



Porównanie wyników wyznaczania współrzędnych technikami GPS i SLR

STANISŁAW SCHILLAK, MAREK LEHMANN

Centrum Badań Kosmicznych PAN, Obserwatorium Astrogeodynamiczne,
Borowiec, ul. Drapałka 4, 62-035 Kórnik

Streszczenie. Przedstawiono wyniki porównania współrzędnych stacji dla dwóch technik satelitarnych: laserowej i GPS. Współrzędne były wyznaczane dla wspólnych momentów w układzie współrzędnych ITRF2005. Porównanie wykonano dla wszystkich stacji wyposażonych w systemy SLR i GPS w okresie jedenastu lat od 1993.0 do 2004.0 bez uwzględnienia stacji laserowych, które zmieniły system w tym czasie. W sumie obliczenia wykonano dla 12 stacji. Współrzędne zostały obliczone dla okresów miesięcznych dla pierwszego dnia każdego miesiąca. Analiza wyników obejmowała ocenę stabilności pozycji stacji, różnice z ITRF2005, porównanie prędkości stacji dla obu technik. Prędkości porównano także z modelem ruchu płyt tektonicznych NNR-NUVEL1A i ITRF2005. Stwierdzono dobrą zgodność pozycji i prędkości stacji dla obu technik. Dla kilku stacji występują znaczne (1-3 cm) różnice w składowej pionowej.

Słowa kluczowe: geodezja i kartografia, geodynamika, obserwacje laserowe, GPS, wyznaczanie współrzędnych stacji technikami SLR i GPS

Symbole UKD: 528

1. Wstęp

Wyznaczanie pozycji i prędkości stacji obserwacyjnych jest realizowane w trybie ciągłym przez kilka technik kosmicznych: globalny system lokalizacyjny (GPS), satelitarne pomiary laserowe (SLR), interferometrię długich baz (VLBI) i francuski system dopplerowski DORIS. Wyniki tych pomiarów od wielu lat są podstawą do tworzenia międzynarodowych układów odniesienia (ITRF). Dążenie do unifikacji metod, modeli, parametrów jest jednym z głównych zadań utworzonego przez Międzynarodową Asocjację Geodezyjną (IAG) programu Global Geodetic Observing System (GGOS), przewidzianego do realizacji w ciągu najbliższych 10 lat.

Dotychczasowe porównanie technik pomiarowych oparte o globalne średnie wyniki, tak jak jest to przedstawione w kolejnych rozwiązaniach ITRF [1, 2], nie pozwalają na szczegółową analizę różnic pomiędzy technikami. Dla dokładniejszej oceny tych różnic należy porównywać między sobą wyniki uzyskane dla tego samego systemu odniesienia (ITRS), dla tych samych punktów pomiarowych, dla tej samej epoki odniesienia i o ile to możliwe dla tych samych modeli i parametrów. Takie porównanie powinno obejmować dłuższy okres, przynajmniej 5 lat, co jest szczególnie istotne przy wyznaczaniu prędkości stacji. Cel, który należy osiągnąć w najbliższych latach, jest uzyskanie globalnej dokładności pozycji stacji na poziomie 1 mm i prędkości 0,1 mm/rok. Bezpośrednie porównanie wyników dla różnych technik pomiarowych umożliwia wykrywanie i eliminację błędów systematycznych poszczególnych technik i stacji pomiarowych. Warunkiem uzyskania dobrego porównania jest poprawna transformacja wyników do wspólnego układu odniesienia, dokładne dowiązanie pomiędzy punktami odniesienia poszczególnych technik w danej placówce obserwacyjnej, długie ciągi obserwacyjne i wysoka jakość pomiarów każdej techniki pomiarowej. Celem tej pracy jest porównanie wyników wyznaczania pozycji i prędkości stacji uzyskanych z dwóch całkowicie różnych technik satelitarnych, SLR i GPS. Do analizy wykorzystano tylko te stacje, które prowadziły równocześnie pomiary SLR i GPS w ciągu kilku lat. Wybrano okres jedenastu lat od 1993.0 do 2004.0, w którym obserwacje techniką SLR i GPS prowadziło 12 stacji. Nie brano pod uwagę stacji laserowych, które zmieniły system laserowy w badanym okresie. Praca jest kontynuacją pracy przedstawionej na konferencji COSPAR2008 w Montrealu [3], wówczas zaprezentowano wyniki dla okresu 1999.0-2004.0 i jednym z wniosków była konieczność rozszerzenia okresu pomiarowego.

2. Dane SLR i GPS

2.1. Dane SLR

Wyniki obserwacji laserowych zostały pobrane z banku danych Eurolas Data Center (EDC) w postaci dwuminutowych punktów normalnych [4]. Do wyznaczania współrzędnych stacji wykorzystano wyłącznie wyniki obserwacji satelitów geodynamicznych LAGEOS-1 i LAGEOS-2 [5] (rys. 1).

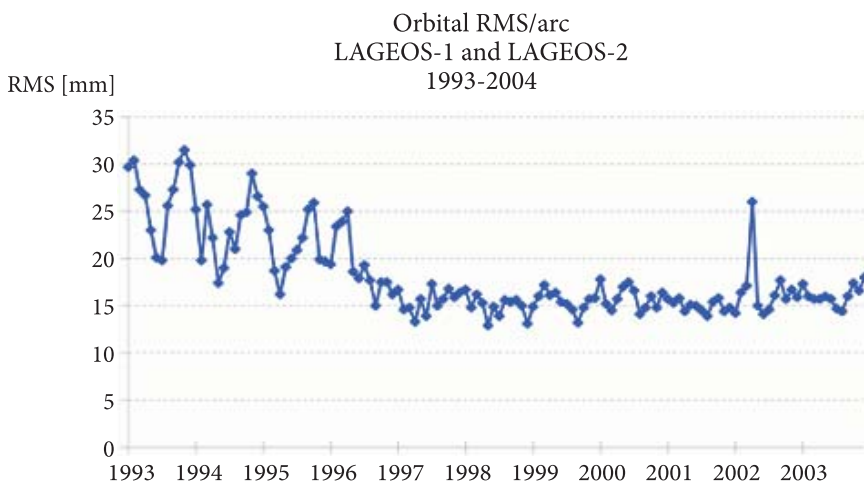
Do obliczania orbit użyto programu orbitalnego NASA GEODYN-II [6]. Równania normalne obliczano oddzielnie dla każdego satelity dla identycznych łuków miesięcznych. Odrzucono punkty przekraczające kryterium 5 sigma dla danej stacji i położone poniżej 10 stopni nad horyzontem. Odrzucono także przeloty, dla których odchylenie systematyczne przekraczało 2,5 sigma z odchyłeń systematycznych w danym miesiącu. Do wyznaczania orbit jako stacje odniesienia wybrano w każdym roku 15-16 stacji, które charakteryzowały się najwyższą dokładnością,

dużą ilością punktów normalnych i ciągłością obserwacji. Około 10 stacji było wspólnych w okresie 11 lat, pozostałe stacje dobierano w zależności od wyników obserwacji w danym roku. Współrzędne stacji wyznaczano z równań normalnych obu satelitów, w każdym łuku dla jednej stacji, współrzędne pozostałych stacji były w układzie ITRF2005 [7]. Współrzędne stacji wyznaczano na pierwszy dzień każdego miesiąca. Zastosowane w programie GEODYN-II główne parametry i modele zostały przedstawione w tabeli 1.



Rys. 1. Satelita LAGEOS

Na rysunku 2 przedstawiono orbitalne RMS każdego łuku miesięcznego. Widoczna jest istotna poprawa jakości obserwacji poczynając od roku 1996, jest ona wynikiem istotnych zmian aparaturowych najlepszych stacji laserowych. Widoczne istotne pogorszenie RMS w kwietniu 2002 było wynikiem uderzenia mikrometeorytu

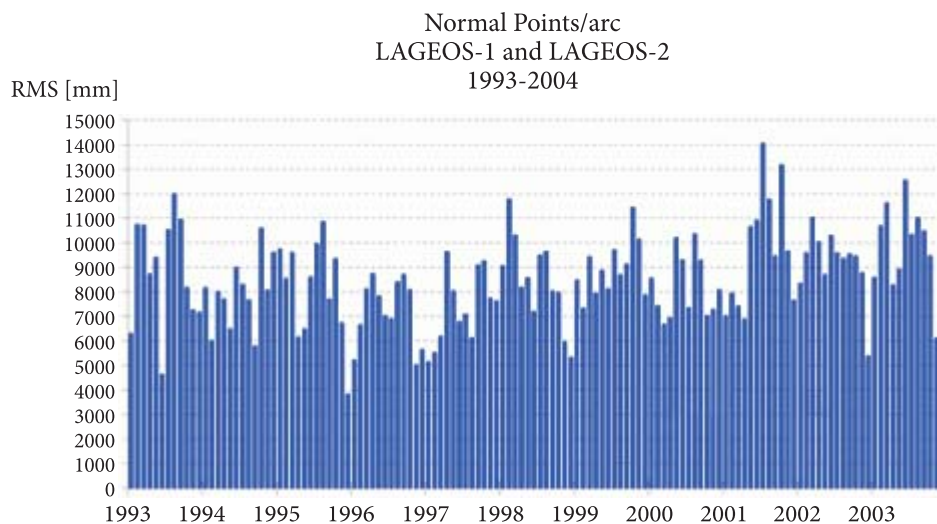


Rys. 2. Orbitalne RMS dla satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 dla miesięcznych łuków orbitalnych

Parametry i modele programu GEODYN-II

Model sił	
Model ziemskiego pola grawitacyjnego	EIGEN GRACE02S; 20×20 [8]
Model pływów Ziemi i oceanów	EGM96 [9]
Grawitacja Księżyca, Słońca i planet	DE200 [10]
Ciśnienie promieniowania słonecznego	$C_R = 1,14$
Albedo Ziemi	$k_2 = 0,3, k_3 = 0,093, \text{faza } k_2 = 0,0$
Dynamiczny ruch bieguna	
Poprawki relatywistyczne	
Opór termiczny Yarkowskiego	
Stałe	
GM	$3,986004415 \times 10^{14} \text{ m}^3/\text{s}^2$
Wielka półoś Ziemi	6378,1363 km
Odwrotność spłaszczenia Ziemi	298,2564
Prędkość światła	299792,458 km/s
Układ odniesienia	
Współrzędne i prędkości stacji	ITRF2005 [7]
Ruch bieguna i UT1	IERS C04 co 1 dzień
Pływy	Model Love H2 = 0,609, L2 = 0,0852
Pływy bieguna	
Precesja	IAU 1976
Nutacja	IAU 1980
Model pomiarowy	
Satelity	LAGEOS-1 i LAGEOS-2
Poprawka centrum masy	25,1 cm
Przekrój poprzeczny	$0,2827 \text{ m}^2$
Masa	406,965 kg (LAGEOS-1), 405,38 kg (LAGEOS-2)
Poprawka troposferyczna	model Marini/Murray [11]
Długość fali lasera	532,0 nm, 423,0 nm
Ilość stacji dla wyznaczenia orbit	15-16
Wyznaczane parametry	
Wektor satelity	6 parametrów
Geocentryczne współrzędne stacji	3 parametry
Przyspieszenie satelity; wzdłuż i w poprzek trajektorii i wzdłuż promienia	9 parametrów co 5 dni
Całkowanie numeryczne	
Metoda	Cowell
Długość łuku	1 miesiąc
Krok całkowania	120 s

w satelitę LAGEOS-1, które nastąpiło 5 kwietnia 2002 r. nad Pacyfikiem [12]. Na rysunku 3 przedstawiono ilość punktów normalnych, z których wyznaczano miesięczną orbitę. Widoczne jest znaczne obniżenie ilości punktów w okresie zimowym.



Rys. 3. Ilość punktów normalnych satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 dla miesięcznych łuków orbitalnych

2.2. Dane GPS

Współrzędne geocentryczne GPS w systemie ITRS2005 za okres 1993.0-2004.0 w postaci dobowych serii czasowych na epokę 2007.0 uzyskano od dr. Michaela Heflina z JPL/NASA. Układ odniesienia ITRF2005 był realizowany na każdy dzień poprzez zastosowanie siedmioparametrowej transformacji Helmerta. Transformacja do epoki 2000.0 (epoka ITRF2005) była przeprowadzona za pomocą prędkości stacji podanych dla każdej stacji przez JPL NASA. Jako wspólny punkt odniesienia dla SLR i GPS wybrano punkt odniesienia stacji laserowej (przecięcie osi obrotu teleskopu). Dowiązanie współrzędnych geocentrycznych ΔX , ΔY , ΔZ pomiędzy punktem odniesienia GPS a SLR dla danej stacji pobrano z ITRF2005 [7]. Współrzędne wyznaczano tak samo jak w przypadku SLR na epokę pierwszego dnia każdego miesiąca.

2.3. Wyniki dla obu technik

Z listy współrzędnych SLR i GPS wybrano tylko te, które miały wspólną epokę. Stąd z maksymalnej ilości 132 punktów, które można wyznaczyć w okresie 11 lat, wspólnych punktów jest znacznie mniej (tab. 2). Niektóre stacje, szczególnie Pekin, mają mało wspólnych punktów ze względu na późniejsze rozpoczęcie obserwacji GPS (Pekin

od 2000 r.). Ostatnia kolumna zawiera czas trwania wspólnych obserwacji, od pierwszej do ostatniej, szczególnie istotny dla wyznaczania prędkości stacji. Z wyjątkiem Pekinu czas ten wyniósł około 8 lat, co jest całkowicie wystarczające dla wyznaczenia dokładnej prędkości stacji. Stacja Arequipa z powodu zmiany współrzędnych w wyniku trzęsienia ziemi w czerwcu 2001 r. ma podane dwa zestawy danych, przed trzęsieniem i po. Uśrednione wyniki są podawane dla okresu przed trzęsieniem.

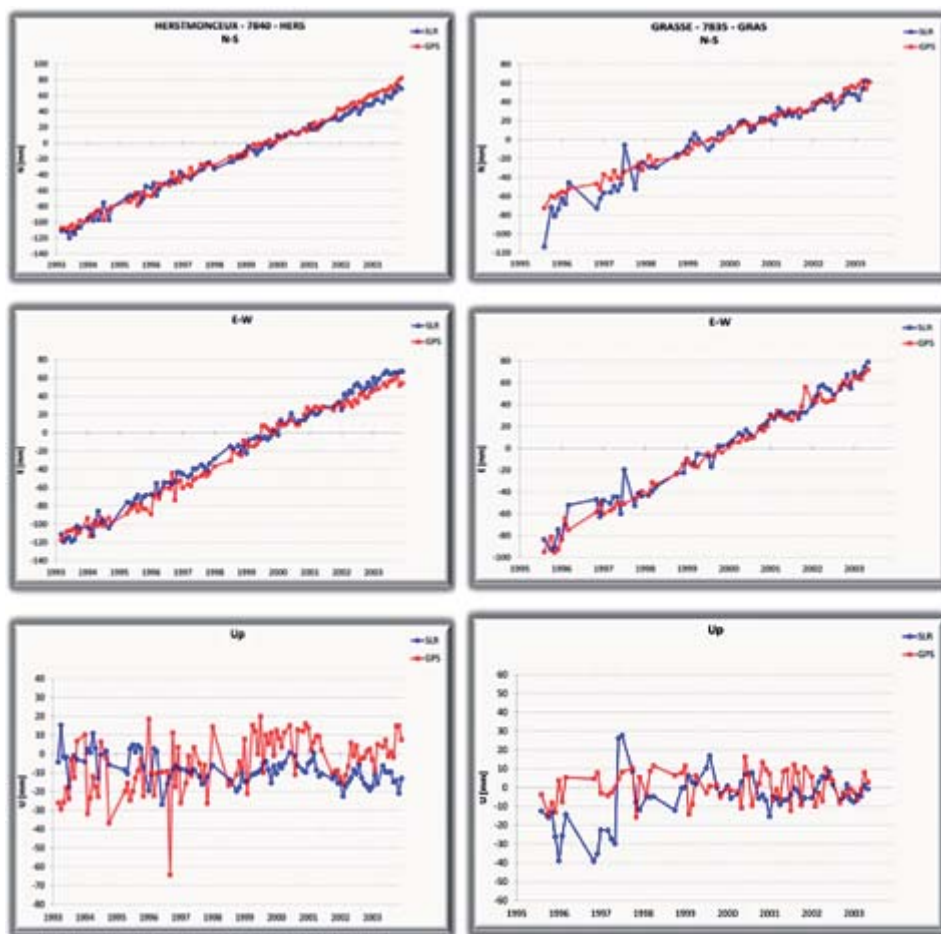
TABELA 2

Lista stacji SLR-GPS w okresie 1993.0-2004.0

STACJA	SLR	GPS	ILOŚĆ WSPÓLNYCH PUNKTÓW	OKRES (miesiące)
McDonald	7080	MDO1	111	125
Yarragadee	7090	YAR1	109	131
Monument Peak	7110	MONP	76	109
Pekin	7249	BJFS	34	45
Arequipa	7403	AREQ	56/14	87/30
Borowiec	7811	BOR1	96	111
Grasse	7835	GRAS	68	94
Poczdham	7836	POTS	96	110
Szanghaj	7837	SHAO	67	99
Graz	7839	GRAZ	116	132
Herstmonceux	7840	HERS	102	130
Wettzell	8834	WTZR	79	94

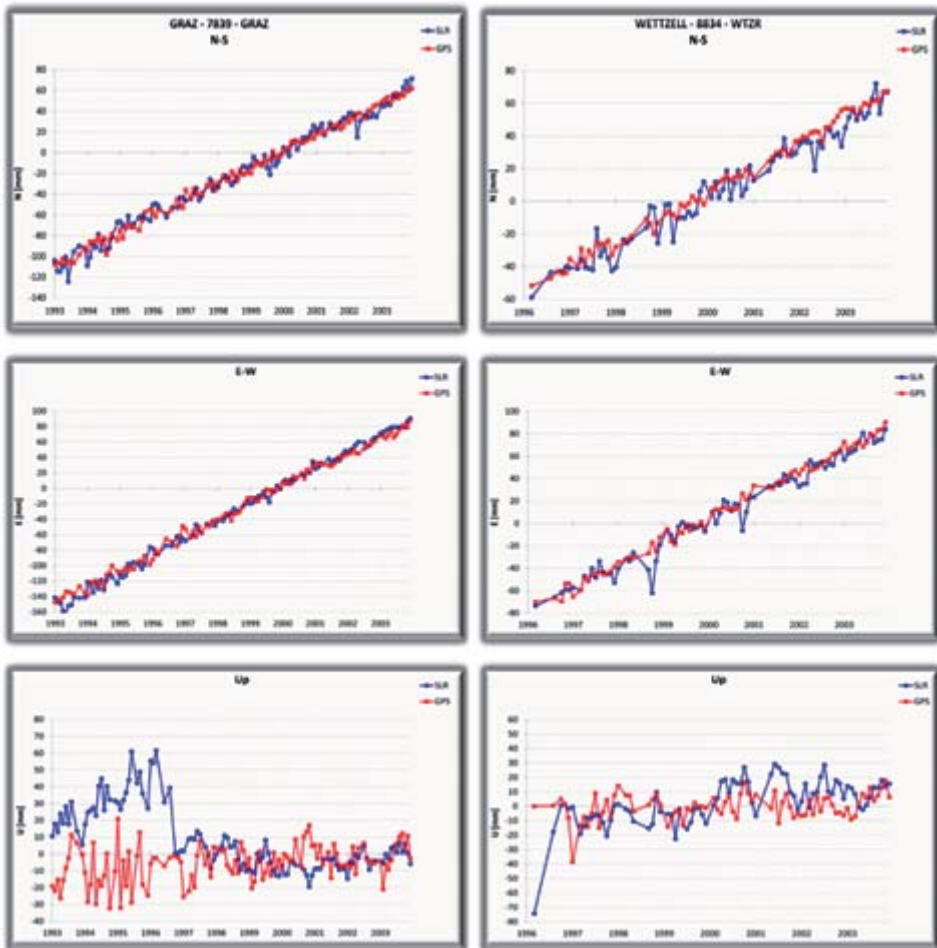
3. Wyniki wyznaczania pozycji i prędkości stacji

Obliczone współrzędne geocentryczne SLR i GPS na pierwszy dzień każdego miesiąca przetransformowano do współrzędnych topocentrycznych w postaci odchyłeń od ITRF2005 w kierunku północ-południe (N-S), wschód-zachód (E-W) i w pionie (U) [13]. Wyniki dla wszystkich stacji zamieszczono na rysunkach 4-9. Stacje zostały zgrupowane wg odległości, tak aby spodziewane prędkości w wyniku ruchu płyt tektonicznych były zbliżone: Herstmonceux (Wlk. Brytania) — Grasse (Francja), Graz (Austria) — Wettzell (Niemcy), Poczdham (Niemcy) — Borowiec (Polska), Szanghaj — Pekin (Chiny), pozostałe stacje leżą na różnych płytach Yarragadee (zach. Australia), Monument Peak (płd. Kalifornia), McDonald (Teksas), Arequipa (Peru).



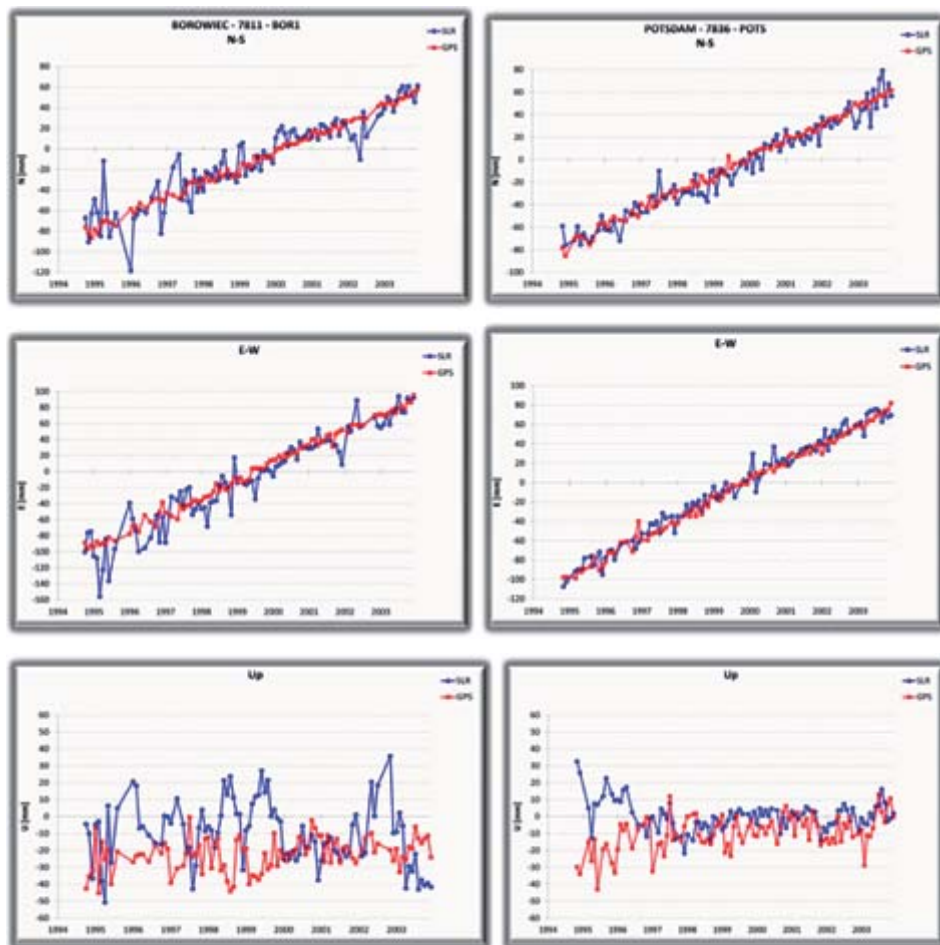
Rys. 4. Współrzędne topocentryczne stacji Herstmonceux i Grasse

Prędkość stacji jest określona przez nachylenie zmian współrzędnych. Zgodnie z modelem ruchu płyt tektonicznych nie obserwuje się zmian pozycji stacji w składowej pionowej. Kilka stacji wykazuje znaczne (do 3 cm) różnice pomiędzy wynikami SLR i GPS dla składowej pionowej, szczególnie ważne są niezgodności dla obu stacji NASA typu Moblas (Moblas-4, Monument Peak i Molas-5, Yarragadee). Obie stacje mają zasadnicze znaczenie w wyznaczaniu orbit z obserwacji laserowych. Dla kilku stacji widoczne są odchylenia systematyczne w składowej pionowej (Borowiec, Graz, Grasse, McDonald). Większość błędów systematycznych, tak dla SLR, jak i dla GPS, występuje w pionie, ponieważ jest to podstawowy kierunek obserwacji. Duże błędy są dla stacji Pekin dla wszystkich składowych, lecz zgodność prędkości ze stacją w Szanghaju jest zupełnie zadowalająca. Dla

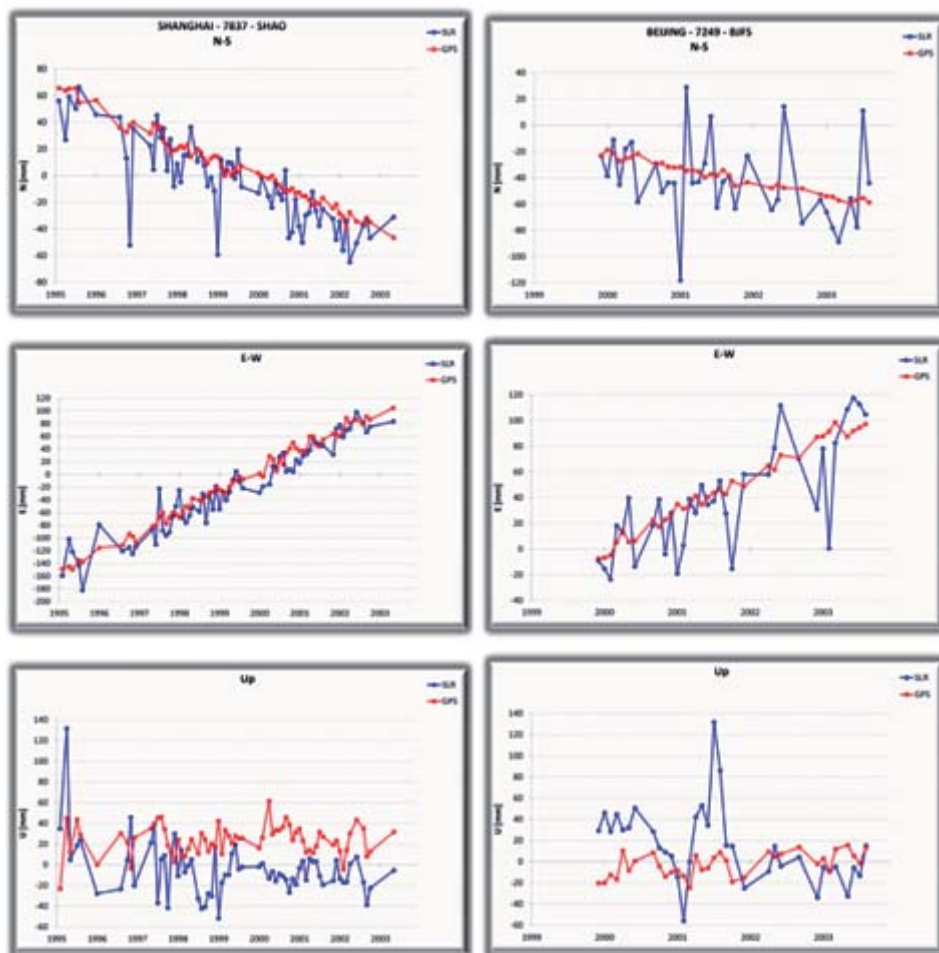


Rys. 5. Współrzędne topocentryczne stacji Graz i Wettzell

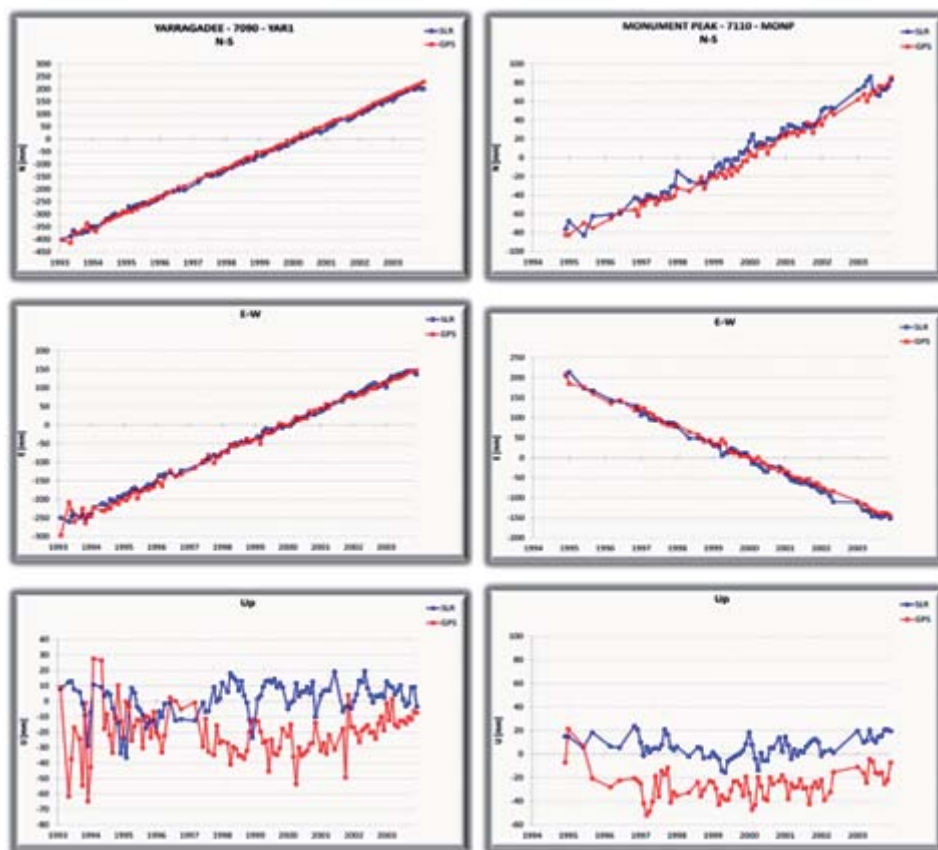
stacji Arequipa widoczny jest skok we współrzędnych horyzontalnych w wyniku trzęsienia ziemi i bardzo dobra zgodność wyników SLR i GPS, brak jest skoku w składowej pionowej, jednak można zauważyć w tej składowej zmianę wysokości dla obu technik tuż przed trzęsieniem ziemi.



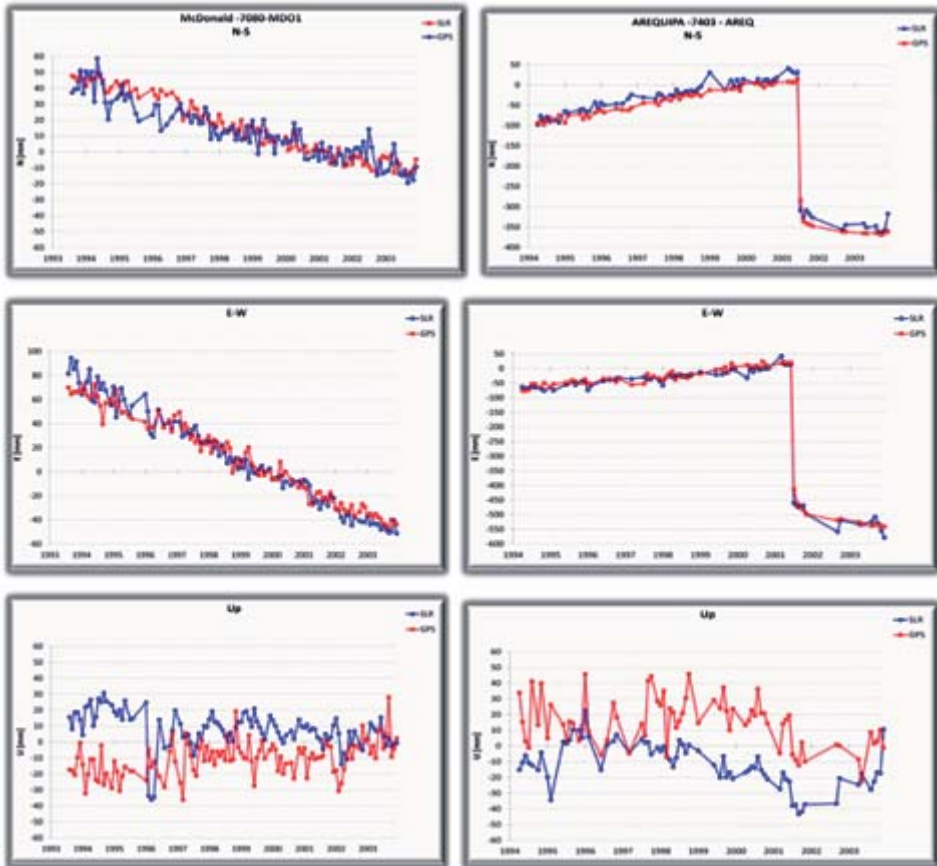
Rys. 6. Współrzędne topocentryczne stacji Borowiec i Potsdam



Rys. 7. Współrzędne topocentryczne stacji Szanghaj i Pekin



Rys. 8. Współrzędne topocentryczne stacji Yarragadee i Monument Peak

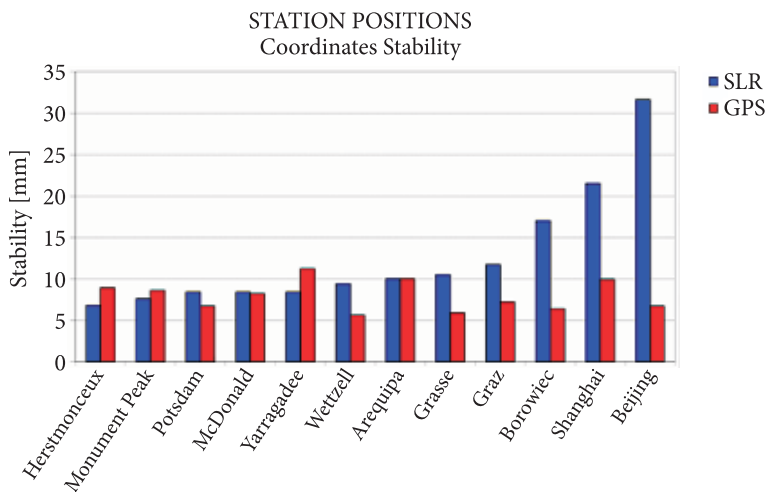


Rys. 9. Współrzędne topocentryczne stacji McDonald i Arequipa

4. Ocena pozycji stacji

Jakość wyznaczanej pozycji stacji można ocenić na podstawie zmian wyznaczonych współrzędnych. Zmiana pozycji stacji wyznaczonej na przyjętą epokę poprzez uwzględnienie prędkości stacji powinna być dla większości stacji bardzo mała. Im mniejsze średnie kwadratowe odchylenie od średniej pozycji w czasie badanego okresu kilku lat tym dokładniejsze wyniki wyznaczania współrzędnych. Wyniki stabilności pozycji stacji dla okresu podanego w tabeli 2 przedstawiono na rysunku 10, najlepsze stacje mają stabilność na poziomie 7 mm. Dla stacji laserowych w przeciwieństwie do GPS widoczna jest duża różnica w stabilności stacji dochodząca nawet do 3 cm. Wynika to z błędów pomiarowych stacji laserowych.

W tabeli 3 przedstawiono różnice średnich współrzędnych pomiędzy wynikami SLR i GPS dla okresu podanego w tabeli 2 dla poszczególnych stacji. Przedstawiono



Rys. 10. Stabilność pozycji stacji SLR i GPS 1993.0-2004.0

także różnice podane w ITRF2005 [7]. Szczególnie istotne różnice przekraczające 10 mm są dla obu stacji MOBLAS (Yarragadee i Monument Peak), Arequipy, Szanghaju i Pekinu. We wszystkich przypadkach dotyczy to wpływu składowej pionowej. Z wyjątkiem Pekinu nie potwierdza tych wyników rozwiązanie ITRF2005. Różnice pomiędzy wynikami tej pracy a ITRF2005 wynikają z nieco innego okresu uśredniania danych, szczególnie dla Arequipy, różnic w opracowaniu wyników i innych kryteriów odrzucania punktów. W tabeli 3 zamieszczono także stabilność współrzędnych dla poszczególnych stacji.

TABELA 3

Średnie różnice SLR-GPS i stabilność wyznaczanych współrzędnych (3D)

STACJA	SLR-GPS [mm]	SLR-GPS ITRF2005 [mm]	STABILNOŚĆ [mm]	
			SLR	GPS
McDonald	10,3	5,3	8,4	8,2
Yarragadee	13,1	8,5	8,4	11,2
Monument Peak	18,8	8,7	7,6	8,6
Pekin	13,4	13,7	31,6	6,7
Arequipa	18,6	2,9	10,0	10,0
Borowiec	7,0	15,8	17,0	6,4
Grasse	4,4	3,7	10,5	5,9
Poczdami	6,0	4,2	8,4	6,7

cd. tabeli 3

Szanghaj	18,1	9,5	21,5	9,9
Graz	7,4	2,9	11,7	7,2
Herstmonceux	4,1	11,3	6,8	8,9
Wetzell	3,2	3,7	9,4	5,6

5. Ocena prędkości stacji

Prędkości stacji z wyników SLR i GPS wyznaczono z wykresów zamieszczonych na rysunkach 4-9 jako nachylenie linii współrzędnych w podanym w tabeli 2 okresie czasu. Niepewność wyznaczania prędkości mieści się w granicach od 0,1 mm/rok dla najlepszych stacji laserowych i prawie wszystkich stacji GPS do 3 mm/rok dla najmniej dokładnych stacji laserowych (Pekin). Wyniki dla wszystkich stacji zamieszczono w tabeli 4.

TABELA 4

Prędkości stacji dla współrzędnych X, Y, Z i ich porównanie z ITRF2005, dla składowych horyzontalnych N, E i ich porównanie z modelem ruchu płyt tektonicznych, oraz dla składowej pionowej U

STACJA	PŁYTA	V_{XYZ} [mm/rok]		V_{XYZ} ITRF2005 [mm/rok]		V_{NE} [mm/rok]		V_{NE} NUVEL [mm/rok]	V_U [mm/rok]	
		SLR	GPS	SLR	GPS	SLR	GPS		SLR	GPS
McDonald	Pln. Amer.	14,2	13,1	13,5	13,2	14,1	13,0	13,9	-1,3	1,5
Yarragadee	Australijska	68,2	69,7	69,6	69,6	68,4	69,9	71,0	1,3	0,0
Monument Peak	Pacyfiku	43,7	42,3	42,4	42,4	43,6	42,3	46,6	0,4	0,2
Pekin	Euroazj.	32,2	31,0	32,2	32,4	29,2	30,6	25,6	-13,5	5,4
Arequipa	Płd. Amer.	19,6	19,3	18,9	18,9	19,6	19,4	10,0	-2,0	0,5
Borowiec	Euroazj.	25,8	25,4	24,7	24,7	25,8	25,4	24,1	-1,5	1,2
Grasse	Euroazj.	26,8	26,0	26,0	26,0	26,7	26,0	24,7	2,3	0,3
Poczdnam	Euroazj.	24,4	24,8	24,1	24,2	24,5	24,7	23,9	-0,7	1,8
Szanghaj	Euroazj.	33,3	34,5	34,6	34,0	34,5	34,5	25,7	-4,5	0,5
Graz	Euroazj.	27,7	26,5	26,4	26,9	27,4	26,5	24,7	-4,0	1,2
Herstmonceux	Euroazj.	24,0	24,3	23,8	23,8	24,0	24,2	23,2	-1,1	2,2
Wetzell	Euroazj.	25,5	25,7	25,2	25,6	25,1	25,7	24,3	4,4	1,1

Widoczna jest bardzo dobra zgodność wyników SLR i GPS dla większości stacji nieprzekraczająca 1 mm/rok. Porównanie uzyskanych wyników z ITRF2005 także wskazuje na bardzo dobrą zgodność również poniżej 1 mm/rok. Brak systematycznych różnic pomiędzy prędkościami uzyskanymi z pomiarów SLR i GPS tak dla prędkości w układzie geocentrycznym jak i horyzontalnym. Natomiast widoczne są istotne systematyczne różnice z geologicznym modelem ruchu płyt tektonicznych NNR NUVEL1A [14]. Dla wszystkich stacji europejskich prędkości uzyskane dla tego modelu są 1-2 mm/rok mniejsze. Dla stacji chińskich różnica ta wynosi nawet 5 mm/rok dla Pekinu i 10 mm/rok dla Szanghaju. Wyjaśnieniem tych różnic może być położenie tych stacji na krawędzi płyty euroazjatyckiej lub istnienie podpłyty chińskiej. Małe różnice 1-3 mm/rok są dla płyty Pacyfiku i australijskiej, brak różnic dla płyty północnoamerykańskiej. Składowe pionowe dla wszystkich stacji z wyjątkiem Pekinu mają prędkości poniżej 5 mm/rok, brak jest systematycznych zależności od płyty. Duże wartości dla Pekinu wynikają z krótkiego okresu (poniżej 4 lat) i dużych błędów systematycznych stacji laserowej.

Wnioski

Badanie różnic w wyznaczaniu pozycji stacji między dwoma technikami satelitarnymi SLR i GPS wykazało występowanie bardzo istotnych różnic w składowej pionowej dla pięciu stacji (Yarragadee, Monument Peak, Arequipa, Szanghaj w latach 1993-2004) na poziomie 1-3 cm. Ze względu na duże znaczenie tych stacji w obliczaniu orbit satelitów wyjaśnienie tych różnic jest bardzo ważne. Przyczyną mogą być błędy dowiązania punktów odniesienia SLR-GPS, błędy systematyczne rozwiązania GPS lub SLR, błędy wyznaczania współrzędnych w układzie ITRF2005, błędy systematyczne wykonywanych obliczeń dla SLR. Podobne różnice występowały także we wcześniejszych latach dla innych stacji, ale zostały zlikwidowane (Grasse 1995-1998, Graz 1993-1996, Pekin 2000-2002, McDonald 1993-2001). Stacja w Borowcu wykazuje okresowe błędy systematyczne SLR, przyczyną są błędy aparaturowe. Ciekawym efektem jest zmiana wysokości stacji zgodna dla obu technik przed trzęsieniem ziemi dla stacji Arequipa. Składowe horyzontalne dla wszystkich stacji wykazują bardzo dobrą zgodność nieprzekraczającą 5 mm, jedynie Szanghaj wykazuje większą różnicę w składowej N-S.

Stabilność pozycji stacji w ciągu badanego okresu jest znacznie lepsza dla GPS (rys. 10), najlepsza 5,6 mm w ciągu 7 lat — Wettzell, najgorsza 11,2 mm w ciągu 11 lat — Yarragadee, niż dla SLR, najlepsza 6,8 mm w ciągu 11 lat — Herstmonceux, najgorsza 31,6 mm w ciągu 4 lat — Pekin. Technika SLR wykazuje bardzo duże różnice w stabilności stacji zależne od systemu. Jest to wynikiem błędów przypadkowych i systematycznych poszczególnych stacji, które w przeciwieństwie do GPS bardzo się między sobą różnią. Kolejnym krokiem, który należy podjąć,

jest podobna analiza wyników SLR i GPS za ostatni okres pomiarów (2004-2008). Wyniki odpowiadają na ważne pytanie, czy jakość wyników wyznaczania pozycji z obu technik zmierza w kierunku 1 mm. Dotychczasowe wyniki zamieszczone w tej pracy potwierdzają ten kierunek (Grasse, Graz, Wettzell, Poczdam, Yarragadee, McDonald (składowa pionowa na rysunkach 4, 5, 6, 8 i 9)).

Średnie różnice dla trzech składowych pomiędzy SLR i GPS uzyskane w wyniku tej pracy wykazują, że aż dla sześciu stacji różnice są większe od 1 cm. W rozwiązaniu ITRF2005 tylko 3 stacje wykazują tak dużą różnicę. Należy wyjaśnić, dlaczego dla większości stacji wyniki się różnią.

Prędkości stacji dla obu technik wykazują bardzo dobrą zgodność (poniżej 1 mm/rok), także dla rozwiązania ITRF2005, oraz brak systematycznego przesunięcia pomiędzy obiema technikami. Występuje dobra zgodność prędkości z modelem geologicznym ruchu płyt tektonicznych NNR-NUVEL1A, chociaż dla stacji europejskich wyniki prędkości są systematycznie mniejsze (o 1-2 mm/rok). Można także zaobserwować różnice w prędkości stacji europejskich w granicach do 3 mm/rok, ze względu na zgodność z modelem NNR-NUVEL1A i ITRF2005 można uznać te różnice za rzeczywiste. Prędkości obu stacji chińskich, Monument Peak, a szczególnie Arequipy, odbiegają od modelu NNR-NUVEL1A. Można te różnice wyjaśnić położeniem stacji na krawędzi płyt, chociaż dla płyty południowoamerykańskiej różnice jeśli chodzi o prędkość i kierunek są zbyt duże. Niezwiązane z ruchem płyt tektonicznych prędkości pionowe stacji z wyjątkiem Pekinu wynoszą poniżej 5 mm/rok. Głównie jest to wynik błędów systematycznych stacji tak dla techniki GPS jak i dla SLR, lub też błędów w wyznaczaniu wysokości stacji przez nieuwzględnienie nacisku oceanów i atmosfery (zdecydowanie większe prędkości są dla techniki SLR).

Dalsze prace powinny się koncentrować na wyjaśnieniu i wyeliminowaniu 2-3 cm różnic pomiędzy SLR i GPS dla składowej pionowej pozycji stacji oraz szczegółowej analizie porównań wyników prędkości stacji, szczególnie wyników GPS, których jest znacznie więcej z modelami geologicznymi. Nowy układ współrzędnych ITRF powinien bardzo ułatwić rozwiązanie tych zadań.

Podziękowania

Autorzy dziękują dr. Michaelowi Heflinowi i JPL NASA za dane GPS, NASA GSFC za zgodę na wykorzystanie programu GEODYN-II oraz stacjom ILRS i IGS za ich ciągłą pracę dla uzyskiwania wysokiej jakości danych SLR i GPS.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2006-2009 jako projekt badawczy Nr 4T12E 007 30.

Artykuł wpłynął do redakcji 11.03.2009 r. Zweryfikowaną wersję po recenzji otrzymano w kwietniu 2009 r.

LITERATURA

- [1] C. BOUCHER, Z. ALTAMINI, P. SILLARD, *The 1997 International Terrestrial Reference Frame (ITRF97)*, IERS Technical Note 27, Obs. De Paris, Paris.
- [2] C. BOUCHER, Z. ALTAMINI, P. SILLARD, M. FEISSEL-VERNIER, *The ITRF2000*, IERS Technical Note, no. 31, BKG, Frankfurt am Main, 2004.
- [3] S. SCHILLAK, M. LEHMANN, *The comparison of the station coordinates between SLR and GPS in the period 1999.0-2004.0*, Abstracts 37th COSPAR Scientific Assembly, Montreal, 13-20.07.2008.
- [4] M. H. TORRENCE, S. M. KLOSKO, D. C. CHRISTODOULIDIS, *The Construction and Testing of Normal Point at Goddard Space Flight Center*, Proc. of 5th International Workshop on Laser Ranging Instrumentation, Herstmonceux, 1984.09.10-14, vol. 2, ed. J. Gaignebet, 1984, 506-516.
- [5] S. C. COHEN, D. E. SMITH, *LAGEOS Scientific Results: Introduction*, J. Geophys. Res., 90, 1985, 9217-9220.
- [6] J. J. MCCARTHY, D. MOORE, S. LUO, S. B. LUTHCKE, D. E. PAVLIS, S. ROWTON, L. S. TSAOUSI, *GEODYN-II*, vol. 1-5, Hughes STX Systems Corporation, Greenbelt, 1993.
- [7] ITRF2005, http://itrf.ensg.ign.fr/ITRF_solutions/2005/ITRF2005.php
- [8] C. REIGBER, R. SCHMIDT, F. FLECHTNER, R. KOENIG, U. MEYER, K. H. NEUMAYER, P. SCHWINTZER, S. Y. ZHU, *An Earth gravity field model complete to degree and order 150 from GRACE: EIGEN-GRACE02S*, Journal of Geodynamics 39 (1), 2005, 1-10.
- [9] F. G. LEMOINE, S. C. KENYON, J. K. FACTOR, R. G. TRIMMER, N. K. PAVLIS, D. S. CHINN, C. M. COX, S. M. KLOSKO, S. B. LUTHCKE, M. H. TORRENCE, Y. M. WANG, R. G. WILLIAMSON, E. C. PAVLIS, R. H. RAPP, T. R. OLSON, *The development of the joint NASA GSFC and the National Imagery and Mapping Agency (NIMA) Geopotential Model EGM96*, NASA/TP-1998-206861, Goddard Space Flight Center, Greenbelt, 1998.
- [10] E. M. STANDISH, *The observational basis for JPL's DE200, the Planetary Ephemerides of the Astronomical Almanac.*, Astron. Astrophys., 1990, 233: 252-271.
- [11] J. W. MARINI, C. W. MURRAY, *Correction of laser range tracking data for atmospheric refraction at elevations above 10 degrees*, Preprint X-591-73-351, Goddard Space Flight Center, NASA, Greenbelt, 1973.
- [12] J. M. LEMOINE, R. BIANCALE, G. BOURDA, *Processing 18.6 years of Lageos data*, Proc. of 14th International Laser Ranging Workshop, San Fernando, 7-11.06.2004.
- [13] K. M. BORKOWSKI, *Accurate Algorithms to Transform Geocentric to Geodetic Coordinates*, Bull. Geod., 63, 1989, 50-56.
- [14] C. DEMETS, R. G. GORDON, D. F. ARGUS, S. STEIN, *Effect of recent revisions to the geomagnetic reversal time scale on estimates of current plate motions*, Geophys. Res. Lett., 21, 1994, 2191-2194.

S. SCHILLAK, M. LEHMANN

Comparison of station coordinates between SLR and GPS

Abstract. The paper presents results of the comparison of the station positions and velocities between two satellite techniques: Satellite Laser Ranging (SLR) and Global Positioning System (GPS). The coordinates were calculated for common epochs in the International Terrestrial Reference Frame 2005. The comparisons were performed for all stations equipped with the SLR and GPS systems in the period of time from 1993.0 to 2004.0 without SLR stations which changed the system in that time. Finally, calculations were performed for 12 stations. The coordinates were determined for epochs

in the first day of each month. The analysis included estimation of the station positions stability, comparison with ITRF2005, station velocities comparison between both techniques. The tectonic plates model NNR-NUVEL1A and ITRF2005 velocities were used for verification of station velocities. Generally, with some exceptions, is a good agreement of the station positions and velocities between results for both techniques. For several stations, significant (1-3 cm) differences between vertical components were detected.

Keywords: geodesy and cartography, geodynamics, satellite laser ranging, GPS, determination of the station coordinates by SLR and GPS

Universal Decimal Classification: 528