



Ocena zmiany w czasie liczb Love'a k_2 i k_3 na podstawie danych SLR satelitów LAGEOS

MARCIN JAGODA, MIŁOSŁAWA RUTKOWSKA,
KATARZYNA KRASZEWSKA

Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej Środowiska i Geodezji,
75-453 Koszalin, ul. Śniadeckich 2, marcin.jagoda@tu.koszalin.pl,
miloslawa.rutkowska@tu.koszalin.pl, katarzyna.kraszevska@tu.koszalin.pl

Streszczenie. W pracy wyznaczono liczby Love'a dla pływów drugiego i trzeciego stopnia (liczby k_2 i k_3). Wyznaczenie przeprowadzono na podstawie danych SLR satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 za okres 1.01.2014-1.01.2016. Uzyskane wyniki porównano z naszym wcześniejszym wyznaczeniem dla okresu 1.01.2005-1.01.2007 w celu oceny ich zmiany w czasie oraz wskazania ewentualnych zmian systematycznych.

Otrzymane wartości parametrów k_2 i k_3 wynoszą odpowiednio: $0,29867 \pm 0,0001$ i $0,0898 \pm 0,0047$ (dane LAGEOS-1) oraz $0,29858 \pm 0,0001$ i $0,0867 \pm 0,0047$ (dane LAGEOS-2). Różnią się one od wartości uzyskanych w naszej poprzedniej pracy [25] o $-0,00293$ (dane LAGEOS-1) i $-0,00202$ (dane LAGEOS-2) dla liczby k_2 oraz o $-0,0091$ (dane LAGEOS-1) i $0,0057$ (dane LAGEOS-2) dla liczby k_3 . Różnice te mogą wskazywać na wystąpienie zmiany w czasie wartości k_2 i k_3 .

Słowa kluczowe: pływy, liczby Love'a, SLR, LAGEOS-1, LAGEOS-2

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5393

1. Wstęp

Duża dokładność satelitarnych pomiarów laserowych daje możliwość szerokiego zastosowania tej techniki w geodezji i geodynamice, ostatnio np. do wyznaczania współrzędnych stacji obserwacyjnych [15], parametrów orientacji Ziemi [30], czy też analizy ziemskiego pola grawitacyjnego [28] i modeli pływów oceanicznych [29].

My w serii naszych prac, np. [9, 10], wykorzystujemy dane SLR satelitów LAGEOS, STELLA i STARLETTE do wyznaczania liczb Love'a i Shidy związanych

z ruchem stacji obserwacyjnych wywołanym działaniem sił pływowych — liczby h, l oraz liczby k związanej z potencjałem pływowym — i porównujemy je z wartościami nominalnymi podanymi w biuletynach IERS.

W niniejszej pracy przeprowadziliśmy wyznaczenie liczby Love'a k dla pływów drugiego i trzeciego stopnia — liczby k_2, k_3 za okres 1.01.2014-1.01.2016. Celem badań jest ocena stabilności rozwiązania oraz zmienności w czasie parametrów k_2, k_3 i wskazanie ewentualnych zmian systematycznych poprzez porównanie wyników wyznaczenia z naszą wcześniejszą pracą [25].

2. Teoria

Pod wpływem grawitacyjnego oddziaływania Księżyca i Słońca glob ziemski ulega deformacjom pływowym, które wyrażane są zmianą potencjału grawitacyjnego oraz przemieszczaniem mas ziemskich i oceanicznych. Dla deformowanej pływami księżycowo-słonecznymi Ziemi potencjał grawitacyjny będzie różny od potencjału niedeformowanej Ziemi, ponieważ zmiany rozkładu mas w czasie deformacji oznaczają zmianę potencjału. Do matematycznego opisu deformacji Ziemi na skutek oddziaływania sił pływowych A.E.H. Love [17] i T. Shida [27] wprowadzili trzy współczynniki (tzw. współczynniki pływowe) pomiędzy potencjałem pływowym i jego pochodnymi a efektami deformacyjnymi. Współczynniki te — k, h i l — są określane mianem liczb Love'a i Shidy. Analizowana w niniejszej pracy liczba Love'a k definiowana jest za pomocą potencjału deformacyjnego powstałego na skutek zmiany potencjału grawitacyjnego Ziemi w wyniku działania sił pływowych. Zgodnie z Czarneckim [3] opisuje ona stosunek wielkości dodatkowego potencjału wygenerowanego przez deformacje pływowe (potencjału deformacyjnego) do wielkości pierwotnego potencjału pływowego, co wyraża wzór nr 1 [3]:

$$k = \frac{V_d}{V_l}. \quad (1)$$

Wspomniane powyżej wariacje geopotencjału na skutek działania sił pływowych wywołują perturbacje w ruchu sztucznych satelitów Ziemi. Potencjał grawitacyjny Ziemi wraz z potencjałem pływowym Księżyca i Słońca w przestrzeni zewnętrznej, w której krąży satelita $P(r, \varphi, \lambda)$, można wyrazić za pomocą następującej formuły nr 2 [5]:

$$V = \frac{GM_E}{r} \times \left(1 + \sum_{n=2}^{\infty} \sum_{m=0}^n \left(\frac{a_e}{r} \right)^n P_{nm}(\sin \varphi) ((C_{nm} + \Delta C_{nm}) \cos m\lambda + (S_{nm} + \Delta S_{nm}) \sin m\lambda) \right). \quad (2)$$

Wzór ten otrzymuje się, rozwijając potencjał grawitacyjny ciała materialnego (Ziemi) opisany za pomocą ogólnego wzoru nr 3 [3] w szereg harmonicznych sferycznych, a następnie dodając potencjał pływowy Księżyca i Słońca wyrażony ogólnym wzorem nr 4 [24].

$$V_{GRAV.} = G \iiint_{(M)=Ziemia} \frac{dm}{d_0}, \quad (3)$$

$$V_{TIDE} = GM_j \sum_{n=2}^{\infty} \frac{a_e^n}{d_j^{n+1}} P_n(\cos \psi_j). \quad (4)$$

Potencjał grawitacyjno-pływowy wyrażony wzorem nr 2 opisują współczynniki harmonik sferycznych, zwane także współczynnikami geopotencjału — C_{nm} i S_{nm} — oraz ich zmiany w czasie wywołane potencjałem pływowym — ΔC_{nm} i ΔS_{nm} (nieznormalizowane poprawki do współczynników geopotencjału).

Użyte w powyższych wzorach wartości GM_E , GM_j wyrażają odpowiednio parametr grawitacyjny Ziemi oraz parametr grawitacyjny ciała perturbującego: Księżyca $j = 2$ i Słońca $j = 3$; λ , φ , r oznaczają pozycję satelity: długość i szerokość geocentryczną oraz odległość od środka masy Ziemi; P_{nm} jest stowarzyszonym wielomianem Legendre'a; a_e oznacza średni promień równikowy Ziemi; ψ_j jest kątem pomiędzy geocentrycznym wektorem do punktu na powierzchni Ziemi lub w przestrzeni, gdzie umieszczony jest satelita, a wektorem skierowanym na ciało perturbujące (Księżyc $j = 2$, Słońce $j = 3$); d_j , d_0 oznaczają odpowiednio odległość od środka masy Ziemi do ciała perturbującego (Księżyca $j = 2$, Słońca $j = 3$) oraz odległość pomiędzy elementem masy Ziemi a punktem materialnym w przestrzeni zewnętrznej. Indeksy n , m podają stopień i rząd harmonicznej sferycznej.

Występujące we wzorze nr 2 nieznormalizowane poprawki do współczynników geopotencjału (ΔC_{nm} , ΔS_{nm}) należy przedstawiać w postaci znormalizowanej ($\Delta \bar{C}_{nm}$, $\Delta \bar{S}_{nm}$) wg zależności określonej wzorem nr 5 [23]:

$$\Delta C_{nm} = N_{nm} \Delta \bar{C}_{nm}, \quad \Delta S_{nm} = N_{nm} \Delta \bar{S}_{nm}, \quad (5)$$

w którym N_{nm} jest współczynnikiem normalizacji wyrażanym za pomocą wzoru nr 6:

$$N_{nm} = \sqrt{\frac{(n-m)!(2n+1)(2-\delta_{om})}{(n+m)!}}, \quad (6)$$

gdzie δ_{om} przyjmuje wartości: 1 dla $m = 0$ lub 0 dla $m \neq 0$ [23]. Wówczas dla rozwinięcia do dowolnego stopnia (n) i rzędu (m) znormalizowane poprawki do współczynników geopotencjału określane są zależnością opisaną wzorem nr 7 [5]:

$$\Delta\bar{C}_{nm} - i\Delta\bar{S}_{nm} = \frac{k_{nm}}{2n+1} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{GM_E} \left(\frac{a_e}{d_j} \right)^{n+1} \bar{P}_{nm}(\sin\varphi_j)(\cos m\lambda_j - i\sin m\lambda_j), \quad (7)$$

gdzie k_{nm} oznacza liczbę Love'a k stopnia n i rzędu m ; \bar{P}_{nm} jest znormalizowanym wielomianem Legendre'a, natomiast λ_j, φ_j określają długość i szerokość geocentryczną Księżyca ($j = 2$) i Słońca ($j = 3$).

Znormalizowane poprawki do współczynników geopotencjału drugiego stopnia dla ($n = 2, m = 0, 1, 2$) określone są na podstawie następujących formuł nr 7a [23]:

$$\begin{aligned} \Delta\bar{C}_{20} &= \frac{1}{\sqrt{5}} k_2(0) \frac{a_e^3}{GM_E} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{d_j^3} \bar{P}_{20}(\sin\varphi_j), \\ \Delta\bar{C}_{21} - i\Delta\bar{S}_{21} &= \frac{1}{3} \sqrt{\frac{3}{5}} k_2(1) \frac{a_e^3}{GM_E} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{d_j^3} \bar{P}_{21}(\sin\varphi_j)(\cos\lambda_j - i\sin\lambda_j), \quad (7a) \\ \Delta\bar{C}_{22} - i\Delta\bar{S}_{22} &= \frac{1}{12} \sqrt{\frac{12}{5}} k_2(2) \frac{a_e^3}{GM_E} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{d_j^3} \bar{P}_{22}(\sin\varphi_j)(\cos 2\lambda_j - i\sin 2\lambda_j). \end{aligned}$$

Zakłada się, że występujące w powyższych równaniach trzy różne liczby Love'a: $k_2(m = 0)$, $k_2(m = 1)$, $k_2(m = 2)$ dla pływu długookresowego, dobowego oraz półdobowego przyjmują jedną wartość k_2 , która oznacza liczbę Love'a dla pływów drugiego stopnia. Eksperymentalnie wyznaczone wartości liczby k_2 zawierają się w przedziale $k_2 = 0,280-0,361$ [16, 31, 4, 18, 8].

W przypadku rozwinięcia geopotencjału dla ($n = 3, m = 0$) znormalizowane poprawki do współczynników geopotencjału zgodnie z formułą (7) przyjmą zależność opisaną wzorem nr 8 [23]:

$$\Delta\bar{C}_{30} = \frac{1}{\sqrt{7}} k_3 \frac{a_e^4}{GM_E} \sum_{j=2}^3 \frac{GM_j}{d_j^4} \bar{P}_{30}(\sin\varphi_j), \quad (8)$$

gdzie k_3 oznacza liczbę Love'a dla pływów trzeciego stopnia, jej wyznaczone eksperymentalnie wartości zawierają się w przedziale $k_3 = 0,083-0,095$ [13, 16, 6, 31].

Nominalne wartości parametrów k_2 i k_3 podane w IERS Technical Note No. 36 [23] są równe: $k_2 = 0,29525$, $k_3 = 0,093$.

3. Metoda badawcza

W zastosowanej metodzie badawczej można wyodrębnić kilka etapów. Pierwszym z nich było pobranie ze światowej bazy danych Crystal Dynamics Data Information System (CDDIS) danych do obliczeń w postaci punktów normalnych satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2. Dane te zostały pozyskane przez siedemnaście stacji laserowych sieci globalnej (o numerach: 70802419, 70900513, 78383603, 78393402,

71050725, 71100412, 75010602, 78403501, 72371901, 79417701, 88341001, 18931801, 74068801, 18685901, 78212801, 78418701, 78259001) w okresie 1.01.2014-1.01.2016. Następnie punkty normalne zostały podzielone na miesięczne łuki orbitalne. W sumie otrzymaliśmy 24 łuki orbitalne dla LAGEOS-1 i 24 dla LAGEOS-2. Po podzieleniu obserwacji na łuki orbitalne przystąpiono do wyznaczenia orbit satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 metodą całkowania numerycznego Cowella z zastosowaniem modeli sił przedstawionych w tabeli 1. Dodatkowo dla każdego łuku orbitalnego wyznaczono współczynniki przyspieszeń empirycznych (w trzech kierunkach: wzdłuż orbity, prostopadle do orbity oraz wzdłuż promienia wodzącego) w interwałach pięciodniowych oraz współczynnik ciśnienia promieniowania słonecznego. Punkty normalne były odrzucane przez program orbitalny z obliczeń w oparciu o dwa kryteria:

- sigma RMS orbitalnego równe 5 ($5\sigma \approx \pm 10$ cm),
- przelot satelity niższy niż 10° nad horyzontem.

TABELA 1

Zastosowane modele sił

Rodzaje sił	Zastosowane modele
Pole grawitacyjne Ziemi	EGM2008 (30 × 30) [22]
Siły pływowe	Pływy skorupy ziemskiej i pływy bieguna — zgodnie z Konwencją IERS 2010 [23], pływy oceaniczne — FES2004 [19]
Refrakcja troposferyczna	Mendes-Pavlis [21]
Oddziaływanie grawitacyjne Księżyca i Słońca	JPL DE405 [7]
Oddziaływanie grawitacyjne planet (od Merkurego do Neptuna)	JPL DE405 [7]
System odniesienia	ITRF2014 [1]
Ruch płyt tektonicznych	Prędkości roczne stacji przyjęte z ITRF2014 [1]
Ruch bieguna	IERS2000 [14]
Precesja, nutacja	IAU2000 [23]
Ciśnienie promieniowania słonecznego	a priori 1,13
Parametry orientacji Ziemi	C04 [2]
Poprawki relatywistyczne	Zgodnie z Konwencją IERS 2010 [23]

Wstępne przybliżone wartości elementów orbit (wektory położenia i prędkości) pozyskano z bazy danych CDDIS. Jako dokładność wyznaczenia orbit została przyjęta końcowa wartość RMS orbitalnego (różnic pomiędzy odległościami obserwowanymi i obliczonymi z orbity modelowej na momenty obserwacji (O-C)). Proces iteracyjny poprawiania orbity kończono, gdy został spełniony następujący warunek: $\{RMS(m) - RMS(m - 1)\} < 0,01$ cm, gdzie m jest numerem iteracji.

W niniejszej pracy uzyskano następujące wartości RMS orbitalnego dla satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 (dla 24 łuków orbitalnych w ostatniej iteracji): $\text{RMS(LAGEOS-1)} = 1,23 \text{ cm}$, $\text{RMS(LAGEOS-2)} = 1,47 \text{ cm}$.

Po uzyskaniu zbieżności procesu iteracyjnego wyznaczania orbit przystąpiono do wyznaczenia współczynników pływowych Ziemi. W tym celu zostało utworzone równanie obserwacyjne opisane wzorem nr 9:

$$V_{\rho} = \sum_{i=1}^7 \frac{\partial \rho}{\partial \varepsilon} \Delta \varepsilon + \frac{\partial \rho}{\partial k_2} \Delta k_2 + \frac{\partial \rho}{\partial k_3} \Delta k_3 + (O - C), \quad (9)$$

gdzie $\Delta \varepsilon$ oznacza poprawki do elementów orbity, Δk_2 i Δk_3 to odpowiednio poprawki do liczb Love'a k_2 i k_3 , wartości $(O - C)$ oznaczają różnice pomiędzy obserwowaną i wyznaczoną odległością między satelitą a stacją obserwacyjną, natomiast ρ wyraża wielkość mierzoną w technice SLR (czas przelotu impulsu laserowego do satelity i z powrotem).

Równanie obserwacyjne zostało rozwiązane metodą najmniejszych kwadratów, wszystkie niewiadome wyznaczono we wspólnym wyrównaniu. Wartości pochodnych cząstkowych $\frac{\partial \rho}{\partial k_2}$, $\frac{\partial \rho}{\partial k_3}$, niezbędne do wyznaczenia współczynników pływowych k_2 i k_3 , są obliczane za pomocą różniczkowania wyrażen 7a i 8. Wagi obserwacji przyjęto jako $p = 1 / m_{st}^2$, gdzie m_{st} to błąd pomiaru lasera danej stacji obserwacyjnej. Proces wyznaczenia współczynników pływowych został przeprowadzony z wykorzystaniem metody sekwencyjnej. W fazie pierwszej współczynniki pływowe były obliczane oddzielnie dla każdego łuku orbitalnego (łuk1, łuk2, łuk3 itd.). Kolejne kroki polegały na dodawaniu do siebie łuków jeden po drugim (łuk1 + łuk2, łuk1 + łuk2 + łuk3 itd.). Za każdym razem współczynniki pływowe były na nowo wyznaczone. Ich wartości a priori: $k_2 = 0,29525$, $k_3 = 0,093$ zostały przyjęte z IERS Technical Note No. 36 [23]. W każdym kroku wartości współczynników k_2 i k_3 wyznaczano w procesie iteracyjnym. Wszystkie obliczenia związane z wyznaczeniem orbit satelitów LAGEOS oraz współczynników pływowych k_2 i k_3 wykonano za pomocą oprogramowania GEODYN II [20]. Szczegółowy opis metod wyznaczenia orbit satelitów LAGEOS i parametrów pływowych z danych SLR można znaleźć we wcześniejszych pracach autorów, np. [26].

4. Wyniki badań, dyskusja i wnioski

Dane laserowe satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 pozyskane przez siedemnaście stacji laserowych sieci globalnej za okres 1.01.2014-1.01.2016 zostały wykorzystane do wyznaczenia parametrów pływowych k_2 i k_3 . Uzyskane wartości porównano z wynikami naszego wcześniejszego wyznaczenia tych parametrów dla okresu 1.01.2005-1.01.2007 [25]. Mamy nadzieję, że odstęp czasu pomiędzy dwoma niezależnymi wyznaczeniami (1.01.2005-1.01.2007 i 1.01.2014-1.01.2016) jest wystarczający

i pozwoli na ocenę zmiany w czasie parametrów k_2 i k_3 . Porównanie wyznaczonych liczb k_2 i k_3 w dwóch opisanych powyżej przedziałach czasowych zostało przedstawione w tabelach 2-5.

Ostateczne wartości (dla 24 łuków orbitalnych) współczynników pływowych oraz ich błędy średnie dla interwału 1.01.2014-1.01.2016 wyniosły odpowiednio: $k_2 = 0,29867 \pm 0,0001$, $k_3 = 0,0898 \pm 0,0047$ (z obserwacji LAGEOS-1) oraz $k_2 = 0,29858 \pm 0,0001$, $k_3 = 0,0867 \pm 0,0047$ (z obserwacji LAGEOS-2). Wyniki tego wyznaczenia zostały przedstawione na poniższych rysunkach 1 i 2, kolorem czarnym dla LAGEOS-1 i czerwonym dla LAGEOS-2.

TABELA 2

Wartości współczynnika k_2 wyznaczone z danych LAGEOS-1

Liczba łuków orbitalnych	Wartość k_2 dane LAGEOS-1 1.01.2014-1.01.2016 (1)	Wartość k_2 dane LAGEOS-1 1.01.2005-1.01.2007 [25] (2)	Różnice (1)-(2)
1-2	0,30007 ± 0,00053	0,3043 ± 0,0003	-0,00423
1-3	0,29842 ± 0,00034	0,3021 ± 0,0003	-0,00368
1-4	0,29769 ± 0,00030	0,3050 ± 0,0002	-0,00731
1-5	0,29891 ± 0,00026	0,3028 ± 0,0002	-0,00389
1-6	0,29803 ± 0,00023	0,3013 ± 0,0001	-0,00327
1-7	0,29865 ± 0,00019	0,3012 ± 0,0001	-0,00255
1-8	0,29870 ± 0,00017	0,3012 ± 0,0001	-0,00250
1-9	0,29862 ± 0,00015	0,3011 ± 0,0001	-0,00248
1-10	0,29860 ± 0,00013	0,3011 ± 0,0001	-0,00250
1-11	0,29859 ± 0,00013	0,3012 ± 0,0001	-0,00261
1-12	0,29861 ± 0,00013	0,3012 ± 0,0001	-0,00259
1-13	0,29863 ± 0,00012	0,3012 ± 0,0001	-0,00257
1-14	0,29869 ± 0,00012	0,3014 ± 0,0001	-0,00271
1-15	0,29865 ± 0,00012	0,3014 ± 0,0001	-0,00275
1-16	0,29870 ± 0,00012	0,3013 ± 0,0001	-0,00260
1-17	0,29867 ± 0,00011	0,3013 ± 0,0001	-0,00263
1-18	0,29870 ± 0,00011	0,3015 ± 0,0001	-0,00280
1-19	0,29867 ± 0,00011	0,3016 ± 0,0001	-0,00293
1-20	0,29868 ± 0,00011	0,3016 ± 0,0001	-0,00292
1-21	0,29867 ± 0,00011	0,3016 ± 0,0001	-0,00293
1-22	0,29868 ± 0,00010	0,3017 ± 0,0001	-0,00302
1-23	0,29867 ± 0,00010	0,3016 ± 0,0001	-0,00293
1-24	wartość końcowa 0,29867 ± 0,00010	wartość końcowa 0,3016 ± 0,0001	-0,00293

TABELA 3

Wartości współczynnika k_2 wyznaczone z danych LAGEOS-2

Liczba łuków orbitalnych	Wartość k_2 dane LAGEOS-2 1.01.2014-1.01.2016 (1)	Wartość k_2 dane LAGEOS-2 1.01.2005-1.01.2007 [25] (2)	Różnice (1)-(2)
1-2	0,29683 ± 0,00054	0,2991 ± 0,0005	-0,00227
1-3	0,29774 ± 0,00035	0,3008 ± 0,0004	-0,00306
1-4	0,29926 ± 0,00030	0,3006 ± 0,0003	-0,00134
1-5	0,29846 ± 0,00027	0,3004 ± 0,0003	-0,00194
1-6	0,29790 ± 0,00023	0,2993 ± 0,0002	-0,00140
1-7	0,29873 ± 0,00020	0,3005 ± 0,0002	-0,00177
1-8	0,29840 ± 0,00017	0,3004 ± 0,0002	-0,00200
1-9	0,29853 ± 0,00016	0,3000 ± 0,0002	-0,00147
1-10	0,29867 ± 0,00013	0,3003 ± 0,0002	-0,00163
1-11	0,29860 ± 0,00013	0,3001 ± 0,0002	-0,00150
1-12	0,29848 ± 0,00012	0,2999 ± 0,0002	-0,00142
1-13	0,29861 ± 0,00012	0,2997 ± 0,0002	-0,00109
1-14	0,29858 ± 0,00012	0,2995 ± 0,0002	-0,00092
1-15	0,29850 ± 0,00011	0,2997 ± 0,0001	-0,00120
1-16	0,29845 ± 0,00011	0,2998 ± 0,0001	-0,00135
1-17	0,29850 ± 0,00011	0,3001 ± 0,0001	-0,00160
1-18	0,29857 ± 0,00011	0,3002 ± 0,0001	-0,00163
1-19	0,29856 ± 0,00011	0,3001 ± 0,0001	-0,00154
1-20	0,29856 ± 0,00011	0,3005 ± 0,0001	-0,00194
1-21	0,29858 ± 0,00010	0,3004 ± 0,0001	-0,00182
1-22	0,29859 ± 0,00010	0,3005 ± 0,0001	-0,00191
1-23	0,29858 ± 0,00010	0,3006 ± 0,0001	-0,00202
1-24	wartość końcowa 0,29858 ± 0,00010	wartość końcowa 0,3006 ± 0,0001	-0,00202

TABELA 4

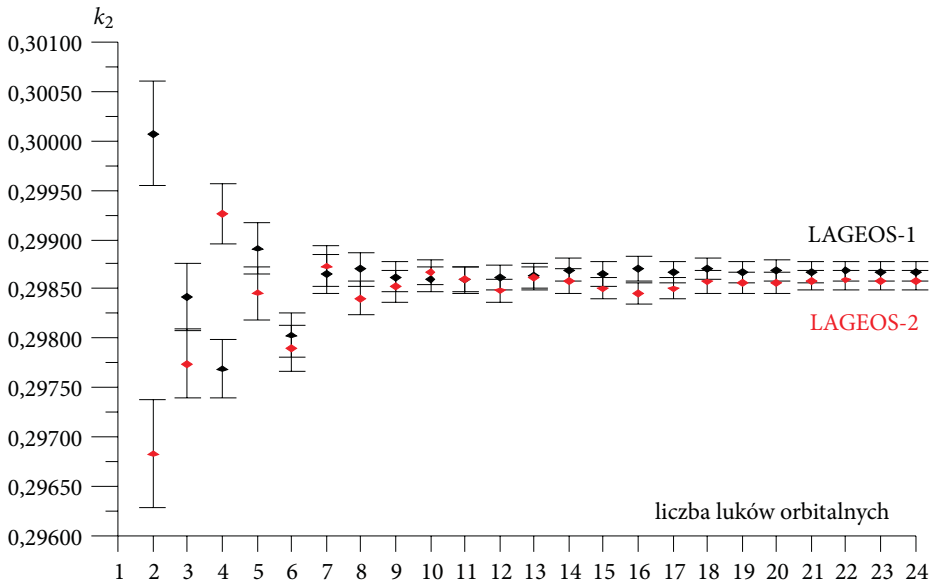
Wartości współczynnika k_3 wyznaczone z danych LAGEOS-1

Liczba łuków orbitalnych	Wartość k_3 dane LAGEOS-1 1.01.2014-1.01.2016 (1)	Wartość k_3 dane LAGEOS-1 1.01.2005-1.01.2007 [25] (2)	Różnice (1)-(2)
1-2	0,0799 ± 0,0162	0,0745 ± 0,0174	0,0504
1-3	0,1003 ± 0,0133	0,0946 ± 0,0142	0,0057
1-4	0,0732 ± 0,0101	0,0847 ± 0,0118	-0,0115
1-5	0,0866 ± 0,0099	0,0927 ± 0,0110	-0,0061
1-6	0,1094 ± 0,0087	0,0963 ± 0,0089	0,0131
1-7	0,0987 ± 0,0082	0,0802 ± 0,0085	0,0185
1-8	0,0931 ± 0,0070	0,1099 ± 0,0073	-0,0168
1-9	0,0885 ± 0,0065	0,1257 ± 0,0066	-0,0372
1-10	0,0821 ± 0,0062	0,1085 ± 0,0064	-0,0264
1-11	0,0870 ± 0,0060	0,1069 ± 0,0062	-0,0199
1-12	0,0844 ± 0,0059	0,1062 ± 0,0060	-0,0218
1-13	0,0903 ± 0,0058	0,0985 ± 0,0059	-0,0082
1-14	0,0897 ± 0,0057	0,1102 ± 0,0058	-0,0205
1-15	0,0869 ± 0,0057	0,1070 ± 0,0057	-0,0201
1-16	0,0900 ± 0,0055	0,1036 ± 0,0057	-0,0136
1-17	0,0874 ± 0,0055	0,1039 ± 0,0056	-0,0165
1-18	0,0862 ± 0,0055	0,0989 ± 0,0055	-0,0127
1-19	0,0880 ± 0,0049	0,0956 ± 0,0055	-0,0076
1-20	0,0905 ± 0,0049	0,0954 ± 0,0054	-0,0049
1-21	0,0928 ± 0,0048	0,0997 ± 0,0053	-0,0069
1-22	0,0914 ± 0,0048	0,0972 ± 0,0052	-0,0058
1-23	0,0896 ± 0,0048	0,0994 ± 0,0052	-0,0098
1-24	wartość końcowa 0,0898 ± 0,0047	wartość końcowa 0,0989 ± 0,0051	-0,0091

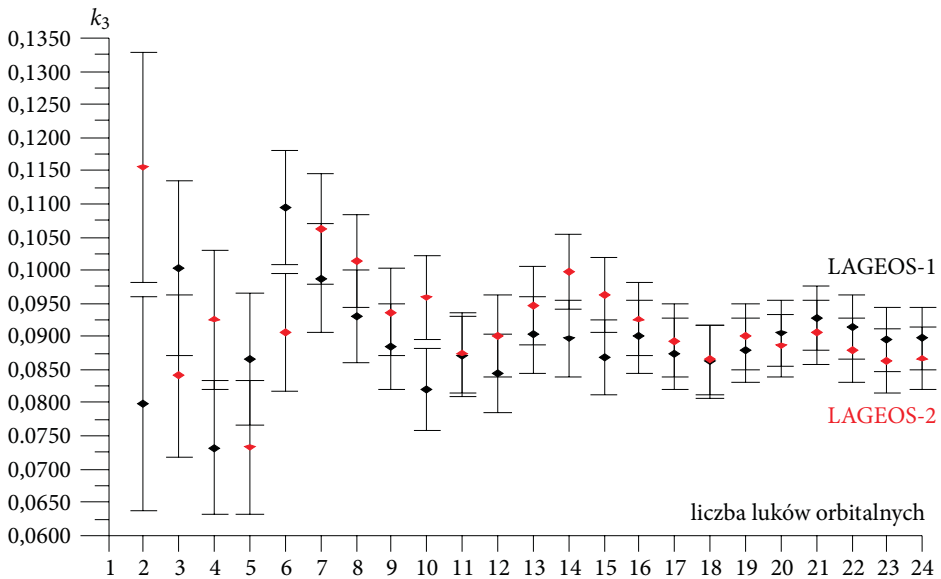
TABELA 5

Wartości współczynnika k_3 wyznaczone z danych LAGEOS-2

Liczba łuków orbitalnych	Wartość k_3 dane LAGEOS-2 1.01.2014-1.01.2016 (1)	Wartość k_3 dane LAGEOS-2 1.01.2005-1.01.2007 [25] (2)	Różnice (1)-(2)
1-2	0,1155 ± 0,0174	-0,0068 ± 0,0241	0,1087
1-3	0,0841 ± 0,0122	0,0837 ± 0,0192	0,0004
1-4	0,0926 ± 0,0105	0,0811 ± 0,0155	0,0115
1-5	0,0733 ± 0,0100	0,0964 ± 0,0138	-0,0231
1-6	0,0907 ± 0,0089	0,0555 ± 0,0118	0,0352
1-7	0,1062 ± 0,0084	0,0933 ± 0,0110	0,0129
1-8	0,1014 ± 0,0070	0,0831 ± 0,0107	0,0183
1-9	0,0936 ± 0,0066	0,0862 ± 0,0105	0,0074
1-10	0,0959 ± 0,0064	0,0876 ± 0,0103	0,0083
1-11	0,0875 ± 0,0061	0,0834 ± 0,0102	0,0041
1-12	0,0901 ± 0,0061	0,0832 ± 0,0101	0,0069
1-13	0,0947 ± 0,0059	0,0805 ± 0,0098	0,0142
1-14	0,0998 ± 0,0057	0,0626 ± 0,0094	0,0372
1-15	0,0963 ± 0,0056	0,0498 ± 0,0089	0,0465
1-16	0,0926 ± 0,0056	0,0472 ± 0,0084	0,0454
1-17	0,0893 ± 0,0055	0,0770 ± 0,0077	0,0123
1-18	0,0865 ± 0,0053	0,0682 ± 0,0065	0,0183
1-19	0,0900 ± 0,0049	0,0664 ± 0,0061	0,0236
1-20	0,0886 ± 0,0048	0,0869 ± 0,0057	0,0017
1-21	0,0907 ± 0,0048	0,0889 ± 0,0054	0,0018
1-22	0,0879 ± 0,0048	0,0774 ± 0,0053	0,0105
1-23	0,0864 ± 0,0048	0,0768 ± 0,0052	0,0096
1-24	wartość końcowa 0,0867 ± 0,0047	wartość końcowa 0,0810 ± 0,0051	0,0057



Rys. 1. Zmiany wartości liczby Love'a k_2 wyznaczonej z obserwacji satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 za okres 1.01.2014-1.01.2016. Ostateczna wartość współczynnika k_2 (dla połączonych 24 łuków orbitalnych) wynosi $0,29867 \pm 0,00010$ dla LAGEOS-1 oraz $0,29858 \pm 0,00010$ dla LAGEOS-2



Rys. 2. Zmiany wartości liczby Love'a k_3 wyznaczonej z obserwacji satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 za okres 1.01.2014-1.01.2016. Ostateczna wartość współczynnika k_3 (dla połączonych 24 łuków orbitalnych) wynosi $0,0898 \pm 0,0047$ dla LAGEOS-1 oraz $0,0867 \pm 0,0047$ dla LAGEOS-2

Wyznaczone wartości parametru k_2 z danych LAGEOS-1 i LAGEOS-2 są do siebie bardzo zbliżone, różnica wynosi 0,00009, co oznacza, że nie przekracza wartości błędu formalnego k_2 ($\pm 0,0001$). Mniejszą zbieżność wyznaczenia uzyskano dla parametru k_3 , gdzie różnica w wyznaczonych wartościach z danych LAGEOS-1 i LAGEOS-2 jest równa 0,0031, ale także nie przekracza wartości błędu formalnego k_3 ($\pm 0,0047$). Błąd wyznaczenia parametru k_3 jest około rząd wielkości większy od błędu wyznaczenia parametru k_2 . Podobne wartości błędów otrzymaliśmy w naszej poprzedniej pracy [25]. Uważamy, że większy błąd formalny parametru k_3 może być związany z faktem, że korekty współczynników geopotencjału dla pływów trzeciego stopnia są mniejsze o rząd wielkości w odniesieniu do korekt dla pływów drugiego stopnia, podobnie parametr k_3 ma mniejszą wartość i jest „gorzej wyznaczalny” niż parametr k_2 , co było ostatnio omawiane w pracy [11].

Rysunki 1 i 2 pokazują, że wartość parametrów k_2 i k_3 wyznaczona z dwóch łuków orbitalnych znacznie odbiega od ich wartości końcowych. Dołączanie do obliczeń kolejnych miesięcznych interwałów pozwala zauważyć powolną zbieżność wyznaczenia dążącą do podanych wartości końcowych. Proces zbieżności jest różny dla k_2 i k_3 . Najszybszą stabilizację wyznaczenia niewiadomej wynoszącą 19 miesięcy (połączonych 19 łuków orbitalnych) obserwuje się dla współczynnika k_2 , wyznaczonego zarówno z obserwacji LAGEOS-1, jak i LAGEOS-2, natomiast stabilizacja błędu średniego równa $\pm 0,00010$ zauważalna jest po połączeniu 22 łuków orbitalnych dla LAGEOS-1 i 21 dla LAGEOS-2. Powolniejszą stabilizację wyznaczanej niewiadomej uzyskujemy dla współczynnika k_3 , która następuje po połączeniu 23 łuków orbitalnych dla obu satelitów, a stabilizacja jego błędu średniego po połączeniu 19 łuków. Mając na uwadze stabilność wyznaczenia, należy przyjąć, że 24-miesięczny interwał czasowy jest minimalny do wyznaczania parametrów k_2 i k_3 .

Głównym celem tej pracy była ocena zmiany wartości parametrów k_2 i k_3 w funkcji czasu. W tym celu porównaliśmy dwa niezależne wyznaczenia — obecne dla interwału 1.01.2014-1.01.2016 i wcześniejsze dla interwału 1.01.2005-1.01.2007 [25]. W naszej poprzedniej i obecnej pracy przyjęliśmy tę samą strategię opracowania danych, wykorzystaliśmy obserwacje tych samych satelitów z interwału czasowego o tej samej długości, ale zastosowaliśmy bardziej aktualne modele sił, zgodne z wytycznymi zawartymi w IERS TN 36 [23], np. model pola grawitacyjnego, model pływów, model refrakcji troposferycznej. Niektóre stacje obserwacyjne przyjęte w poprzedniej analizie [25] przestały wykonywać obserwacje, wymusiło to włączenie do niniejszej pracy innych stacji, zapewniających poprawną geometrię rozwiązania. Także współrzędne wszystkich przyjętych stacji obserwacyjnych zostały wyrażone w aktualnym systemie odniesienia ITRF2014 [1]. Mogło mieć to niewielki wpływ na uzyskane wartości k_2 i k_3 oraz błędów formalnych.

Różnice w uzyskanych wartościach końcowych dla dwóch niezależnych wyznaczeń za okresy 1.01.2005-1.01.2007 i 1.01.2014-1.01.2016 wynoszą odpowiednio

-0,00293 (1%) dla k_2 i -0,0091 (10%) dla k_3 dla LAGEOS-1 oraz -0,00202 (0,7%) dla k_2 i 0,0057 (7%) dla k_3 dla LAGEOS-2.

Różnice te są znacznie większe niż otrzymaliśmy dla parametrów pływowych h_2 , l_2 związanych z ruchem stacji obserwacyjnych wywołanym działaniem sił pływowych [12]. Analizowaliśmy tam przedziały czasu: 1.01.2005-1.01.2007 i 1.01.2014-1.01.2016, różnice w wartościach h_2 i l_2 wyniosły odpowiednio -0,0007 (0,1%) dla h_2 i -0,0003 (0,3%) dla l_2 dla LAGEOS-1 oraz -0,0005 (0,1%) dla h_2 i 0,0002 (0,2%) dla l_2 dla LAGEOS-2 i nie przekraczają wartości błędów średnich wyznaczonych parametrów [12]. Otrzymane różnice w wartościach k_2 i k_3 mogą świadczyć o ich ewolucji w czasie. Można to tłumaczyć tym, że w analizowanym okresie występowały lokalne zmiany potencjału wywołane czynnikami dynamicznymi. Potencjał pływowy i potencjał deformacyjny, za pomocą których wyrażana jest liczba Love'a k (równanie 1), mają bezpośredni wpływ na orbitę satelity, powodując jej perturbację. Dlatego też widoczna jest zmiana wartości parametrów k_2 i k_3 . Aby potwierdzić ten trend, należy w przyszłości wykonać kolejne wyznaczenie dla nowego interwału czasu. Zmianę wartości w czasie parametru k_2 może także sugerować wyznaczenie wykonane pod przewodnictwem B. Wu [32]. Wykonali oni wyznaczenie parametru k_2 z 16 lat danych SLR LAGEOS-1 i 5 lat danych SLR LAGEOS-2. Otrzymali wartość $k_2 = 0,3017$, różni się ona o 0,0001 (dane LAGEOS-1) i o 0,0011 (dane LAGEOS-2) od naszego poprzedniego wyznaczenia [25] oraz o 0,00303 (dane LAGEOS-1) i o 0,00312 (dane LAGEOS-2) od wyznaczenia prezentowanego w tej pracy. Ze względu na to, że w tych trzech rozwiązaniach wykorzystano różne przedziały czasowe oraz różne metody wyznaczenia, a także inne modele sił i układy odniesienia, może mieć to wpływ na uzyskane wartości parametrów k_2 i k_3 , dlatego też trudno o ich jednoznaczną ocenę.

Wyniki przedstawione w tabelach 2-5 nie wskazują na wystąpienie systematycznych różnic pomiędzy naszą wcześniejszą [25] i obecną pracą. Podobny wniosek wyciągnięto w pracy [12] odnośnie do parametrów h_2 i l_2 .

Porównując wartości parametrów k_2 i k_3 uzyskane w niniejszej pracy do ich wartości nominalnych podanych w IERS TN36, widać ich większą zgodność niż wartości uzyskanych w interwale 1.01.2005-1.01.2007 [25]. Otrzymane wartości różnią się od wartości nominalnych k_2 i k_3 odpowiednio o 0,00342 (1%) i -0,0032 (3%) dla LAGEOS-1 oraz 0,00333 (1%) i -0,0063 (7%) dla LAGEOS-2. Także z analizy trzech niezależnych wyznaczeń z danych SLR: Wu i inni [32], Rutkowska i Jagoda [25] i obecnego widać, że parametr k_2 „zbliża” się do wartości nominalnej przyjętej w IERS TN36.

Praca naukowa finansowana ze środków na działalność statutową Katedry Geodezji Politechniki Koszalińskiej.

Artykuł wpłynął do redakcji 26.06.2017 r. Zweryfikowaną wersję po recenzjach otrzymano 21.09.2017 r.

LIRETATURA

- [1] ALTAMIMI Z., REBISCHUNG P., MÉTIVIER L., COLLILIEUX X., *ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions*, Journal of Geophysical Research, vol. 121, Issue 8, 2016, DOI: 10.1002/2016JB013098.
- [2] BIZOUARD C., LAMBERT S., BECKER O., RICHARD J.Y., *Combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2014*, IERS Earth Orientation Product Centre, Observatoire de Paris, France, 2017.
- [3] CZARNECKI K., *Geodezja współczesna w zarysie*, Wydawnictwo Wiedza i Życie, Warszawa, 1994.
- [4] DEHANT V., *Tidal parameters for an elastic Earth*, Phys. Earth Planet. Inter. 49, Issues 1-2, 1987, 97-116.
- [5] EANES R.J., SHUTZ B., TAPLEY B., *Earth and ocean tide effects on LAGEOS and STARLETTE*, [in:] Proceedings of the Ninth International Symposium on Earth Tides. Kuo J.T (ed.) E. Sckweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart, 1983.
- [6] FARRELL W.E., *Deformation of the Earth by surface loads*, Rev. Geoph. Space Phys., vol. 10, 1972, 761-797, DOI: 10.1029/RG010i003p00761.
- [7] FOLKNER W.M., CHARLOT P., FINGER M.H., WILLIAMS J.G., SOVERS O.J., NEWHALL X.X., STANDISH E.M. JR., *Determination of the extragalactic-planetary frame tie from joint analysis of radio interferometric and lunar laser ranging measurements*, Astron. Astrophys., 287, 1, 1994, 279-289.
- [8] GREFF-LEFFTZ M., MÉTIVIER L., LEGROS H., *Analytical solutions of Love numbers for a hydrostatic ellipsoidal incompressible homogeneous Earth*, Celestial Mechanics and Dynamical Astronomy, vol. 93, 2005, DOI 10.1007/s10569-005-6424-3.
- [9] JAGODA M., RUTKOWSKA M., *Estimation of the Love and Shida numbers: h_2 , l_2 using SLR data for the low satellites*, Adv. Space Res., 52, 4, 2013, 633-638, DOI: 10.1016/j.asr.2013.04.018.
- [10] JAGODA M., RUTKOWSKA M., KRASZEWSKA K., *The evaluation of time variability of tidal parameters h and l using SLR technique*, Acta Geodynamica et Geomaterialia, vol. 14, no. 2, 2016a, 153-158, DOI: 10.13168/AGG.2016.0036.
- [11] JAGODA M., RUTKOWSKA M., *Estimation of the Love numbers: k_2 , k_3 using SLR data of the LAGEOS1, LAGEOS2, STELLA and STARLETTE satellites*, Acta Geod. Geophys., 51, no. 3, 2016b, 493-504, DOI 10.1007/s40328-015-0139-z.
- [12] JAGODA M., RUTKOWSKA M., KRASZEWSKA K., *Ocena zmiany w czasie współczynników h_2 i l_2 na podstawie danych z satelitów LAGEOS*, monografia Wybrane prace naukowe zespołów badawczych prowadzone na kierunku Geodezja i Kartografia, 2016, ISBN 9788373654419, 2016c.
- [13] KAULA W.M., *Elastic models of the mantle corresponding to variations in the external gravity field*, Journal of Geophysical Research, vol. 68, Issue 17, 1963, 4967-4978, DOI: 10.1029/JZ068i017p04967.
- [14] KOLACZEK B., SCHUH H., GAMBIS D. (eds.), *High frequency to subseasonal variations in Earth Rotation*, IERS Technical Note, no. 28, Paris: Central Bureau of IERS — Observatoire de Paris, 2000.
- [15] LEJBA P., SCHILLAK S., *Determination of station positions and velocities from laser ranging observations to Ajisai, Starlette and Stella satellites*, Adv. Space Res., 47, 4, 2011, 654-662, DOI: 10.1016/j.asr.2010.10.013.
- [16] LONGMAN I.M., *Computation of Love numbers and load deformation coefficients for a model Earth*, Geophysical Journal of the Royal Astronomical Society, vol. 11, Issue 1, 1996, 133-137, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1966.tb03495.x.
- [17] LOVE A.E.H., *Some problems of geodynamics*, Cambridge University Press, USA, 1911.

- [18] MATHEWS P.M., BUFFETT B.A., SHAPIRO I.I., *Love numbers for a rotating spheroidal Earth: New definitions and numerical values*, Geophysical Research Letters, vol. 22, Issue 5, 1995, 579-582, DOI: 10.1029/95GL00161.
- [19] LYARD F., LEFEVRE F., LETELLIER T., FRANCIS O., *Modelling the global ocean tides: modern insights from FES2004*. Ocean Dynam., 56, 5, 2006, 394-415, DOI: 10.1007/s10236-006-0086-x.
- [20] MCCARTHY J.J., ROWTON S., MOORE D., PAVLIS D.E., LUTHCKE S.B., TSAOUSSI L.S., *GEODYN II System Operation Manual, 1-5*, STX System Corp. Lanham MD 20706, USA, 1993.
- [21] MENDES V.B., PAVLIS E.C., *High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths*, Geophys. Res. Lett., 31, L14602, 2004, DOI: 10.1029/2004GL020308.
- [22] PAVLIS N.K., HOLMES S.A., KENYON S.C., FACTOR J.K., *The development and evaluation of the Earth Gravitational Model 2008 (EGM2008)*, J. Geophys. Res. 117, B4, B04406, 2012, 1-38, DOI: 10.1029/2011JB008916.
- [23] PETIT G., LUZUM B., *IERS Conventions. IERS Technical Note No. 36*, Verlag des Bundesamts fuer Kartographie und Geodaesie, Frankfurt an Main, 2010.
- [24] RUTKOWSKA M., *Wpływ poprawek ze względu na pływy ziemskie i oceaniczne na dokładność wyznaczania orbit sztucznych satelitów Ziemi*, rozprawa doktorska, Instytut Geodezji i Kartografii, Warszawa, 1993.
- [25] RUTKOWSKA M., JAGODA M., *Estimation of the elastic Earth parameters k_2 and k_3 from the SLR technique*, Proceedings of the 16th International Workshop on Laser Ranging. SLR — the Next Generation, vol. 1, 2009.
- [26] RUTKOWSKA M., JAGODA M., *Estimation of the elastic Earth parameters (h_2 , l_2) using SLR data*, Adv. Space Res., 46, 7, 2010, 859-871, DOI: 10.1016/j.asr.2010.04.010.
- [27] SHIDA T., MATSUYAMA M., *Note of Hecker's observations of horizontal pendulums*, Kyoto Imperial University, Kyoto, 1912.
- [28] SOŚNICA K., THALLER D., JÄGGI A., DACH R., BEUTLER G., *Sensitivity of Lageos orbits to global gravity field models*, Artificial Satellites, 47, 2, 2012, 47-65, DOI: 10.2478/v10018-012-0013-y.
- [29] SOŚNICA K., *LAGEOS Sensitivity to ocean tides*, Acta Geophysica, vol. 63, Issue 4, 2014, 1181-1203, DOI: 10.1515/acgeo-2015-0032.
- [30] SOŚNICA K., JÄGGI A., THALLER D., BEUTLER G., DACH R., *Contribution of Starlette, Stella, and Ajisai to the SLR-derived global reference frame*, J. Geodesy, 88, 8, 2014, 789-804, DOI: 10.1007/s00190-014-0722-z.
- [31] WAHR J.M., *Body tides on an elliptical, rotating, elastic and oceanless Earth*, Geophysical Journal International, vol. 64, Issue 3, 1981, 677-703, DOI: 10.1111/j.1365-246X.1981.tb02690.x.
- [32] WU B., BIBO P., ZHU Y., HSU H., *Determination of Love numbers using Satellite Laser Ranging*, J. Geodetic Society of Japan, 47, 1, 2001, 174-180, DOI: 10.11366/sokuchi1954.47.174.

M. JAGODA, M. RUTKOWSKA, K. KRASZEWSKA

Evaluation of time change of the Love k_2 and k_3 numbers using LAGEOS SLR data

Abstract. In this paper, we present the estimated Love numbers for degree 2 and 3 (k_2 and k_3). The determination was based on the Satellite Laser Ranging (SLR) data of LAGEOS-1 and LAGEOS-2 satellites obtained within the period of January 1, 2014 until January 1, 2016. The results were compared with our previous determination of these parameters for the period from January 1, 2005 until January 1, 2007 to examine whether any systematic differences and time evolution occur. The adjusted values for the k_2 and k_3 parameters are, 0.29867 ± 0.0001 and 0.0898 ± 0.0047 (LAGEOS-1 data), respectively

and 0.29858 ± 0.0001 and 0.0867 ± 0.0047 (LAGEOS-2 data). The discrepancies between the k_2 and k_3 values obtained in our previous paper [25] and this analysis are: -0.00293 (LAGEOS-1 data) and -0.00202 (LAGEOS-2 data) for k_2 and -0.0091 (LAGEOS-1 data) and 0.0057 (LAGEOS-2 data) for k_3 . The obtained discrepancies in the k_2 and k_3 values may indicate their change over time.

Keywords: tides, Love numbers, SLR, LAGEOS-1, LAGEOS-2

DOI: 10.5604/01.3001.0010.5393