S} \right)^3 \bar{P}_{nm}(\sin\Phi_S) e^{-im\Lambda_S} \right], \quad (7)$$

gdzie:  $k_{nm}$  — nominalna liczba Love'a stopnia  $n$  i rzędu  $m$ ;

$\rho$  — równikowy promień Ziemi;

$GM_K, GM_S, GM_Z$  — parametr grawitacyjny odpowiednio Księżyca, Słońca i Ziemi;

$r_K, r_S$  — odległość pomiędzy środkami mas Ziemi oraz odpowiednio Księżyca i Słońca;

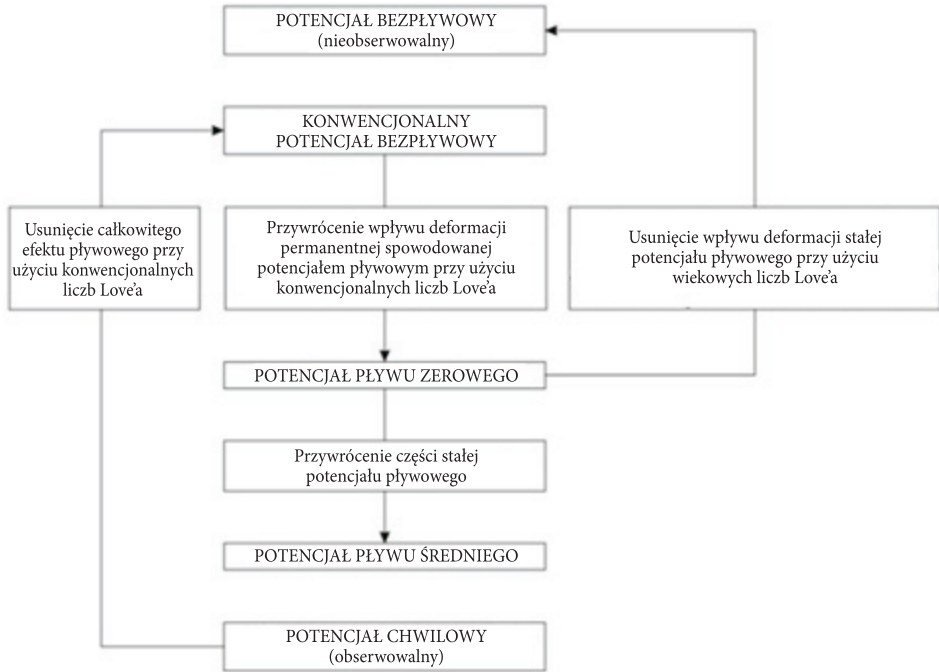
$\Phi_K, \Lambda_K, \Phi_S, \Lambda_S$  — współrzędne geocentryczne (efemerydy) odpowiednio Księżyca i Słońca;

$\bar{P}_{nm}$  — znormalizowane stowarzyszone funkcje Legendre'a.

Standardowo korekcje te wylicza się dla pływów dobowych ( $n = 2$ ) oraz półdobowych ( $m = 3$ ).

2. Korekcja ze względu na odchylenia wartości  $k_{21}$  oraz  $k_{22}$  dla poszczególnych składowych częstotliwościowych pasm odpowiednio dobowego i półdobowego. Innymi słowy są to poprawki do wartości  $\Delta\bar{C}_{nm}$  i  $\Delta\bar{S}_{nm}$  otrzymanych w kroku pierwszym ze względu na zależność częstotliwościową liczby Love'a.
3. Uwzględnienie pływu stałego. Potencjał pływowy strefowy stopnia II posiada średnią wartość, która nie jest zerowa. Ta niezależna od czasu składowa ( $nm = 20$ ) powoduje deformację permanentną i wynikający z niej, niezależny od czasu wpływ na współczynnik potencjału Ziemi  $\bar{C}_{20}$ .

Na rysunku 1 przedstawiono procedurę tworzenia modelu potencjału pola ciężkości Ziemi w zależności od kolejnych kroków uwzględnienia zjawiska pływowej deformacji powierzchni litosfery. Z najpopularniejszych modeli EGM2008 jest modelem typu *conventional tide free geopotential* [7], natomiast JGM-3 — *zero-tide geopotential* [8].



Rys. 1. Schemat tworzenia modelu potencjału Ziemi (oryg. w jęz. ang. [2])

### 3.2. Zmiany deformacyjne

Redukcja efektu deformacji litosfery pod wpływem działania sił pływowych również składa się z trzech kroków [2].

1. Poprawki liczone w dziedzinie czasu ze względu na zmianę długości geocentrycznego wektora wodzącego stacji. Zakłada się w nim nominalne wartości liczby Love'a  $h$  oraz liczby Shidy  $l$ . Poprawki te dzieli się na dwie grupy:
  - deformacje ze względu na pływy II stopnia:

$$\Delta \vec{r} = \frac{GM_K}{GM_Z} \frac{\rho^4}{r_K^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left[ \frac{3(\hat{r}_K \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right] + 3l_2 (\hat{r}_K \cdot \hat{r}) [\hat{r}_K - (\hat{r}_K \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\} + \quad (8)$$

$$+ \frac{GM_S}{GM_Z} \frac{\rho^4}{r_S^3} \left\{ h_2 \hat{r} \left[ \frac{3(\hat{r}_S \cdot \hat{r})^2 - 1}{2} \right] + 3l_2 (\hat{r}_S \cdot \hat{r}) [\hat{r}_S - (\hat{r}_S \cdot \hat{r}) \hat{r}] \right\},$$

gdzie:  $\hat{r}_K, \hat{r}_S$  — wersor wektora łączącego środek masy Ziemi oraz odpowiednio Księżyca i Słońca;

$\hat{r}$  — wektor łączący środek masy Ziemi oraz stanowisko obserwacyjne;

$h_2$  — nominalna liczba Love'a drugiego stopnia;

$l_2$  — nominalna liczba Shidy drugiego stopnia.

— deformacje ze względu na pływy III stopnia:

$$\Delta \vec{r} = \frac{GM_K \rho^5}{GM_Z r_K^3} \left\{ h_3 \hat{r} (\hat{r}_K \cdot \hat{r})^2 \left[ \frac{5}{2} (\hat{r}_K \cdot \hat{r}) - \frac{3}{2} \right] + l_3 \left[ \frac{15}{2} (\hat{r}_K \cdot \hat{r})^2 - \frac{3}{2} \right] \left[ \hat{r}_K - (\hat{r}_K \cdot \hat{r}) \hat{r} \right] \right\}, \quad (9)$$

gdzie:  $h_3$  — nominalna liczba Love'a trzeciego stopnia;

$l_3$  — nominalna liczba Shidy trzeciego stopnia.

2. Poprawki liczone w dziedzinie częstotliwości ze względu na zależność częstotliwościową wartości liczby Love'a  $h$  oraz liczby Shidy  $l$ . Poprawki te dzieli się na dwie grupy:

— deformacje ze względu na pływy dobowe:

składowa radialna:

$$\delta r = \left[ \delta R_f^{(ip)} \sin(\theta_f + \lambda) + \delta R_f^{(op)} \cos(\theta_f + \lambda) \right] \sin 2\varphi \hat{r} \quad (10)$$

składowa tangencjalna:

$$\delta \vec{t} = \left[ \delta T_f^{(ip)} \cos(\theta_f + \lambda) - \delta T_f^{(op)} \sin(\theta_f + \lambda) \right] \sin \varphi \hat{e} + \left[ \delta T_f^{(ip)} \sin(\theta_f + \lambda) + \delta T_f^{(op)} \cos(\theta_f + \lambda) \right] \cos 2\varphi \hat{n}, \quad (11)$$

gdzie:  $\varphi, \lambda$  — współrzędne geograficzne stanowiska obserwacyjnego;

$\theta_f$  — argument pływowy dla fali o częstotliwości  $f$ ;

$\hat{r}, \hat{e}, \hat{n}$  — wektory łączące środek masy Ziemi oraz stanowisko obserwacyjne w kierunkach odpowiednio radialnym, wschodnim i zachodnim;

$\delta R_f^{(ip)}, \delta R_f^{(op)}, \delta T_f^{(ip)}, \delta T_f^{(op)}$  — wielkości proporcjonalne do zmian nominalnych liczb Love'a i Shidy dla częstotliwości  $f$  (proste — *in-phase* oraz odwrotne — *out-of-phase*).

— deformacje ze względu na pływy długookresowe:

składowa radialna:

$$\delta r = \left( \delta R_f^{(ip)} \cos \theta_f + \delta R_f^{(op)} \sin \theta_f \right) \left( \frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \quad (12)$$

składowa tangencjalna:

$$\delta \vec{t} = (\delta T_f^{(ip)} \cos \theta_f + \delta T_f^{(op)} \sin \theta_f) \sin 2\varphi \hat{n}. \tag{13}$$

3. Poprawka ze względu na deformację stałą:  
składowa radialna:

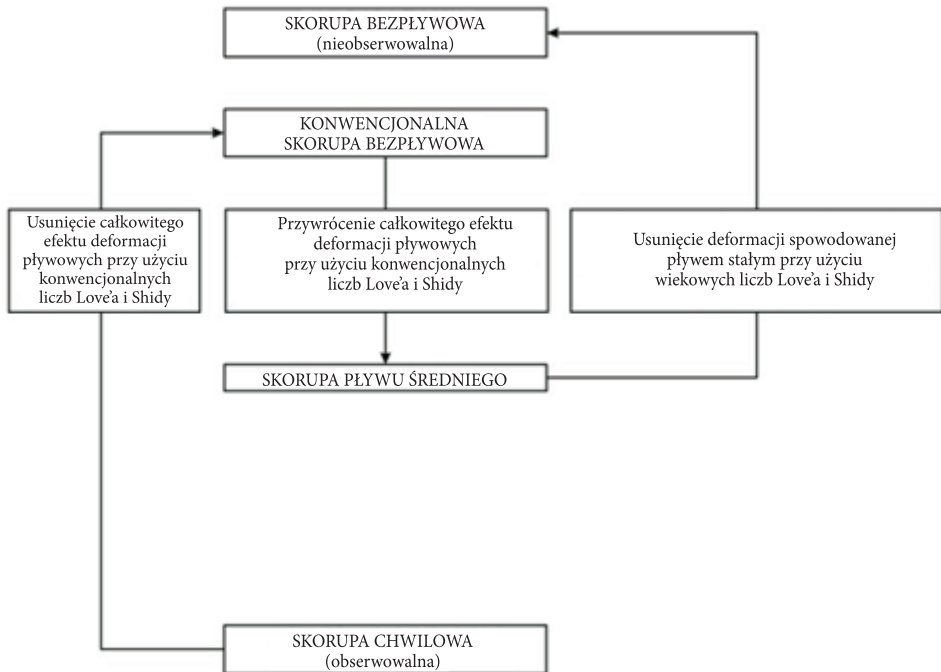
$$\Delta r = \left[ -0,1206 + 0,0001 \left( \frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \right] \left( \frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \text{ [m]} \tag{14}$$

składowa tangencjalna:

$$\Delta \vec{t} = \left[ -0,0252 + 0,0001 \left( \frac{3}{2} \sin^2 \varphi - \frac{1}{2} \right) \right] \sin 2\varphi \text{ [m]}. \tag{15}$$

Wartość składowej radialnej waha się od -12 cm na biegunach do +6 cm na równiku. Wartość składowej tangencjalnej to maksimum 3 cm.

Na rysunku 2 przedstawiono procedurę tworzenia modelu skorupy ziemskiej w zależności od kolejnych kroków uwzględnienia zjawiska pływowej deformacji



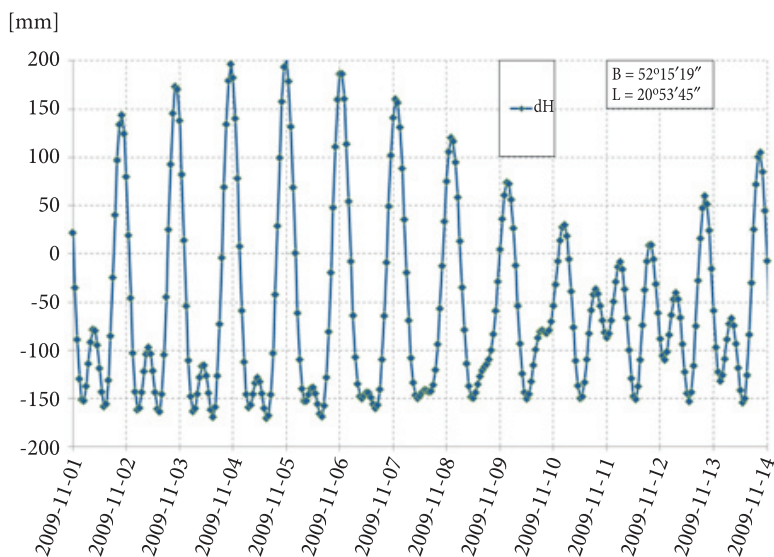
Rys. 2. Schemat tworzenia modelu pływów skorupy ziemskiej (org. w jęz. ang. [2])



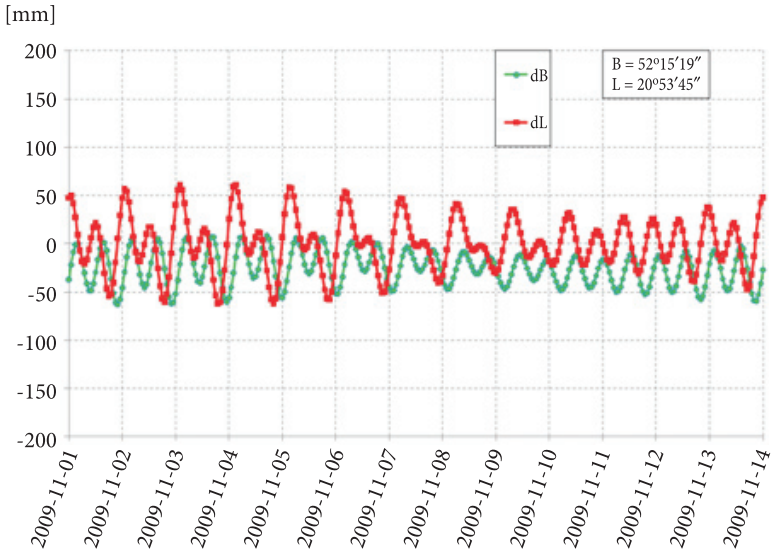
powierzchni litosfery. Warto w tym miejscu nadmienić, że każda kolejna realizacja ziemskiego systemu odniesienia w postaci ITRF (*International Terrestrial Reference Frame*) jest rozwiązaniem typu *conventional tide free crust* tworzonym z wykorzystaniem konwencjonalnych (umownych) liczb Love'a i Shidy.

Jak już zostało wspomniane na początku niniejszego artykułu, zjawisko pływów Ziemi jest największym (pod względem amplitudy) zjawiskiem geodynamicznym wpływającym na wiarygodność i spójność obserwacji wykonywanych na fizycznej powierzchni Ziemi. Amplituda ta zależy od położenia obserwatora. Na rysunkach 3 i 4 przedstawiono wielkości radialnych i horyzontalnych deformacji powierzchni Ziemi dla Warszawy z okresu 14 dni listopada 2009 roku wyliczone programem Eterna w wersji 3,40 [9] przy użyciu rozwinięcia potencjału pływowego HW95 [10].

Można zauważyć, że w naszych szerokościach geograficznych wielkości deformacji radialnych są ponad 4 razy większe niż zmiany w południku miejscowym i ponad 5 od zmian w pierwszym wertykale. Charakter zmian wielkości dB wynika z faktu, iż deklinacja Księżyca nie przekracza wartości +27 stopni, więc „ściąga” on stanowisko obserwacyjne w kierunku równika, podczas gdy wartości dL są równomiernie rozłożone wokół zera, gdyż związane są z okresowym przejściem Księżyca przez południk miejscowy. Na podkreślenie zasługuje również fakt, iż przy obecnej precyzji (sięgającej rzędu pojedynczych milimetrów na stacjach permanentnych) pomiarów kosmicznych zarówno w systemach GNSS (*Global Navigation Satellite Systems*), jak i w obserwacjach VLBI (*Very Long Baseline Interferometry*) czy SLR (*Satellite Laser Ranging*) efekt wynikający ze zmian pływowych jest niezwykle istotny.



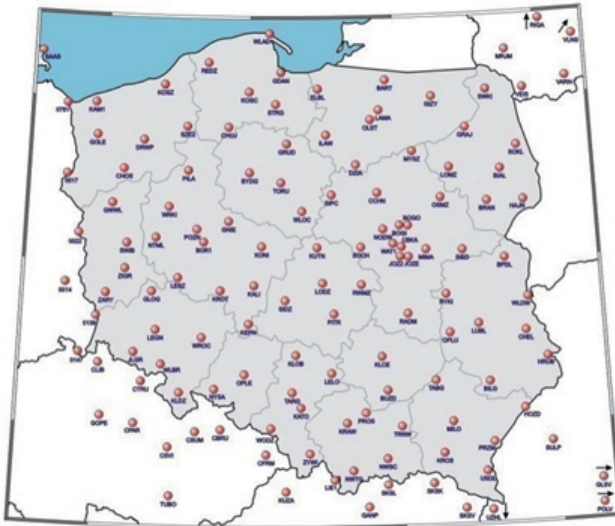
Rys. 3. Wielkość radialnych pływowych deformacji powierzchni Ziemi



Rys. 4. Wielkość horyzontalnych pływowych deformacji powierzchni Ziemi

### 4. Obserwacje

Dane wykorzystane do weryfikacji opisywanego modelu pływowego pochodzą ze stacji systemu ASG-EUPOS. Na podstawie umowy pomiędzy Głównym Geodetą Kraju a Wojskową Akademią Techniczną Centrum Geomatyki Stosowanej posiada



Rys. 5. Sieć punktów opracowana w ramach opisywanych badań

wyłączny dostęp do danych gromadzonych w ramach systemu, przede wszystkim w celu monitorowania i kontroli poprawności otrzymywanych rozwiązań, ale także oceny możliwości zastosowania systemu w badaniach naukowych z dziedziny geodezji i geodynamiki. Sieć stacji, z których obserwacje zostały wykorzystane w niniejszych badaniach, przedstawiono na rysunku 5.

W sumie pozwoliło to na wykonanie opracowania sieci składającej się ze 132 stacji z Polski i krajów sąsiednich (Niemcy, Czechy, Słowacja, Ukraina, Białoruś i Litwa). Cztery stacje zostały przyjęte jako referencyjne (ONSA, METS, POTS and WTZR), 24 z nich to jednocześnie stacje EPN.

## 5. Opracowanie obserwacji

Opracowanie zostało wykonane za pomocą oprogramowania Bernese 5.0 na klastrze komputerowym Fenix stanowiącym centralny system obliczeniowy CGS i zarządzającym zasobami informatycznymi przy użyciu szerokopasmowego łącza internetowego. Jest to maszyna składająca się z 16 węzłów HP rx1620 opartych na dwóch procesorach Intel Itanium 2 o częstotliwości 1,6 GHz i pamięci operacyjnej 32 GB. Dodatkowo system składa się z 2 serwerów dwuprocessorowych oraz 10 serwerów obliczeniowych i administracyjnych. Oprogramowanie Bernese jest zainstalowane na platformie IA-64, kompilacji Intel Fortran 11.1 oraz GNU 95. Dodatkowo wykorzystywane są moduły BPE (*Bernese Processing Engine* — zbiór skryptów *perl* i powłoki systemowej *bash* do automatycznego opracowania obserwacji GPS w Bernese) oraz Super BPE (odmiana rozpraszania zadań na węzłach klastra).

W opracowaniu zastosowano metodę podwójnych różnic z wykorzystaniem kombinacji liniowej częstotliwości niezależnej od wpływu jonosfery (*ionosphere-free linear combination*). Dla stacji, dla których było to możliwe, zastosowano absolutny model centrów fazowych anten. W czasie opracowania suchy składnik modelu Saastamoinena z funkcjami mapującymi Dry-Niell został wykorzystany a priori.

Funkcje mapujące Wet-Niell bez modelu a priori zastosowano do oszacowania wpływu części mokrej troposfery. Ostateczne wyrównanie oparto o kombinację częstotliwości niezależną od jonosfery, a globalny model jonosferyczny CODE (*The Centre for Orbit Determination in Europe*) został użyty w celu zwiększenia liczby rozwiązanych nieoznaczoności fazy w metodach QIF (*Quasi-Iono Free*), L5/L3 oraz L1/L2. W rozwiązaniu wykorzystanym do niniejszego opracowania użyto orbit precyzyjnych i parametrów ruchu obrotowego Ziemi (ERP — *Earth Rotation Parameters*) udostępnionych przez IGS (*International GNSS Service*). Są one dostępne z kilkunastodniowym opóźnieniem, ale zapewniają uzyskanie wyników o bardzo dużej wiarygodności. Metoda wyznaczenia nieoznaczoności fazy zależała od długości linii bazowych pomiędzy poszczególnymi antenami. Dla długich linii bazowych zastosowano metodę QIF z modelem jonosfery CODE, dla linii do 200 km L5/L3, poniżej

20 km — L1/L2. Pływy Ziemi stałej wyeliminowano modelem IERS2003, natomiast oceanu — FES2004. Szczegółowy opis strategii obliczeniowej stosowanej w Lokalnym Centrum Analiz przy Wojskowej Akademii Technicznej (akronim MUT — *Military University of Technology*) znajduje się w publikacji [14].

Standardem opracowania obserwacji GNSS w sieci EPN czy IGS są wyniki w postaci rozwiązań dobowych bądź tygodniowych (długość okna obserwacyjnego). Ponieważ najbardziej energetyczne pasma pływowe to dobowe i półdobowe, więc do niniejszego projektu należało zastosować inną strategię opracowania. Z doświadczeń związanych z analizami pływowymi wynika, iż optymalną rozdzielczością do otrzymania wiarygodnych wyznaczeń parametrów pływowych jest rozdzielczość godzinna [15]. W przypadku tak rozbudowanej sieci zastosowanie godzinnych okien obserwacyjnych jest niemożliwe z uwagi na zbyt dużą liczbę niewyznaczonych nieoznaczoności fazy. Doświadczenia innych autorów wskazują na zastosowanie okna czterogodzinnego [11], aczkolwiek taka metoda wprowadza do obserwacji sztuczną częstotliwość o podwójnym okresie (częstotliwość Nyquista), a zmiany ośmiogodzinne są również zmianami pływowymi, wynikającym z teorii potencjału (zmiany III rzędu). Dlatego też zdecydowano się wprowadzić okno trzygodzinne, nawet pomimo faktu ryzyka otrzymania dużej liczby niewyznaczonych nieoznaczoności, które jednak nie powinny wpływać na otrzymane częstotliwości we współrzędnych wynikowych. Aby otrzymać dane z rozdzielczością godzinną, okno trzygodzinne było przesuwane co godzinę. Istnieje w takim rozwiązaniu duże niebezpieczeństwo zwiększenia zależności korelacyjnych, chociaż zależności te i tak w opracowaniu obserwacji GNSS istnieją zawsze. Autorzy przy estymacji parametrów nie brali pod uwagę problemu szumu obserwacji permanentnych GNSS, który bardziej odpowiada szumowi białemu, niż kolorowemu, jednak problem ten niewątpliwie zasługuje na dalsze wnikliwe analizy.

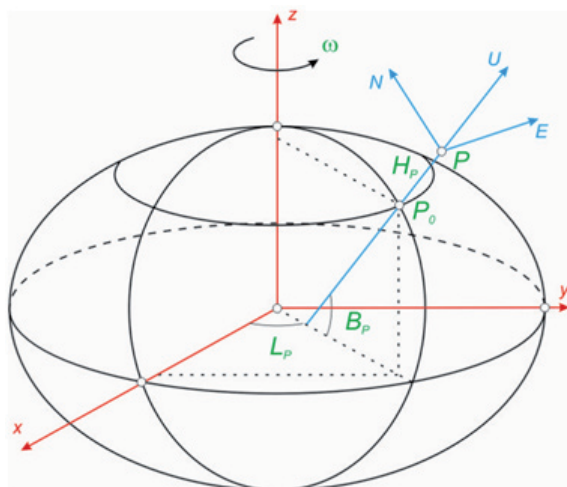
Dane obejmują okres od 8.06.2008 do 9.06.2009. Warto nadmienić, iż opracowanie opisywanej sieci na klastrze komputerowym Fenix zajęło ponad dwa miesiące permanentnych obliczeń.

## 6. Szeregi czasowe

Otrzymane szeregi czasowe to zmiany współrzędnych geocentrycznych ortokartezjańskich w układzie ITRF2005. W celu lepszej interpretacji zjawiska pływów, które jest ściśle związane z miejscem obserwacji na fizycznej powierzchni Ziemi, szeregi te przeliczono do topocentrycznego układu North-East-Up (rys. 6) za pomocą wzoru [12]:

$$\begin{bmatrix} N \\ E \\ U \end{bmatrix} = \mathbf{R}_x \cdot \mathbf{R}_z \cdot \begin{bmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \sin \bar{B} & \cos \bar{B} \\ 0 & -\cos \bar{B} & \sin \bar{B} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -\sin \bar{L} & \cos \bar{L} & 0 \\ -\cos \bar{L} & -\sin \bar{L} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} X - \bar{X} \\ Y - \bar{Y} \\ Z - \bar{Z} \end{bmatrix}, \quad (16)$$

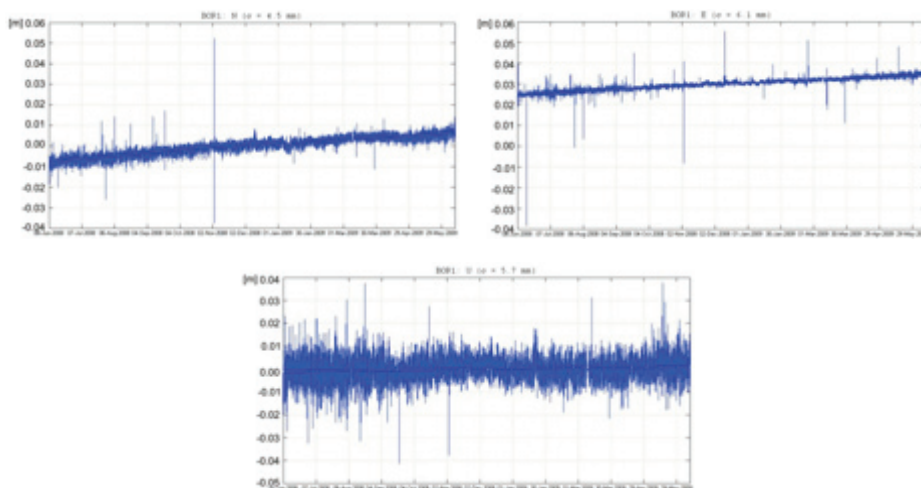
gdzie  $\mathbf{R}_x$  i  $\mathbf{R}_z$  są macierzami obrotów względem odpowiednich osi układu ortokartezjańskiego.



Rys. 6. Układ NEU

Znając wielkość efektów pływowych deformacji litosferycznych, należy sprawdzić spójność wewnętrzną otrzymanych szeregów czasowych. Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe przebiegi współrzędnych stacji EPN BOR1. Widać na nim, iż odchylenia standardowe rocznych przebiegów kształtują się na poziomie kilku milimetrów, co może świadczyć o przydatności otrzymanych wyników do dalszych analiz.

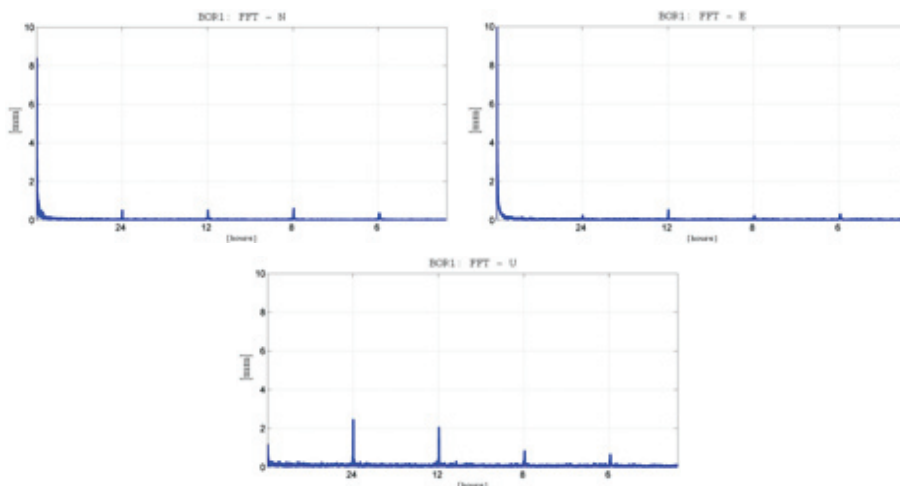
„Oskoki” od trendów widoczne szczególnie we współrzędnej E są prawdopodobnie wynikiem zastosowania krótkiego okna czasowego (3 godziny), w związku z czym modele troposfery i jonosfery użyte w opracowaniu nie pozwalają na wyznaczenie nieoznaczoności fazy w sposób wystarczająco wiarygodny. Należy jednak nadmienić, iż z uwagi na przypadkowość ich występowania nie mają one praktycznie żadnego wpływu na dalsze analizy, których celem będzie wyznaczenie oscylacji pływowych.



Rys. 7. Zmiany współrzędnych N, E oraz U [m] stacji EPN BOR1 (06.2008-06.2009 z rozdzielczością godziną)

## 7. Oscylacje okresowe

Pierwszym etapem sprawdzenia poprawności opracowanej sieci było wyliczenie istniejących w szeregach czasowych oscylacji bez podziału na pływowe i mające inny charakter (np. termiczne). Do tego celu wykorzystano szybką transformację Fouriera (FFT — *Fast Fourier Transform*) i oprogramowanie Matlab<sup>®</sup>. Potwierdziło to występowanie oscylacji w głównych pasmach pływowych (dobowe, półdobowe i ośmiogodzinne) oraz istnienie „sztucznej” oscylacji sześciogodzinnej (rys. 8).



Rys. 8. Oscylacje wykryte w zmianach współrzędnych NEU stacji EPN BOGO

## 8. Oscylacje pływowe

Otrzymane szeregi czasowe są szeregami rezydualnymi, otrzymanymi po wyeliminowaniu z obserwacji modelu pływowego procedurami realizującymi konwencje IERS2003. Analiza pływowa, której wyniki zostaną przedstawione w niniejszym podrozdziale, jest więc analizą pozostałości modelu. Opracowanie to zostało wykonane oprogramowaniem Eterna 3.4 używającym metody Chojnickiego [13]. Opiera się ona na zasadzie najmniejszych kwadratów i założeniu, że pojedyncza obserwacja stanowi podstawę do ułożenia równania poprawki o postaci:

$$v_t = \sum_{i=1}^n R_i \delta_i \cos(\Phi_{it} + \Delta\Phi_i) - P_t - D_t + C, \quad (17)$$

gdzie:  $R$  — amplituda modelowa;

$\delta_i$  — współczynnik amplitudy będący liniową kombinacją liczby Love'a i liczby Shidy zależnych od mechanicznych właściwości litosfery;

$\Phi_{it}$  — faza modelowa;

$\Delta\Phi_i$  — przesunięcie fazowe wynikające z opóźnienia w reakcji lepkiej Ziemi w stosunku do modelu;

$P_t$  — wartość zaobserwowana;

$D_t$  — stan punktu zerowego instrumentu;

$C$  — różnica poziomów odniesienia wartości obserwowanych i teoretycznych.

Na etapie wyrównania obserwacji metodą najmniejszych kwadratów otrzymujemy wartości współczynnika  $\delta_i$  oraz przesunięcia fazowego  $\Delta\Phi_i$  będące w naszym przypadku wielkościami pozwalającymi na zweryfikowanie poprawności zastosowanego do opracowania obserwacji satelitarnych modelu pływowego oraz wartości  $D_t$  i  $C$ , które jednak związane są ze stanem swobodnym instrumentu i wykorzystywane tylko w obserwacjach grawimetrycznych.

Kolejnym istotnym w metodzie Chojnickiego elementem jest sposób grupowania fal pływowych. Polega on na założeniu, że w pewnym określonym paśmie elementarne częstotliwości mają te same wartości współczynnika amplitudy oraz przesunięcia fazowego. Liczba wyodrębnionych w ten sposób fal pływowych zależy ściśle od długości analizowanego szeregu czasowego. Zaproponowany sposób grupowania (tab. 1) jest powszechnie stosowany do opracowania obserwacji gromadzonych na stacjach uczestniczących w grawimetrycznym projekcie GGP (*Global Geodynamical Project*).

Taki sposób grupowania pozwoli na uzyskanie parametrów pływowych (współczynnik amplitudy i przesunięcie fazowe) dla jednej fali długookresowej (czternastodniowa Mf), 10 dobowych (w tym główna pływowa O1), 6 półdobowych (główna M2) oraz fal pseudopływowych M3 i M4. Rok obserwacji godzinnych to

TABELA 1

Sposób grupowania fal pływowych (B. Ducarme, komunikacja elektroniczna, format oryginalny programu Eterna)

	Częst. pocz.	Częst. końc.	$\delta$ a priori	$\Delta\Phi$ a priori	Nazwa	
WAVEGROUPI = 0.000133	0.501369	1.00000	0.000	0.000	MF	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 0.721500	0.906315	1.00000	0.000	0.000	Q1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 0.921941	0.940487	1.00000	0.000	0.000	O1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 0.958086	0.974188	1.00000	0.000	0.000	M1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 0.989049	0.998028	1.00000	0.000	0.000	P1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 0.999853	1.000147	1.00000	0.000	0.000	S1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.001825	1.003651	1.00000	0.000	0.000	K1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.005329	1.005623	1.00000	0.000	0.000	PSI1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.007595	1.011099	1.00000	0.000	0.000	PHI1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.013689	1.044800	1.00000	0.000	0.000	J1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.064841	1.216397	1.00000	0.000	0.000	OO1	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.719381	1.872142	1.00000	0.000	0.000	2N2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.888387	1.906462	1.00000	0.000	0.000	N2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.923766	1.942753	1.00000	0.000	0.000	M2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.958233	1.976926	1.00000	0.000	0.000	L2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 1.991787	2.002885	1.00000	0.000	0.000	S2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 2.003032	2.182843	1.00000	0.000	0.000	K2	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 2.753244	3.081254	1.00000	0.000	0.000	M3	#ETERNA wavegroup
WAVEGROUPI = 3.791964	3.937897	1.00000	0.000	0.000	M4	#ETERNA wavegroup

minimalny okres, w którym możliwe jest rozdzielenie dobowych i półdobowych fal okołoczęstotliwościowych (P1, S1 i K1 oraz S2 i K2), a także wyodrębnienie informacji o fali PSI1, która jest wynikiem istnienia czysto dynamicznego zjawiska nutacji swobodnej jądra Ziemi.

W ramach niniejszego opracowania autorzy ograniczyli się tylko do analizy pływowej zmian wysokości, gdyż wstępne badanie metodą FFT pokazało, że w tej składowej możemy jedynie zaobserwować efekty, o których jednoznacznie można powiedzieć, iż są znaczące w porównaniu do otrzymanej precyzji wyników. Tabela 2 przedstawia wyniki analizy pływowej (amplituda i przesunięcie fazowe) programem Eterna 3.4 zmian współrzędnej U stacji JOZE i BOGO. Zostały one wybrane z dwóch powodów: znajdują się blisko siebie, więc parametry opisujące własności mechaniczne lepko-sprężystej Ziemi nie powinny się znacznie różnić, obie znajdują się na betonowych słupach, więc nie powinno być żadnych wątpliwości co do stabilności ich posadowienia. Na rysunkach 9-10 przedstawiono wykresy wielkości energii w poszczególnych pasmach częstotliwościowych.

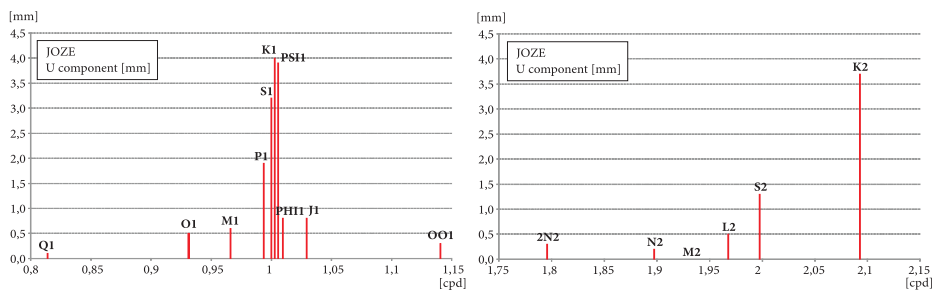


TABELA 2

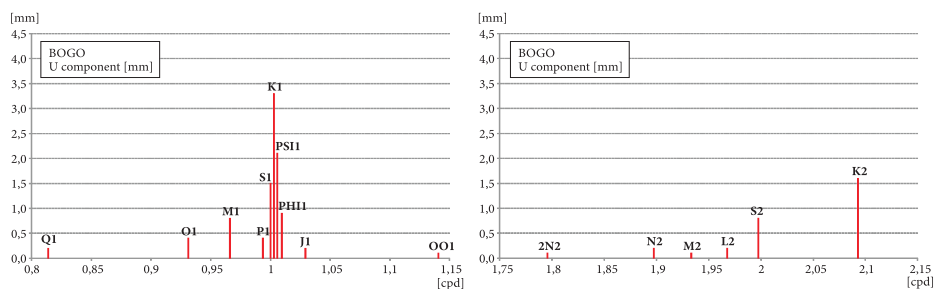
## Wyniki analizy pływowej składowej U

Nazwa	JOZE				BOGO			
	Amplituda [mm]	Odch. st. [mm]	Faza [°]	Odch. st. [°]	Amplituda [mm]	Odch. st. [mm]	Faza [°]	Odch. st. [°]
MF	0,4	0,2	146,5	26,4	0,6	0,1	199,1	8,7
Q1	0,1	0,2	258,0	85,1	0,2	0,1	336,3	42,2
O1	0,5	0,2	210,5	24,7	0,4	0,1	155,5	18,5
M1	0,6	0,4	239,9	35,1	0,8	0,2	9,8	13,5
P1	1,9	0,3	196,7	7,6	0,4	0,1	213,9	18,9
S1	3,2	0,4	80,1	6,6	1,5	0,2	328,5	7,7
K1	4,0	0,2	301,5	3,3	3,3	0,1	176,9	2,1
PSI1	3,9	0,2	261,8	3,5	2,1	0,1	137,7	3,5
PHI1	0,8	0,3	80,0	19,5	0,9	0,1	14,4	8,9
J1	0,8	0,2	250,4	15,9	0,2	0,1	120,7	41,8
OO1	0,3	0,2	318,8	28,9	0,1	0,1	102,9	38,3
2N2	0,3	0,2	160,8	40,5	0,1	0,1	181,2	89,1
N2	0,2	0,2	35,3	60,3	0,2	0,1	329,7	32,4
M2	0,0	0,3	178,4	315,2	0,1	0,1	52,7	56,6
L2	0,5	0,2	11,2	24,8	0,2	0,1	211,0	47,5
S2	1,3	0,2	314,0	10,8	0,8	0,1	53,9	9,6
K2	3,7	0,2	246,6	3,2	1,6	0,1	330,2	4,0
M3	0,1	0,2	306,9	111,5	0,1	0,1	146,7	63,2

Amplitudy zmian deformacji radialnych dla poszczególnych częstotliwości są wielkościami rzędu pojedynczych milimetrów. Wielkości ich odchyżeń standardowych (wynik opracowania pływowego metodą najmniejszych kwadratów) pokazują, że zostały one wyznaczone w sposób wiarygodny. W tabeli 2 możemy zauważyć, iż dużą rozbieżnością i odchyleniem standardowym charakteryzują się zmiany fazy, chociaż tylko dla fal, których amplituda jest bliska zeru. Wynika to z faktu, iż gdy dla danej fali amplituda jest równa zeru, to mówimy o tzw. punkcie amfidromicznym, w którym faza jest niemożliwa do określenia („krąży” wokół punktu). Faza fal o stosunkowo dużej amplitudzie zachowuje się stabilnie.



Rys. 9. Dobowe (lewa strona) i półdobowe (prawa strona) zmiany pływowe w składowej U dla stacji JOZE



Rys. nr 10. Dobowe (prawa strona) i półdobowe (lewa strona) zmiany pływowe w składowej U [mm] dla stacji BOGO

Wielkości szumów obserwacyjnych dla poszczególnych składowych częstotliwościowych i wielkość szumu białego zestawione są w tabeli 3.

TABELA 3

Zestawienie szumów obserwacji GNSS w częstotliwościach pływowych

Częstotliwość [cpd]	BOGO [mm]	JOZE [mm]
0,1	0,3	0,8
1,0	0,2	0,5
2,0	0,2	0,7
3,0	0,2	0,5
4,0	0,3	0,6
szum biały	0,2	0,3

Autorzy spodziewali się, że oscylacje dobowe i półdobowe związane są z oddziaływaniami termicznymi, jednak z analiz wykresów przedstawionych na rysunkach

9-10 wynika, iż dominujące efekty pojawiają się w częstotliwościach związanych z falami K1 i K2, czyli czysto pływowymi efektami. Istnienie tych fal w wynikach opracowania obserwacji GNSS miałyby uzasadnienie, ponieważ te efekty są bardzo trudne do modelowania. Jednocześnie należy zauważyć, iż częstotliwość obiegu satelitów GPS jest związana z dobą gwiazdową, czyli bardzo blisko fali K1. Weryfikacja na podstawie obserwacji GLONASS mogłaby dać odpowiedź na pytanie, czy ma to jakiś związek z pojawieniem się tej oscylacji we współrzędnych. Nie zauważono natomiast żadnych oscylacji w głównych częstotliwościach pływowych O1 i M2. One z kolei są bardzo łatwe do modelowania i jak widać weryfikowany w niniejszym opracowaniu model z łatwością sobie z nimi poradził.

Istotny jest fakt, że na etapie opracowania obserwacji GNSS uwzględniono model pływów oceanicznych, gdyż interakcja pomiędzy pływami oceanicznymi a pływami Ziemi stałej w postaci efektów pośrednich jest bardzo widoczna (szczególnie w częstotliwości M2). Brak w opracowaniu modelu pływów atmosfery pokazuje, iż wpływ tego efektu na zmiany deformacyjne jest zaniedbywany.

Otwarte pozostaje pytanie, czy otrzymana spójność wewnętrzna szeregów czasowych współrzędnych geodezyjnych pozwala na weryfikację tak niewielkich (milimetrowych) różnic pomiędzy modelem a obserwacjami.

## 9. Podsumowanie i wnioski

Efekt pływów Ziemi w obserwacjach geodezyjnych wymaga tworzenia precyzyjnych modeli opartych nie tylko na solidnych założeniach teoretycznych, ale również na wprowadzaniu do modelu współczynników geodezyjnych uwzględniających strukturę mechaniczną powierzchni litosfery w miejscu, gdzie wykonujemy obserwacje.

Opisywana przez autorów idea jest bardzo popularną formą korekcji modeli teoretycznych za pomocą tzw. współczynników geodezyjnych, czyli wielkości weryfikowanych na podstawie obserwacji w celu stworzenia modelu po części empirycznego. Otrzymane rozbieżności pomiędzy modelem IERS2003 a wynikami analizy pływowej potwierdzają, iż model ten wymaga drobnych korekcji, na poziomie dokładności wyznaczeń geodezyjnych. Z matematycznych zależności wynika bowiem, iż w przypadku gdy model matematyczny nie wpisuje się dobrze w opisywaną przez niego rzeczywistość, będziemy obserwować efekt przeciekania energii (ang. *leakage effect*). Forma wprowadzenia tych poprawek dla poszczególnych stacji wymaga dalszych badań i dyskusji.

Otrzymany materiał stanowi świetną podstawę do badań zmian przestrzennych opisywanych parametrów i korelacji ich zmian np. z budową litosfery na terenie Polski, szczególnie w kontekście jej położenia na granicy platform (strefa Teisseyre'a-Tornquista).

Zastanawiającym faktem od strony interpretacji otrzymanych wyników jest istnienie w obserwacjach fali K1. Może to być powodowane przez duże zależności modulacyjne (od fal S1 i P1), innym wytłumaczeniem mogłoby również być niedostatecznie dokładne modelowanie nutacji, a w szczególności efektów rezonansowych jądra Ziemi.

Opracowana metoda jest uniwersalna i może zostać zastosowana do wyników opracowań obserwacji z każdego systemu nawigacyjnego, takiego jak GLONASS czy Galileo.

W zaproponowanym przez autorów rozwiązaniu istnieją duże zależności sieciowe wynikające ze wspólnego rozwiązania wielu stacji w jednym opracowaniu oraz istnieje ryzyko występowania sztucznych częstotliwości (Nyquista), niezwiązanych z efektami rzeczywistymi.

Dużo lepsze możliwości weryfikacji zarówno opisywanego modelu, jak i wielu innych użytych w opracowaniu obserwacji GNSS może przynieść metoda PPP (*Precise Point Positioning*), jednak w chwili obecnej jej dokładność (kilkanaście centymetrów) jest niewystarczająca do opisywanych zastosowań.

Artykuł wpłynął do redakcji 14.07.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w sierpniu 2010 r.

#### LITERATURA

- [1] G. BEUTLER, H. BOCK, E. BROCKMANN, R. DACH, P. FRIDEZ, W. GURTNER, H. HABRICH, U. HUGENTOBLE, D. INEICHEN, A. JAEGGI, M. MEINDL, L. MERVART, M. ROTHACHER, S. SCHAER, R. SCHMID, T. SPRINGER, P. STEIGENBERGER, D. SVEHLA, D. THALLER, C. URSCHL, R. WEBER, *Bernese GPS software version 5.0*, Astronomical Institute, University of Bern, 2006.
- [2] D. D. MCCARTHY, G. PETIT, *IERS Conventions (2003)*, IERS technical Note, 32, Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodaesie, Farnkfurt am Main, 2004.
- [3] K. CZARNECKI, *Geodezja współczesna w zarysie*, Wydawnictwo Wiedza i Życie, Warszawa, 1993.
- [4] P. MELCHIOR, *The Tides of the Planet Earth*, Pergamon Press, 1983.
- [5] M. KACZOROWSKI, *Deformacje Ziemi wywołane pływami (indirect effect) i wyznaczenie ich dla obszaru Polski*, rozprawa doktorska, Warszawa, 1988.
- [6] J. BOGUSZ, *Badanie wpływu atmosfery na wyniki obserwacji grawimetrycznych pływów ziemskich*, rozprawa doktorska, Warszawa, 2000.
- [7] N. K. PAVLIS, S. A. HOLMES, S. C. KENYON, D. SCHMIDT, R. TRIMMER, *A preliminary gravitational model to degree 2160*, [in:] Gravity, Geoid and Space Missions, C. Jekeli, L. Bastos, J. Fernandes (eds.), IAG Symposia, 129, Springer-Verlag, Berlin, Germany, 2005.
- [8] B. D. TAPLEY, M. M. WATKINS, J. C. RIES, G. W. DAVIS, R. J. EANES, S. R. POOLE, H. J. RIM, B. E. SCHUTZ, C. K. SHUM, R. S. NEREM, F. J. LERCH, J. A. MARSHALL, S. M. KLOSKO, N. K. PAVLIS, R. G. WILLIAMSON, *The Joint Gravity Model 3*, J. Geophys. Res, 101, 1996, 28029-28049.
- [9] H.-G. WENZEL, *The nanogal software: Earth tide processing package ETERNA 3.30*, Bulletin d'Information des Marées Terrestres (BIM), Bruxelles, 124, 1996, 9425-9439.

- [10] T. HARTMAN, H.-G. WENZEL, *Catalogue HW95 of the tide generating potential*, Marees Terrestres Bulletin d'Informations (BIM), Bruxelles, 123, 1995, 9278-9301.
- [11] M. HRČKA, J. HEFTY, *Diurnal and semi-diurnal coordinate variations observed in European permanent GPS Network: deterministic and stochastic constituents*, Geophysics and Geodesy, special issue, 2006, 7-16.
- [12] J. HEFTY, L. HUSAR, *Satellite Geodesy: Global Positioning System*, Bratislava, Slovak University of Technology, 2003, 186.
- [13] T. CHOJNICKI, *Wyznaczenie parametrów pływowych przez wyrównanie obserwacji metodą najmniejszych kwadratów*, Geodezja i Kartografia, 20, 3, 1970.
- [14] M. FIGURSKI, P. KAMINSKI, K. KROSCZYŃSKI, K. SZAFRAŃEK, *ASG-EUPOS monitoring with reference to EPN*, EUREF 2009 Proceedings — Submitted to Bulletin of Geodesy and Geomatics, 2009.
- [15] B. DUCARME, L. VANDERCOILDEN, A. P. VENEDIKOV, *Estimation of the precision by the tidal analysis programs ETERNA and VAV*, Marees Terrestres Bulletin D'Informations (BIM), 141, 2005, 11189-11200.

J. BOGUSZ, M. FIGURSKI

### Geodetic corrections of IERS2003 tidal deformational model

**Abstract.** Present article contains the analysis of the possibility of introducing geodetic corrections to the IERS2003 tidal model. It is the model of the Earth's lithosphere tidal deformations used in the Bernese software. The authors present the method of precise GNSS observations, processing in short-time intervals, which was worked out at the Centre of Applied Geomatics, Military University of Technology. As the data, the geodetic time-series (geocentric coordinates) obtained from satellite observations collected at the ASG-EUPOS sites were used. The tidal analysis based on the least squares method confirmed, that the model based on mathematical parameters requires the implementation of geodetic coefficients, particularly in frequencies which are difficult to be modelled such as K1, K2 or PS11. In these frequencies, the residuals of satellite observations' analyses confirmed existence of the differences reached several millimetres. The results of this research state the ideal base for further investigations of spatial distribution of tidal deformational parameters and their correlation to the lithosphere's properties.

**Keywords:** Earth tides, GNSS, geodetic time series

**Universal Decimal Classification:** 528.8

