

# **AUTOREFERAT**

---

**PRZEDSTAWIAJĄCY DOROBEK I OSIĄGNIĘCIA NAUKOWE,  
W SZCZEGÓLNOŚCI OKREŚLONE W ART. 16 UST. 2 USTAWY**

**Dr Krzysztof Sońnica**

**INSTYTUT GEODEZJI I GEOINFORMATYKI  
WYDZIAŁ INŻYNIERII KSZTAŁTOWANIA ŚRODOWISKA I GEODEZJI  
UNIwersytet PRZYRODNICZY WE WROCLAWIU**

**ul. Grunwaldzka 53, 50-357 Wrocław  
krzysztof.sosnica@igig.up.wroc.pl**

**WROCLAW, 2015**

## 1. Imię i Nazwisko

Krzysztof Jakub Sośnica

## 2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

- Stopień naukowy *doktora nauk fizycznych (PhD of Science in Physics, Doctor philosophiae naturalis)* przyznany przez:  
Wydział Nauk Ścisłych (Philosophisch-naturwissenschaftliche Fakultät, Faculty of Science) Uniwersytetu w Bernie (Universität Bern, University of Bern) w Szwajcarii dnia 7 kwietnia 2014 roku na podstawie rozprawy doktorskiej zatytułowanej:  
„*Determination of Precise Satellite Orbits and Geodetic parameters using Satellite Laser Ranging*”.  
Praca została napisana w Instytucie Astronomicznym Uniwersytetu w Bernie pod opieką Prof. Dr Adriana Jäggi, PD Dr Rolfa Dacha oraz Dr Danieli Thaller.  
Ocena końcowa: *summa cum laude* (6.0/6.0).  
Stopień naukowy jest uznawany za równoważny z odpowiednim polskim stopniem naukowym na podstawie art. 24 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki, Dz. U. Nr 65, poz. 595, z późn. zm. oraz listy jednostek uprawnionych prowadzonej przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego.
- Tytuł zawodowy *magistra inżyniera geodezji i kartografii* w specjalności *geoinformatyka* przyznany przez:  
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu dnia 9 lipca 2009 roku na podstawie przebiegu studiów i rozprawy dyplomowej zatytułowanej:  
„*Filtracja danych lotniczego skaningu laserowego z wykorzystaniem algorytmów analizy falkowej*”.  
Praca została napisana w Instytucie Geodezji i Geoinformatyki pod opieką prof. dr hab. inż. Andrzeja Borkowskiego. Ocena końcowa *bardzo dobry* (5.0/5.0) z wyróżnieniem Rady Wydziału i Listem Gratulacyjnym Rektora Uniwersytetu Przyrodniczego dla najlepszego absolwenta.
- Tytuł zawodowy *inżyniera geodezji i kartografii* przyznany przez:  
Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu dnia 7 lutego 2008 roku na podstawie przebiegu studiów. Ocena końcowa *bardzo dobry* (5.0/5.0) z wyróżnieniem Rady Wydziału.

## 3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych.

Doktorant (PhD student), luty 2010-luty 2014  
Astronomical Institute, GNSS Group,  
Faculty of Science, University of Bern, Berno, Szwajcaria

Asystent (Research Assistant III), marzec 2014-kwiecień 2014  
Astronomical Institute, Satellite Geodesy Group,  
Faculty of Science, University of Bern, Berno, Szwajcaria

Post Doc, kwiecień 2014-październik 2014  
Astronomical Institute, Satellite Geodesy Group,  
Faculty of Science, University of Bern, Berno, Szwajcaria

Asystent, październik 2014-maj 2015

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji,  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław, Polska

Adiunkt, od czerwca 2015

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji,  
Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu, Wrocław, Polska

**4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 z późn. zm.):**

Jako osiągnięcie naukowe stanowiące znaczący wkład autora w rozwój określonej dyscypliny naukowej wskazuję cykl 5 publikacji powiązanych tematycznie zatytułowany:

**„WYZNACZANIE PARAMETRÓW ROTACJI, GEOMETRII I POTENCJAŁU GRAWITACYJNEGO ZIEMI  
Z WYKORZYSTANIEM LASEROWYCH POMIARÓW ODLEGŁOŚCI SLR  
DO SZTUCZNYCH SATELITÓW”**

**4.1. Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia:**

[1] Sośnica, K., D. Thaller, R. Dach, P. Steigenberger, G. Beutler, D. Arnold, A. Jäggi; 2015:  
*Satellite Laser Ranging to GPS and GLONASS. Journal of Geodesy* 89(7), pp. 725-743,  
DOI: 10.1007/s00190-015-0810-8, (IF<sup>1</sup>=2,699, IF<sub>5y</sub><sup>2</sup>=3,329, I<sub>p</sub><sup>3</sup><sub>MNISW</sub>=40)

[2] Sośnica, K.; 2015:  
*LAGEOS sensitivity to ocean tides. Acta Geophysica* 63(4), pp. 1181-1203, DOI: 10.1515/acgeo-2015-0032, (IF=1,068, IF<sub>5y</sub>=0,927, I<sub>p</sub><sub>MNISW</sub>=20)

[3] Sośnica, K.; 2015:  
*Impact of the atmospheric drag on Starlette, Stella, Ajisai, and LARES orbits. Artificial Satellites, Journal of Planetary Geodesy*, 50(1), pp. 1-18, DOI: 10.1515/arsa-2015-0001 (I<sub>p</sub><sub>MNISW</sub>=8)

[4] Sośnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, R. Dach, G. Beutler; 2014:  
*Contribution of Starlette, Stella, and AJISAI to the SLR-derived global reference frame. Journal of Geodesy* 88(8), pp. 789-804. DOI 10.1007/s00190-014-0722-z, (IF=2,699, IF<sub>5y</sub>=3,329, I<sub>p</sub><sub>MNISW</sub>=40)

[5] Sośnica, K., A. Jäggi, U. Meyer, D. Thaller, G. Beutler, D. Arnold, R. Dach; 2015:  
*Time variable Earth's gravity field from SLR satellites. Journal of Geodesy*, artykuł dostępny online, DOI: 10.1007/s00190-015-0825-1, (IF=2,699, IF<sub>5y</sub>=3,329, I<sub>p</sub><sub>MNISW</sub>=40)

---

<sup>1</sup> Wskaźnik Impact Factor według Thomson Reuters Journal Citation Reports® (JCR)

<sup>2</sup> Pięcioletni wskaźnik Impact Factor według Thomson Reuters Journal Citation Reports® (JCR)

<sup>3</sup> Liczba punktów według Komunikatu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego w sprawie wykazu czasopism naukowych z dnia 31 grudnia 2014

## 4.2. Omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

### WPROWADZENIE

Pod koniec XIX wieku Friedrich Robert Helmert zdefiniował przedmiot badań geodezji jako *naukę o pomiarach oraz kartograficznych zobrazowaniach powierzchni Ziemi* [6]. Powyższa definicja, chociaż nadal aktualna, została poszerzona ze względu na szerokie spektrum bardzo precyzyjnych i homogenicznych w skali globalnej pomiarów dostarczonych przez techniki obserwacyjne geodezji satelitarnej. Dzisiejszy przedmiot badań geodezji, a w szczególności geodezji satelitarnej, stanowią następujące kategorie parametrów opisujących figurę Ziemi, które potocznie nazywane są *trzema filarami geodezji* [6,7,8,9]:

**I filar: geometria** – dotyczy wyznaczania precyzyjnych, trójwymiarowych pozycji punktów na, nad oraz pod powierzchnią Ziemi oraz ich zmienności w czasie,

**II filar: rotacja** – dotyczy wyznaczania parametrów związanych z orientacją figury Ziemi w przestrzeni zewnętrznej oraz z ruchem obrotowym Ziemi (takich jak precesja, nutacja, ruchy bieguna, zmienność długości doby) oraz parametrów geodynamicznych i geofizycznych, mających bezpośredni związek z nieregularnościami w ruchu obrotowym,

**III filar: potencjał grawitacyjny** – dotyczy wyznaczania pola grawitacyjnego Ziemi oraz jego zmian w czasie.

Istniały również próby definicji IV filaru geodezji jako krzywizny czasoprzestrzeni [10, 11] ze względu na kluczową rolę, jaką odgrywa geodezja satelitarna w badaniach i weryfikacji zjawisk relatywistycznych. Jednakże IV filar nie został dotychczas w pełni zaakceptowany przez międzynarodowe geodezyjne środowisko naukowe.

Geodezja satelitarna staje dzisiaj przed ambitnymi wyzwaniami zdefiniowanymi przez Globalny Geodezyjny System Obserwacyjny (GGOS, [8]), który wymaga długoterminowej stabilności współrzędnych na poziomie 1 mm oraz stabilności prędkości stacji na poziomie 0,1 mm/rok. Wymagania te podyktowane są koniecznością obserwacji zmieniającej się planety Ziemi, a w szczególności monitorowaniem procesów topnienia lodowców na obszarach okołobiegunowych, wiekowym wzrostem poziomu wód w morzach i oceanach oraz nasilającymi się ekstremalnymi zjawiskami atmosferycznymi. Monitorowanie procesów takich jak wzrost poziomu wód, które charakteryzują się wielkością rzędu kilku milimetrów rocznie [12], wymaga geodezyjnych układów odniesienia, posiadających stabilność znacząco przewyższającą wielkość obserwowanego zjawiska [13]. Dostarczenie jak najdokładniejszych układów odniesienia stanowi fundament geodezji satelitarnej.

Obecnie wymagania stawiane przez GGOS nie mogą być spełnione, gdyż aktualna stabilność współrzędnych i prędkości stacji obserwacyjnych jest o około jeden rząd wielkości gorsza aniżeli docelowe założenia [8]. Dlatego podejmowane są liczne próby zarówno poprawy dokładności wielkości obserwowanych w geodezji satelitarnej, jak również opracowania precyzyjnych modeli geodynamicznych, ulepszonych modeli redukcji obserwacji satelitarnych oraz dokładniejszych modeli opisujących ruch sztucznych satelitów. Kolejnym kluczowym zagadnieniem w geodezji satelitarnej jest poziom zgodności oraz spójność pomiędzy różnymi technikami obserwacyjnymi [14], w szczególności

technikami opartymi na obserwacjach mikrofalowych (GNSS – Global Navigation Satellite Systems, VLBI – Very Long Baseline Interferometry, DORIS – Doppler Orbitography and Radiopositioning Integrated by Satellite) a technikami laserowymi (SLR – Satellite Laser Ranging).

Laserowe pomiary odległości do sztucznych satelitów Ziemi (ang. Satellite Laser Ranging, SLR) odgrywają kluczową rolę w badaniach procesów geodezyjnych i geofizycznych zachodzący we wnętrzu, na powierzchni jak i w bliskim otoczeniu Ziemi poprzez wyznaczenie parametrów rotacji, położenia i potencjału grawitacyjnego Ziemi [15,16,17,18]. Ponadto obserwacje SLR pozwalają wyznaczyć wysokoprecyzyjne orbity sztucznych satelitów [19], definiują początek ziemskiego układu współrzędnych (realizowany przez tzw. współrzędne geocentrum), posiadają wpływ na wyznaczenie globalnej skali układu współrzędnych [14], stałej grawitacji [20], jak i efektów relatywistycznych, np. precesji geodezyjnej i efektu Lensa-Thirringa [21,22]. Niezaprzeczalną zaletą rozwiązań SLR jest wysoka dokładność pomiarów odległości pomiędzy stacjami na powierzchni Ziemi a sztucznymi satelitami [23], jak i prosta konstrukcja satelitów (zazwyczaj w formie kuli o niewielkim stosunku powierzchni przekroju poprzecznego do masy), dzięki czemu orbity satelitów są w najmniejszym stopniu podatne na perturbacje związane z siłami niegrawitacyjnymi (ciśnienie promieniowania słonecznego, opór powietrza, albedo [24]).

## **CEL**

Wspólne cele cyklu pięciu publikacji powiązanych tematycznie i stanowiących osiągnięcie naukowe można scharakteryzować jako:

- Identyfikacja oraz modelowanie wybranych efektów systematycznych w obserwacjach SLR oraz poprawa spójności rozwiązań SLR i GNSS,
- Eliminacja oraz redukcja błędów systematycznych w parametrach geodezyjnych wyznaczonych na podstawie obserwacji SLR poprzez ulepszone sposoby modelowania orbit sztucznych satelitów Ziemi,
- Poprawa jakości parametrów opisujących pozycję, rotację oraz potencjał grawitacyjny Ziemi poprzez łączną estymację parametrów należących do wszystkich trzech filarów geodezji z wykorzystaniem obserwacji SLR.

Nadrzędnym priorytetem cyklu publikacji było doskonalenie sposobów opracowania obserwacji SLR w celu uzyskania wysokoprecyzyjnych i wolnych od błędów systematycznych parametrów geodezyjnych opisujących figurę Ziemi, a także poprawa spójności pomiędzy różnymi technikami obserwacyjnymi geodezji satelitarnej, a w szczególności pomiędzy SLR i GNSS. Cykl publikacji stanowi zatem przyczynek w rozwój zakresu możliwości opracowania obserwacji dostarczonych przez techniki geodezji satelitarnej jako istotny etap do osiągnięcia celów GGOS.

## **OMÓWIENIE WYNIKÓW**

Publikacja [1] miała na celu realizację pierwszego celu cyklu publikacji, a mianowicie poprawę spójności rozwiązań SLR i GNSS poprzez identyfikację i modelowanie efektów systematycznych w obserwacjach SLR do satelitów GNSS. Motywacją do powstania publikacji było zakończenie eksperymentu NAVSTAR-SLR, który polegał na umieszczeniu reflektorów zwrotnych dedykowanych obserwacjom laserowym na dwóch satelitach GPS bloku IIA w 1993 oraz w 1994 roku [25,26]. Satelity zostały ostatecznie zdezaktywowane w 2013 oraz w 2014 roku, co pozwoliło na podsumowanie

w artykule dwudziestu lat precyzyjnych obserwacji laserowych poprzez porównanie orbit opartych na obserwacjach GNSS z obserwacjami SLR. Wszystkie satelity rosyjskiego systemu nawigacyjnego GLONASS są nominalnie wyposażone w reflektory zwrotne, co umożliwiło dokonanie szerokiego spektrum precyzyjnych analiz. Jednakże reflektory zwrotne na satelitach GLONASS różnią się wielkością, kształtem ułożenia i ilością pryzmatów, a także posiadaniem lub brakiem tylnej powłoki (*coated/uncoated corner cube reflectors*), co wpływa na ich różną charakterystykę [27].

W publikacji [1] zostały przeanalizowane rezydua obserwacji SLR w stosunku do orbit satelitów GPS i GLONASS wyznaczonych na podstawie obserwacji mikrofalowych. Średnia wartość rezyduów SLR dla satelitów GPS mieści się w zakresie od  $-12.8$  do  $-13.5$  mm z odchyleniem standardowym od  $22.8$  do  $23.6$  mm. Analizy wykazały jednak, że wartości te nie są stałe w czasie. Począwszy od roku 2008, odchylenie standardowe rezyduów wzrasta ze względu na zwiększoną aktywność stacji SLR charakteryzujących się gorszą jakością pomiarów oraz ze względu na proces starzenia się satelitów GPS, których zakładana żywotność wynosiła 7.5 roku, a które były aktywne przez blisko 21 lat. W publikacji wykryto ponadto zależności pomiędzy aktywnością jonosfery oraz średnimi rezyduami SLR. Taka zależność jednoznacznie wskazuje na błędy w modelowaniu obserwacji mikrofalowych GNSS, szczególnie na braki w modelowaniu opóźnienia jonosferycznego drugiego i trzeciego rzędu, gdyż obserwacje laserowe są całkowicie wolne od opóźnienia jonosferycznego. W przypadku satelitów GLONASS, najmniejsze wartości rezyduów wystąpiły w roku 2010 i były na poziomie 33 mm, co świadczy o tym, że dokładność wyznaczenia orbit satelitów GLONASS nadal pozostaje gorsza od dokładności orbit satelitów systemu GPS. Porównując satelity GLONASS różnej generacji, można było stwierdzić, że najnowszy satelita typu GLONASS-K1 wyposażony w reflektory zwrotne z pryzmatami tworzącymi okręgi [28], charakteryzuje się najmniejszym rozsiewem średnich rezyduów obserwacji SLR dla stacji wyposażonych w detektory różnego typu. Rozsiew rezyduów dla satelity GLONASS-K1 został zredukowany do około 20 mm w porównaniu do satelitów GLONASS-M, charakteryzujących się rozsiewem na poziomie 60 mm. Ponadto wykryto zależność obserwacji SLR od kąta nachylenia Słońca względem płaszczyzny orbit satelitów GLONASS, co jednoznacznie wskazało na braki w modelowaniu wpływu ciśnienia słonecznego na orbity satelitów GLONASS.

Publikacja [1] poświęcona była również analizie błędów systematycznych obserwacji SLR, takich jak tzw. efekt sygnatury satelitów. Efekt sygnatury satelitów GLONASS-M został zidentyfikowany na podstawie analizy zależności kąta padania wiązki laserowej na reflektor zwrotny a średnią wartością rezyduów SLR. W przypadku stacji laserowych wyposażonych w detektory niskoenergetyczne, tj. rejestrujących pojedyncze fotony bądź kilka fotonów (ang. *single-photon detectors*), średnie rezydua SLR są na poziomie 0.1 mm (dla stacji Zimmerwald) oraz 0.9 mm (dla stacji Herstmonceux), a różnica rezyduów pomiędzy odbiciami laserowymi pod kątem  $0^\circ$  i  $14^\circ$  względem kierunku nadiru nie przekracza 1 mm. Jednakże w przypadku detektorów wysokoenergetycznych (ang. *multi-photon detectors*) średnie rezydua wynoszą od  $-12.2$  do  $-25.6$  mm, a różnica pomiędzy obserwacjami w nadirze a obserwacjami pod kątem  $14^\circ$  względem nadiru wynosi nawet 15 mm. Te różnice wynikają z faktu, że detektory niskoenergetyczne rejestrujące pojedyncze fotony przedstawiają pełen obraz reflektora zwrotnego, ponieważ prawdopodobieństwo odbicia się impulsu laserowego od każdego pryzmatu jest takie same. Dlatego też wykorzystując obserwacje oparte na wielu niskoenergetycznych impulsach wysłanych do satelity, można uzyskać pomiary SLR wolne od efektów systematycznych związanych z kątem nachylenia reflektora. W przypadku detektorów wysokoenergetycznych, rejestrujących wiele fotonów, w pierwszej kolejności rejestrowane są fotony odbite od najbliższej krawędzi retroreflektora. Ze względu na ograniczoną liczbę możliwych do zarejestrowania fotonów, odległości z obserwacji SLR są krótsze niż odległości faktyczne w szczególności w przypadku nachylonych retroreflektorów. Ten efekt nosi nazwę efektu sygnatury

satelitów i został po raz pierwszy zidentyfikowany w publikacji [1] wykorzystując orbity wyznaczone na podstawie obserwacji mikrofalowych oraz obserwacji SLR do satelitów GLONASS-M wyposażonych w reflektory bez aluminiowych powłok (ang. *uncoated corner cube reflectors*).

Kolejne analizy źródeł błędów systematycznych opierały się na wyjaśnieniu rozbieżności pomiędzy średnimi rezydunami pochodzącymi z dziennych i nocnych obserwacji SLR [29]. Wyjaśnienie tego efektu wiązało się z analizą rezydów SLR dla orbit satelitów GLONASS wyznaczonych z wykorzystaniem klasycznego modelu ECOM (Empirical CODE Orbit Model [30]) oraz z wykorzystaniem nowego rozszerzonego modelu ECOM [31]. Klasyczny model ECOM został opracowany na początku lat '90 do celów modelowania orbit satelitów GPS. Jednakże późniejsze analizy wykazały, że model nie sprawdza się w pełni w przypadku modelowania wpływu perturbacji ciśnienia słonecznego na satelity GLONASS-M, ze względu na zupełnie inny kształt satelitów (tj. kształt cylindryczny). Z tego względu model ECOM został uogólniony i poszerzony o parametry absorbujące w lepszym stopniu wpływ sił niegrawitacyjnych na orbity satelitów GNSS. W publikacji [1] przeanalizowano zależność kąta elongacji Słońca względem położenia satelity z perspektywy wielkości rezydów obserwacji SLR. Z analiz można było wywnioskować, że dla klasycznego modelu ECOM w przypadku niewielkich kątów elongacji (obserwacje dzienne) rezydwa przyjmowały wartości ujemne (ok. -30 mm), a w przypadku kątów elongacji Słońca bliskich 180° (obserwacje nocne) rezydwa przyjmowały wartości dodatnie (ok. +20 mm). Jednakże stosując nowy model ECOM, zależności systematyczne pomiędzy kątem elongacji Słońca a rezydunami SLR zostały znacząco zredukowane z poziomu 50 mm do 2-3 mm. Ten rezultat jest niezmiernie ważny dla środowiska zajmującego się obserwacjami laserowymi, gdyż poprzednie podejrzenia zmienności rezydów w zależności od pory doby wskazywały raczej na specjalne filtry stosowane przez stacje SLR, które umożliwiają wykonywanie dziennych pomiarów oraz sugerowały ryzyko zaburzenia obserwacji laserowych poprzez stosowanie filtrów optycznych. Wyjaśnienie zjawiska przez jednoznaczne wskazanie przyczyny różnic jako niedoskonałości modelowania orbit, pozwoliło uciąć spekulacje co do ryzyka związanego ze stosowaniem filtrów w pomiarach SLR.

Podsumowując, do dwóch najważniejszych rezultatów z publikacji [1] należy zaliczyć:

- potwierdzenie istnienia oraz oszacowanie wielkości efektu sygnatury satelitów (ang. *satellite signature effect*) dla detektorów wielofotonowych, gdzie efekt sygnatury można zdefiniować jako rozśiew impulsu laserowego ze względu na odbicie wiązki przez wiele pryzmatów, szczególnie w płaskich reflektorach zwrotnych umieszczonych na satelitach GNSS,
- wyjaśnienie rozbieżności pomiędzy średnimi rezydunami pochodzącymi z dziennych i nocnych obserwacji SLR [29].

Publikacje [2] i [3] miały na celu analizę wpływu sił grawitacyjnych (w szczególności zmian potencjału grawitacyjnego Ziemi wywołanego prądami oceanów) oraz sił niegrawitacyjnych (w szczególności oporu powietrza) na orbity kulistych satelitów geodezyjnych, tj. LAGEOS-1/2, Starlette, Stella, Ajisai, LARES. Wyznaczanie precyzyjnych orbit sztucznych satelitów stanowi nieodzowny element w badaniach geodezyjnych, ponieważ dokładność wyznaczenia trajektorii ruchu satelitów znacząco wpływa na dokładność wyników analiz obserwacji satelitarnych, tj. parametrów opisujących geometrię, rotację i potencjał grawitacyjny Ziemi. W przedstawionym cyklu publikacje [2], [3], [4] stanowią kontynuację i rozszerzenie badań z pracy doktorskiej m.in. o analizę wpływu modelowania prądów oceanicznych na wyznaczanie parametrów obrotu Ziemi oraz o analizę danych SLR do satelity LARES. Natomiast publikacje [1] i [5] przedstawiają rezultaty badań rozpoczętych podczas stażu podoktorskiego, dlatego też są niezwiązane z wynikami z pracy doktorskiej.

Publikacja [2] poświęcona jest badaniom wrażliwości orbit satelitów LAGEOS-1 i LAGEOS-2 na pływy oceaniczne. Graniczna czułość satelitów LAGEOS na pływy oceaniczne została oszacowana na poziomie 5 mm, co oznacza, że precyzyjne modelowanie pływów odgrywa kluczową rolę nie tylko w przypadku satelitów niskoorbitujących (LEO), ale także w przypadku satelitów na średnich orbitach (MEO), czyli takich jak LAGEOS. Ponadto w publikacji [2] porównano wpływ stosowania różnych modeli wpływów oceanicznych opartych na altimetrii satelitarnej, danych hydrodynamicznych i odczytów z mareografów pływowych na wyznaczone orbity satelitów LAGEOS oraz parametry ruchu obrotowego Ziemi. Na podstawie szeregu analiz wyciągnięto wnioski, że najwłaściwszymi modelami pływów oceanicznych są modele oparte na obserwacjach altimetrycznych bądź modele kombinowane z wykorzystaniem obserwacji altimetrycznych i innych misji satelitarnych, np. GRACE. Natomiast modele hydrodynamiczne opracowane ze wsparciem obserwacji altimetrycznych, pomimo swojej wysokiej rozdzielczości, cechują się dużymi rozbieżnościami i wprowadzają zazwyczaj systematyczne zaburzenia w parametrach geodezyjnych wyznaczonych na podstawie SLR. Na podstawie analizy spektralnej empirycznych parametrów orbit satelitów LAGEOS wykazano, że szczególnie fala pływowa  $S_2$  nie jest prawidłowo modelowana w niektórych modelach pływów oceanicznych (np. FES2004). Wynika to prawdopodobnie z faktu, że wiele misji altimetrycznych opiera się na satelitach, których kąt inklinacji orbity wynosi  $66^\circ$ , przez co występują braki w obserwacjach na obszarach podbiegunowych. Błędy w modelowaniu fali pływowej  $S_2$  degradują jakość produktów GRACE [32], ze względu na brak możliwości separacji perturbacji orbit satelitów GRACE wywołanych wpływem ciśnienia słonecznego od wpływu fali  $S_2$ , w wyniku czego wartości parametru spłaszczenia Ziemi  $C_{20}$ , wyznaczone z obserwacji GRACE, są niewiarygodne [32]. W publikacji [2] wykazano, że problemy z modelowaniem fali pływowej  $S_2$  dotyczą nie tylko satelitów GRACE, ale również satelitów LAGEOS, chociaż w mniejszym stopniu. Poprzez stosowanie wybranych modeli pływów oceanicznych (np. CSR40A) można zminimalizować systematyczne efekty wynikające z problemów z modelowaniem fali  $S_2$ , a także z innymi falami pływowymi takimi jak  $S_{01}$  i  $S_{50}$ . Stosowanie niewłaściwych modeli oceanicznych prowadzi do degradacji parametrów ruchu obrotowego Ziemi (współrzędnych bieguna i ekscesu długości doby) wyznaczonych z wykorzystaniem obserwacji SLR do satelitów LAGEOS nawet o 25%.

Publikacja [3] poświęcona była analizie wpływu sił niegrawitacyjnych, a w szczególności sił związanych z oporem powietrza, na orbity satelitów, takich jak Starlette, Stella, Ajsai i LARES. W publikacji przedstawiono zależności aktywności Słońca i pola magnetycznego Ziemi na gęstość górnych warstw atmosfery, które bezpośrednio oddziałują na niskoorbitujące satelity. Wykazano, że zmienność gęstości atmosfery osiąga maksymalne wartości na wysokości ok. 800 km nad powierzchnią Ziemi, czyli na wysokości, gdzie znajduje się wiele satelitów geodezyjnych (Stella, Starlette, BLITS, Larets). Duża zmienność gęstości atmosfery powoduje utratę energii satelity, która jest bezpośrednio związana z dużą pójnością elipsy orbity. Na podstawie dekompozycji wpływu oporu powietrza na składową radialną (*radial*), transwersalną (*along-track*) oraz normalną do płaszczyzny orbity (*out-of-plane*) można było stwierdzić, że opór powietrza najbardziej zaburza składową transwersalną oraz składową normalną, przy czym składowa normalna jest zaburzona dwudziestokrotnie słabiej niż transwersalna. Opór powietrza działający w kierunku radialnym jest zaniedbywalny, co jest istotne dla pomiarów laserowych, gdyż obserwacje SLR dostarczają informacji głównie w kierunku tej składowej. Zatem, składowa radialna może stanowić nieodzowny komponent w wyznaczaniu kluczowych parametrów geodezyjnych, takich jak potencjał grawitacyjny Ziemi, poprzez bezpośrednią mierzalność techniką SLR i dzięki temu, że nie jest zaburzona przez niemodelowane części składowe oporu powietrza. W przypadku satelity LARES, którego głównym celem jest potwierdzenie efektu relatywistycznego Lensa-Thirringa na poziomie lepszym niż 1% [33], stwierdzono, że w okresach wzmożonej aktywności Słońca periodyczne perturbacje orbity indukowane przez opór powietrza dla



składowej normalnej osiągać mogą wartość 1,9% całkowitego efektu Lensa-Thirringa. Dlatego też właściwe modelowanie wpływu oporu powietrza musi stanowić nieodzowny element wysokoprecyzyjnych analiz orbitalnych, aby można było zakończyć misję sukcesem.

Publikacja [4] dotyczy modelowania orbit satelitów Stella, Starlette i Ajisai oraz jakości parametrów rotacji Ziemi oraz współrzędnych stacji SLR wyznaczonych na podstawie obserwacji SLR do satelitów LAGEOS-1/2 oraz do satelitów LAGEOS-1/2, Stella, Starlette i Ajisai.

W publikacji [4] testowane były różne sposoby modelowania orbit satelitów Stella, Starlette i Ajisai. Na potrzeby tej publikacji oprogramowanie Bernese GNSS Software zostało poszerzone o możliwość przetwarzania obserwacji SLR do niskoorbitujących satelitów geodezyjnych. W publikacji przetestowano różne długości interwałów dla parametrów Keplerowskich, empirycznych oraz czy i w jakich kierunkach należy estymować pseudo-stochastyczne pulsy celem poprawy jakości parametrów geodezyjnych. Czynniki decydującymi o jakości orbity były w szczególności: (1) parametry ruchu obrotowego Ziemi (współrzędne bieguna i eksces długości doby), które były porównywane z oficjalnymi parametrami IERS-08-C04 [34] dostarczonymi przez Międzynarodową Służbę Obrótu Ziemi (International Earth Rotation Service), (2) stabilność współrzędnych stacji SLR względem ITRF2008/SLRF2008, (3) błąd *a posteriori* typowego spostrzeżenia  $m_0$ .

Na podstawie wyników analiz można było stwierdzić, że estymacja pseudo-stochastycznych pulsów dla niskoorbitujących satelitów poprawia jakość wyznaczonych współrzędnych bieguna Ziemi na podstawie obserwacji SLR o 30 i 26% dla składowej X i Y. Ważony błąd RMS (WRMS) względem serii IERS-08-C04 wyniósł 270 i 218  $\mu\text{s}$  dla kombinowanego rozwiązania Stella-Starlette-Ajisai oraz 149 i 140  $\mu\text{s}$  dla kombinowanego rozwiązania Stella-Starlette-Ajisai-LAGEOS-1/2. Ponadto stwierdzono, że kluczowym elementem wiarygodnych rozwiązań SLR jest wykorzystanie obserwacji do satelitów obiegających Ziemię na wysokich i niskich orbitach pod różnymi kątami inklinacji. Stosowanie kombinacji Starlette-Ajisai (oba satelity posiadają zbliżone kąty inklinacji orbit – 50.0° oraz 49.8°) doprowadza do silnych korelacji pomiędzy wyznaczanymi wartościami ekscesu długości doby (*Length-of-day excess, LoD*) oraz parametrem opisującym spłaszczenie Ziemi ( $C_{20}$ ). W momencie asymilacji obserwacji do satelitów Starlette-Ajisai z obserwacjami satelity Stella, której orbita jest heliosynchroniczna (*sun-synchronous orbit*), następuje dekorelacja parametrów, co odzwierciedlone zostaje w prawie dziesięciokrotnej redukcji średniego offsetu wartości *LoD* względem wartości IERS-08-C04 (z wartości -35,2  $\mu\text{s}$  w rozwiązaniu Starlette-Ajisai do -3,6  $\mu\text{s}$  w rozwiązaniu Stella-Starlette-Ajisai). Z drugiej strony orbita heliosynchroniczna satelity Stella charakteryzuje się silnym rezonansem z falami pływowymi  $S_1$  i  $S_2$ , które mogą wprowadzać niepożądane systematyczne efekty w wartościach wyznaczonych parametrów geodezyjnych.

W publikacji [4] wyznaczono również wartości poprawek na centrum masy (center-of-mass corrections, CoM) satelitów sferycznych. Wykazano, że wartości  $\text{CoM}=75$  mm dla satelitów Starlette i Stella, które są zalecane przez Międzynarodową Służbę Pomiarów Laserowych (International Laser Ranging Service, ILRS), nie przystają do obecnie stosowanych detektorów na stacjach laserowych. W wyniku analiz orbitalnych wyznaczone średnie wartości poprawek wyniosły 78 mm. Równolegle, wynik ten został potwierdzony przez niezależne analizy zarejestrowanych impulsów laserowych [35], które potwierdziły zasadność stosowania wartości  $\text{CoM}=78$  mm, zamiast wartości 75 mm.

Podsumowując, do dwóch najważniejszych rezultatów z publikacji [4] należy zaliczyć:

- opracowanie podejścia modelowania orbit niskich satelitów geodezyjnych poprzez estymację parametrów deterministycznych (elementy Keplerowskie orbity), parametrów empirycznych

(stałe i periodyczne przyspieszenia) oraz parametrów pseudo-stochastycznych (chwilowe zmiany prędkości satelitów w ustalonych interwałach dla określonych składowych orbitalnych),

- opracowanie metody wyznaczenia poprawek na środki ciężkości niskoorbitujących satelitów sferycznych poprzez analizę wartości *range bias* oraz poprzez transfer skali układu z poziomu satelitów MEO (LAGEOS-1/2) do poziomu satelitów LEO (Stella, Starlette, Ajisai).

Publikacja [5] podsumowuje cykl artykułów, ponieważ wykorzystuje wiedzę zawartą w artykułach [1] i [4] na temat efektów systematycznych w przypadku różnego typu detektorów wykorzystywanych na stacjach SLR, opracowanego sposobu modelowania orbit satelitów niskich opisanego w artykule [4], wpływu sił grawitacyjnych i niegravitacyjnych oraz sposobu ich modelowania opisanych w artykułach [2], [3] i [4] oraz poprawek na centrum ciężkości masy satelitów i sposobu dekorelacji parametrów poprzez asymilację obserwacji do satelitów niskich i wysokich orbitujących pod różnymi kątami inklinacji z artykułu [4]. Publikacja [5] prezentuje rozwiązanie, w którym parametry wchodzące w skład wszystkich trzech filarów geodezji są estymowane łącznie ze względu na ich nierozzerwalny związek. Przykładowo, łączna estymacja potencjału grawitacyjnego i parametrów obrotu Ziemi redukuje dwunastokrotnie (z 73 do 6  $\mu$ s) offset ekscesu długości doby względem wartości IERS-08-C04 wyznaczonego na podstawie obserwacji SLR do nisko- i wysokoorbitujących satelitów SLR [36]. Dlatego też, rozwiązania opierające się na estymacji parametrów należących do wszystkich III filarów geodezji są niezmiernie preferowane w stosunku do rozwiązań, w których parametry są estymowane niezależnie, np. gdy parametry związane z potencjałem grawitacyjnym są odseparowane od parametrów rotacji i współrzędnych stacji.

Publikacja [5] opisuje metodę wyznaczenia niskich harmonicznych sferycznych (do stopnia i rzędu 10/10) potencjału grawitacyjnego Ziemi z miesięczną rozdzielczością czasową. Rozwiązania te zostały opublikowane przez Międzynarodowe Centrum Globalnych Modeli Ziemi (International Center for Global Earth Models [37]) jako jedyne miesięczne modele potencjału grawitacyjnego Ziemi oparte wyłącznie na obserwacjach SLR. W publikacji [5] przedstawiono szereg analiz porównawczych pomiędzy rozwiązaniami opartymi na obserwacjach GRACE i SLR, w tym analizy statystyczne istotności rocznych sygnałów, współczynniki korelacji poszczególnych harmonicznych sferycznych, wiekowe zmiany kształtu geoidy oraz rozmieszczenie przestrzenne na geoidzie czasowych zmian potencjału grawitacyjnego, który jest związany z obiegiem wody w przyrodzie. Amplitudy czasowych zmian potencjału grawitacyjnego Ziemi wyznaczonych na podstawie obserwacji SLR zgadzają się w 77% z amplitudami z rozwiązań GRACE, przy czym rozwiązania SLR charakteryzują się dużo mniejszą rozdzielczością przestrzenną ze względu na ograniczony stopień i rząd rozwinięcia potencjału grawitacyjnego Ziemi. Wynika to z nieciągłości obserwacji SLR, które ograniczone są przez bezpośrednią wizurę pomiędzy stacją a satelitami oraz przez warunki atmosferyczne (zachmurzenie), podczas gdy obserwacje GRACE mają charakter ciągły. Ponadto większość stacji SLR zlokalizowana jest na północnej półkuli, co prowadzi do niejednorodności w globalnym rozmieszczeniu gęstości obserwacji. Z drugiej strony obserwacje laserowe są niepodatne na opóźnienie jonosferyczne (w przeciwieństwie do sygnałów GNSS i obserwacji K-Band rejestrowanych przez satelity GRACE) oraz satelity geodezyjne SLR umieszczone są na różnych orbitach, co pomaga w procesie dekorelacji parametrów. Ponadto satelity geodezyjne, w przeciwieństwie do satelitów GRACE, są mniej podatne na rezonans orbitalny z falami pływowymi  $S_1$  i  $S_2$ , dzięki czemu szczególnie harmoniczne sferyczne stopnia drugiemu wolne są od błędów w modelowaniu wspomnianych fal pływowych. Co ciekawe, zmiany wiekowe kształtu geoidy w rejonie Antarktydy zostały prawidłowo wyznaczone z obserwacji SLR, pomimo braku bezpośrednich obserwacji nad tym obszarem (brak stacji SLR na Antarktydzie bądź

w okolicach Antarktydy). Było to możliwe dzięki temu, że dynamiczne i ciągłe orbity satelitów niosą ze sobą informację na temat potencjału grawitacyjnego Ziemi jako całości, dzięki czemu obserwując satelitę wielokrotnie nad wybranym obszarem można ocenić jaki wpływ wywiera potencjał grawitacyjny na orbitę satelity nad obszarami nawet znacznie oddalonymi od miejsca obserwacji.

Najlepsze rezultaty z wyznaczenia potencjału grawitacyjnego Ziemi pochodzą z kombinacji rozwiązań SLR i GRACE na poziomie układów równań normalnych. Takie rozwiązania redukują wartości korelacji pomiędzy parametrami (np. współczynnik korelacji pomiędzy  $C_{20}$  i  $C_{40}$  zostaje zredukowany z -0,134 do -0,002 odpowiednio w rozwiązaniach GRACE i rozwiązaniach GRACE+SLR) oraz dwunastokrotnie redukują błędy *a posteriori* parametru  $C_{20}$ , który jest silnie podatny na rezonans orbitalny satelitów GRACE z falami pływowymi. Ostatecznie stwierdzono, że satelity geodezyjne SLR mają ogromny potencjał w zapełnieniu luki pomiędzy misją GRACE a misją GRACE-FollowOn w zakresie wyznaczania czasowych wielkoskalowych deformacji geoidy.

## PODSUMOWANIE CYKLU

Za najważniejsze osiągnięcia cyklu publikacji uważam:

- identyfikację efektów systematycznych w obserwacjach SLR, a w szczególności potwierdzenie istnienia efektu sygnatury satelitów w przypadku detektorów wielofotonowych oraz wyjaśnienie przyczyny różnic rezyduów obserwacji SLR z obserwacji dziennych i nocnych,
- opracowanie sposobu modelowania orbit niskich satelitów geodezyjnych poprzez estymację parametrów deterministycznych, empirycznych i pseudo-stochastycznych,
- łączną estymację parametrów należących do wszystkich trzech filarów geodezji, tj. współrzędnych stacji SLR, parametrów rotacji Ziemi oraz potencjału grawitacyjnego z wykorzystaniem obserwacji SLR. W szczególności opracowana technika wyznaczania czasowych zmian potencjału grawitacyjnego Ziemi z wykorzystaniem obserwacji SLR może stanowić podstawę dalszych badań nad wielkoskalowym obiegiem masy w przyrodzie, w tym nad procesami topnienia lodowców i wzrostu poziomów wód w morzach i oceanach dla okresu przed rozpoczęciem misji GRACE, jak i po zakończeniu tejże misji.

## LITERATURA

- [6] Seeber G. (2003) Satellite Geodesy. Berlin New York: Walter de Gruyter. ISBN 978-3-11-017549-3.
- [7] Beutler G. (2001) Die Internationale Assoziation fuer Geodaesie (IAG) und ihre Neuorganisation. Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 99(3):124–128.
- [8] Plag H., Pearlman M. (eds.) (2009) The Global Geodetic Observing System: Meeting the Requirements of a Global Society on a Changing Planet in 2020. Springer Verlag, Berlin, ISBN 978-3-642-02687-4
- [9] Bloßfeld M. (2015) The key role of Satellite Laser Ranging towards the integrated estimation of geometry, rotation and gravitational field of the Earth. Dissertation, Technische Universität München, Reihe C der Deutschen Geodätischen Kommission, ISBN: 978-3-7696-5157-7
- [10] Combrinck L. (2013) General Relativity and Space Geodesy. Sciences of Geodesy - II, pp 53-95. DOI 10.1007/978-3-642-28000-9\_2

- [11] Combrinck L. (2013) Space geodesy, VLBI and the fourth pillar of geodesy: spacetime curvature. IVS 2014 General Meeting Proceedings, DOI: 10.13140/2.1.4202.5761
- [12] Cazenave A., Nerem R. (2004) Present-day sea level change: Observations and causes. *Rev. Geophys* 42 (3): RG3001 DOI:10.1029/2003RG000139
- [13] Bosy J. (2014) Global, Regional and National Geodetic Reference Frames for Geodesy and Geodynamics. *Pure and Applied Geophysics*, 171 (6), pp. 783-808, DOI: 10.1007/s00024-013-0676-8
- [14] Altamimi Z., Collilieux X., Metivier L. (2011) ITRF2008: An improved solution of the international terrestrial reference frame. *Journal of Geodesy* 85(8):457–473, DOI 10.1007/s00190-011-0444-4
- [15] Smith D., Turcotte D. (1993) *Contributions of Space Geodesy to Geodynamics: Earth Dynamics*. American Geophysical Union, ISBN: 9780875905242, doi:10.1029/GD024
- [16] Schillak S., Wnuk E., Kunimori H., Yoshino T. (2006) Short note: Crustal deformation in the Key Stone network detected by satellite laser ranging. *J Geod* 79(12) 682-688.
- [17] Rothacher M. (2003) The Special Role of SLR for Inter-Technique Combinations. In: *ILRS Workshop 2003, October 28-31, 2003, Bad Koetzing, Germany*
- [18] Appleby G, Rodriguez J (2014) Using the LAGEOS Satellites to Assess the Accuracy of ILRS Stations' Observations During the Last Decade. *Proceedings from the 19th International Workshop on Laser Ranging 2014 in Annapolis, USA*.
- [19] Cheng M., Shum C., Tapley B. (1997) Determination of long-term changes in the Earth's gravity field from satellite laser ranging observations. *J Geophys Res*, 102(B10), 22, DOI:10.1029/97JB01740.
- [20] Pearlman M., Degnan J., Bosworth J. (2002) The International Laser Ranging Service. *Adv Sp Res*, Vol. 30, 2 pp. 135-143, DOI:10.1016/S0273-1177(02)00277-6
- [21] Ciufolini I., Pavlis E. (2004) A confirmation of the general relativistic prediction of the Lense–Thirring effect. *Nature* 431 (7011), 958-960
- [22] Ciufolini I., Pavlis E., Chieppa F., Fernandes-Vieira E., Pérez-Mercader J. (1998) Test of general relativity and measurement of the Lense-Thirring effect with two Earth satellites. *Science* 279 (5359), 2100-2103
- [23] Mendes V, Pavlis E. (2004) High-accuracy zenith delay prediction at optical wavelengths. *Geophys. Res. Lett.*, 31, L14602, DOI:10.1029/2004GL020308
- [24] Chen JL, Wilson CR (2003) Low degree gravitational changes from Earth rotation and geophysical models. *Geophys Res Lett*, 30(24), 2257, DOI:10.1029/2003GL018688
- [25] Pavlis EC (1995) Comparison of GPS S/C orbits determined from GPS and SLR tracking data. *Adv Space Res* 16(12):55–58. DOI:10.1016/0273-1177(95)98780-R
- [26] Beard RL (2014) The NAVSTAR 35 and 36 laser retro-reflector experiments. *Proceedings from the 19th international workshop on laser ranging, Annapolis, US, October 27–31, 2014*
- [27] Otsubo T, Appleby G, Gibbs P (2001) Glonass laser ranging accuracy with satellite signature effect. *SGEO* 22(5–6):509–516. DOI:10.1023/A:1015676419548

- [28] Vasiliev V., Sadovnikov M., Shargorodskiy V., Sokolov A. (2014) New ideas in retroreflector arrays development. In: Proceedings of the 19th international workshop on laser ranging, Annapolis, US, October 27–31, 2014
- [29] Thaller D, Sośnica K, Dach R, Jäggi A, Baumann C (2012b) SLR residuals to GPS/GLONASS and combined GNSS-SLR analysis. In: Proceedings of 12th ILRS technical workshop on laser ranging, Frascati, Italy, November 05–09, 2012
- [30] Beutler G, Brockmann E, Gurtner W, Hugentobler U, Mervart L, Rothacher M, Verdun A (1994) Extended orbit modeling techniques at the CODE processing center of the international GPS service for geodynamics (IGS): theory and initial results. *Manuscr Geod* 19:367–384
- [31] Arnold D, Meindl M, Beutler G, Schaer S, Dach R, Lutz S, Prange L, Sośnica K, Mervart L, Jäggi A (2015) CODE's new empirical orbit model for the international GNSS service. *Journal of Geodesy*, DOI 10.1007/s00190-015-0814-4
- [32] Chen JL, Wilson CR, Seo KW (2009)  $S_2$  tide aliasing in GRACE time-variable gravity solutions. *J Geod* 83(67). DOI: 10.1007/s00190-008-0282-1
- [33] Paolozzi A, Ciufolini I (2013) Lares Successfully Launched In Orbit: Satellite And Mission Description. *Acta Astron.* ISSN 0094-5765, DOI:10.1016/j.actaastro.2013.05.011
- [34] Bizouard C, Gambis D (2012) The combined solution C04 for Earth orientation parameters consistent with International Terrestrial Reference Frame 2008. Observatoire de Paris, Paris
- [35] Otsubo T, Sherwood R, Appleby G, Neubert R (2015) Center-of-mass corrections for sub-cm-precision laser-ranging targets: Starlette, Stella and LARES, *J Geod*, doi:10.1007/s00190-014-0776-y
- [36] Sośnica K., Jäggi A., Thaller D., Dach R., Meyer U. (2015) Earth Rotation and Gravity Field Parameters from Satellite Laser Ranging. Proceedings of the 19th International Workshop on Laser Ranging, October 27-31, 2014, Annapolis, Maryland, USA  
[http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3072\\_Sosnica\\_paper.pdf](http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3072_Sosnica_paper.pdf)
- [37] International Centre for Global Earth Models (ICGEM) <http://icgem.gfz-potsdam.de/ICGEM/>

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych)

### 5.1. Zrealizowane oryginalne osiągnięcia naukowe i technologiczne

Do najważniejszych moich osiągnięć naukowo-badawczych w tym do zrealizowanych oryginalnych osiągnięć technologicznych zaliczam:

[1] Współautorstwo wersji 5.1, 5.2 oraz aktualnie rozwijanej wersji 5.3 programu Bernese GNSS Software – oprogramowania do precyzyjnych analiz obserwacji w geodezji satelitarnej, charakteryzujących się najwyższą dokładnością. Moje implementacje dotyczyły możliwości przetwarzania laserowych pomiarów odległości do niskoorbitujących satelitów geodezyjnych, takich jak Starlette, Stella, Ajisai, LARES, Larets, Blits oraz Beacon-C poprzez modelowanie orbit satelitów z wykorzystaniem parametrów deterministycznych, empirycznych oraz stochastycznych pulsów. Ponadto moje implementacje w Bernese GNSS Software wiązały się z modelowaniem wpływu oporu powietrza oraz wpływu albedo Ziemi i promieniowania termicznego Ziemi na orbity satelitów

geodezyjnych. Dokonałem również w obecnej wersji dystrybucyjnej oprogramowania implementacji nowego empirycznego modelu CODE (Center for Orbit Determination in Europe) dla orbit satelitów systemów GNSS oraz automatyzacji predykcji orbit satelitów systemów GNSS. Poszerzyłem również zakres możliwości wprowadzania minimalnych warunków zerowej translacji (*no-net-translation*), zerowej rotacji (*no-net-rotation*) oraz zerowej skali (*no-net-scale*) dla stacji GNSS, SLR, VLBI co do możliwości przypisania różnych wag do różnych technik obserwacyjnych geodezji satelitarnej oraz z zakresu możliwości nakładania minimalnych warunków na poszczególne składowe X, Y, Z współrzędnych stacji.

**[2]** Współautorstwo empirycznego modelu orbit CODE dla satelitów GNSS, który od stycznia 2015 roku jest wykorzystywany przez Centrum Wyznaczania Orbit w Europie z siedzibą w Bernie (Szwajcaria) jako oficjalny model do wyznaczania precyzyjnych orbit satelitów systemów GPS, GLONASS, Galileo i innych satelitarnych systemów nawigacyjnych w oficjalnych produktach Międzynarodowej Służby GNSS (ang. International GNSS Service, IGS). Nowy model umożliwia uzyskanie wysokoprecyzyjnych wyników z obserwacji GPS, GLONASS i Galileo dzięki eliminacji błędów systematycznych orbit związanych z perturbacjami ciśnienia słonecznego. W ramach badań nad różnymi konfiguracjami empirycznych modeli orbit satelitów GNSS dokonałem weryfikacji poprawności modeli z wykorzystaniem laserowych pomiarów odległości SLR do satelitów GPS i GLONASS ze wszystkich stacji laserowych. Modele zostały opisane w artykule [1] Arnold et al., (2015) oraz w pierwszym artykule stanowiącego cykl publikacji.

**[3]** Wyznaczenie czasowych zmian potencjału grawitacyjnego Ziemi z wykorzystaniem laserowych pomiarów do sztucznych satelitów Ziemi. Są to obecnie jedyne modele opisujące potencjał grawitacyjny Ziemi z rozwinięciem harmonicznych sferycznych do stopnia 10 i rzędu 10 oraz z rozdzielczością czasową jednego miesiąca, które są oparte wyłącznie na obserwacjach laserowych do sztucznych satelitów. Modele zostały opublikowane przez Międzynarodowe Centrum Globalnych Modeli Ziemi (International Centre for Global Earth Models, ICGEM).

**[4]** Opracowanie metody pomiaru tzw. efektu niebieskiego nieba (ang. the Blue-Sky effect), który ogranicza spójność pomiędzy technikami laserowymi w geodezji satelitarnej (SLR) a technikami mikrofalowymi (np. GNSS, VLBI, DORIS) z tego względu, że obserwacje SLR są wykonywane podczas dobrych warunków pogodowych (bezchmurne niebo), kiedy to powierzchnia Ziemi jest zdeformowana przez wysokie ciśnienie atmosferyczne (ang. Atmospheric Pressure Loading). Stosując opracowaną metodę, geofizyczny efekt niebieskiego nieba został oszacowany po raz pierwszy dla wszystkich stacji laserowych SLR wykonujących obserwacje do satelitów kulistych LAGEOS. Wyniki tych badań są szczególnie istotne dla integracji i poprawy spójności pomiędzy technikami obserwacyjnymi geodezji satelitarnej. Opracowanie metody pomiaru niebieskiego nieba stanowiło podstawę przyznania nagrody przez Europejską Unię Nauk o Ziemi (European Geosciences Union, EGU) w 2015 roku za "innowacyjny wkład w kombinację laserowych pomiarów odległości do sztucznych satelitów Ziemi oraz globalnych nawigacyjnych systemów satelitarnych w celu poprawy jakości kluczowych parametrów geodezyjnych". Ponadto artykuł naukowy w czasopiśmie Journal of Geodesy ([12<sup>p</sup>] Sośnica et al., 2013), który po raz pierwszy opisał metodę pomiaru efektu niebieskiego nieba, został uznany przez Międzynarodową Asocjację Geodezji (International Association of Geodesy, IAG) za najlepszy artykuł z geodezji młodego autora w roku 2013 (IAG Young Authors Award 2013), a wyniki badań dotyczące ruchów geocentrum z w/w artykułu zostały uwzględnione w dyskusji nad przyszłymi Konwencjami IERS ([http://62.161.69.131/iers/convupdt\\_test/convupdt\\_aux\\_test.html](http://62.161.69.131/iers/convupdt_test/convupdt_aux_test.html)).

## 5.2 Wykaz pozostałych wybranych osiągnięć<sup>4</sup>:

- Autorstwo bądź współautorstwo 108 opublikowanych prac twórczych (w tym 47 po uzyskaniu stopnia doktora): 1 monografia, 13 rozdziałów w monografiach i opracowaniach zbiorowych (9 po uzyskaniu stopnia doktora), 8 artykułów w czasopismach z listy JCR (7 po uzyskaniu stopnia doktora), 3 artykułów w czasopismach z listy „B” MNiSW (1 po uzyskaniu stopnia doktora), 18 artykułów w uznanych materiałach pokonferencyjnych (7 po uzyskaniu stopnia doktora), 65 opublikowanych abstraktów w materiałach konferencyjnych (22 po uzyskaniu stopnia doktora) oraz 3 nieopublikowanych ekspertyz i raportów (1 po uzyskaniu stopnia doktora); sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje: 405 (336 po uzyskaniu stopnia doktora); sumaryczny Impact Factor: 21.179 (17.262 po uzyskaniu stopnia doktora),
- Odbycie zagranicznych staży i wizyt naukowych – łącznie 9,
- Ukończenie studiów podyplomowych i kursów specjalistycznych we Włoszech, Austrii i Szwajcarii, organizowanych m.in. przez Europejską Agencję Kosmiczną (European Space Agency), dotyczących opracowania obserwacji satelitarnych (InSAR oraz GNSS) oraz planowania i projektowania misji satelitarnych,
- Otrzymanie stypendium Szwajcarskiego Komitetu Badań Kosmicznych (Swiss Committee on Space Research),
- Otrzymanie nagród Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (European Geosciences Union), Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki (International Union of Geodesy and Geophysics) oraz Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (International Association of Geodesy),
- Prowadzenie zajęć dydaktycznych oraz kursów specjalistycznych w Polsce i w Szwajcarii, w tym ćwiczeń i wykładów na temat struktury danych i analizy szeregów czasowych w ramach Bernese GNSS Software Course w Bernie,
- Recenzowanie artykułów naukowych w czasopismach wyróżnionych w Journal Citation Reports, m.in. w Journal of Geodesy,
- Uczestnictwo w komitecie decyzyjnym nagród Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (m.in. Arne Richter Union Award),
- Członkostwo w międzynarodowych organizacjach naukowych: Committee on Space Research (COSPAR), International Association of Geodesy (IAG), American Geophysical Union (AGU), European Geosciences Union (EGU) oraz konsorcjach i sieciach badawczych: International Laser Ranging Service Analysis Working Group (ILRS AWG), Center for Orbit Determination in Europe (CODE),
- Dokonanie automatyzacji operacyjnych produktów CODE/ILRS, w tym automatyzacji predykcji orbit satelitów GPS i GLONASS dla stacji laserowych SLR,
- 65 wystąpień na konferencjach naukowych (postery i referaty), w tym 21 wygłoszonych referatów, wliczając w to 2 referaty na zaproszenie,
- Współzałożenie Studenckiego Koła Naukowego Geoinformatyki na UP we Wrocławiu,
- Uczestnictwo w międzynarodowych projektach badawczych, m.in., w projektach D-A-CH, Horizon 2020 (UE) oraz projektach Europejskiej Agencji Kosmicznej,
- Współautorstwo koncepcji misji satelitarnej VELOCITÉ (Venus Lander and Orbiter for Characterising the Interior and Tectonics) do celów badań procesów geofizycznych i aktywności tektonicznej planety Wenus, w tym opracowanie wymagań konstrukcyjnych i dokładnościowych dla instrumentów na satelicie VISAGE (Venus InSAR And Gravitational Explorer).

---

<sup>4</sup> szczegółowy opis osiągnięć znajduje się w części II oraz III załącznika 3

### 5.3 Wykaz pozostałych najważniejszych publikacji niewchodzących w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie<sup>5</sup>:

[1] Arnold, D., M. Meindl, G. Beutler, S. Schaer, R. Dach, S. Lutz, L. Prange, K. Sośnica, L. Mervart, A. Jäggi; 2015: *CODE's new empirical orbit model for the International GNSS Service*. Journal of Geodesy 89(8) pp. 775-791, DOI 10.1007/s00190-015-0814-4, (IF=2,699, IF<sub>5y</sub>=3,329, I<sub>pMNI</sub>SW=40)

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00190-015-0814-4>

[2] Sośnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, R. Dach, U. Meyer; 2015: *Earth Rotation and Gravity Field Parameters from Satellite Laser Ranging*. Proceedings of the 19th International Workshop on Laser Ranging, Celebrating 50 Year of SLR: Remembering the Past and Planning for the Future, October 27-31, 2014, Annapolis, Maryland, USA

[http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3072\\_Sosnica\\_paper.pdf](http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3072_Sosnica_paper.pdf)

[3] Sośnica, K., R. Dach, D. Thaller, A. Jäggi, G. Beutler, D. Arnold; 2015: *Processing 20 years of SLR observations to GNSS satellites*. Proceedings of the 19th International Workshop on Laser Ranging, Celebrating 50 Year of SLR: Remembering the Past and Planning for the Future, October 27-31, 2014, Annapolis, Maryland, USA

[http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3070\\_Sosnica\\_paper.pdf](http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw19/docs/2014/Papers/3070_Sosnica_paper.pdf)

[4] Glaser S., M. Fritsche, K. Sośnica, C.J. Rodríguez-Solano, K. Wang, R. Dach, U. Hugentobler, M. Rothacher, R. Dietrich; 2015:

A consistent combination of GNSS and SLR with minimum constraints.

Journal of Geodesy, DOI: 10.1007/s00190-015-0842-0, (IF=2,699, IF<sub>5y</sub>=3,329, I<sub>pMNI</sub>SW=40)

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00190-015-0842-0>

[5] Sośnica, K.; 2015:

*Determination of Precise Satellite Orbits and Geodetic Parameters using Satellite Laser Ranging*. Geodätisch-geophysikalische Arbeiten in der Schweiz, vol. 93, pp. 250, ISBN: 978-83-938898-0-8

<https://books.google.pl/books?id=7o6NAwAAQBAJ&num=20>

[6] Fritsche, M., K. Sośnica, C. Rodríguez-Solano, P. Steigenberger, R. Dietrich, R. Dach, K. Wang, U. Hugentobler, M. Rothacher; 2014: *Homogeneous reprocessing of GPS, GLONASS and SLR observations*. Journal of Geodesy 88(7), 625-642. DOI 10.1007/s00190-014-0710-3, (IF=2,699, IF<sub>5y</sub>=3,329, I<sub>pMNI</sub>SW=40),

<http://link.springer.com/article/10.1007/s00190-014-0710-3>

[7] Sośnica, K., C.J. Rodríguez-Solano, D. Thaller, A. Jäggi, R. Dach, G. Beutler; 2014:

*Impact of Earth Radiation Pressure on LAGEOS Orbits and on the Global Scale*.

Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan

<http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw18/docs/papers/Posters/13-Po22-Sosnica.pdf>

[8] Sośnica, K., C. Baumann, D. Thaller, A. Jäggi, R. Dach; 2014: *Combined LARES-LAGEOS Solutions*. Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan.

<http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw18/docs/papers/Posters/13-Po57-Sosnica.pdf>

---

<sup>5</sup> artykuły opublikowane przed uzyskaniem stopnia doktora zostały oznaczone indeksem <sup>P</sup>



- [9] Sośnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, U. Meyer, C. Baumann, R. Dach, G. Beutler; 2014: *Earth gravity field recovery using GPS, GLONASS, and SLR satellites*. Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan <http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session2/13-01-08-Sosnica.pdf>
- [10] Sośnica, K., A. Jäggi, D. Thaller, R. Dach, G. Beutler, C. Baumann; 2014: *SLR-derived terrestrial reference frame using the observations to LAGEOS-1/2, Starlette, Stella, and AJISAI*. Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan <http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session2/13-01-14-Sosnica.pdf>
- [11] Thaller, D., K. Sośnica, R. Dach, A. Jäggi, G. Beutler, M. Mareyen, B. Richter; 2014: *Geocenter coordinates from GNSS and combined GNSS-SLR solutions using satellite co-locations*. Earth on the Edge: Science for a Sustainable Planet, International Association of Geodesy Symposia, vol. 139, 2014, pp. 129-134, DOI 10.1007/978-3-642-37222-3\_16 [http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-37222-3\\_16](http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-642-37222-3_16)
- [12] Thaller, D., O. Roggenbuck, K. Sośnica, P. Steigenberger, M. Mareyen, Ch. Baumann, R. Dach, A. Jäggi; 2014: *SLR-GNSS analysis in the framework of the ITRF2013 computation*. Proceedings of the 18th International Workshop on Laser Ranging, Fujiyoshida, Japan <http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw18/docs/papers/Session1/13-01-05-Thaller.pdf>
- [13<sup>P</sup>] Sośnica, K., D. Thaller, R. Dach, A. Jäggi, G. Beutler; 2013: *Impact of loading displacements on SLR-derived parameters and on the consistency between GNSS and SLR results*. Journal of Geodesy, vol. 87(8), pp. 751-769, DOI 10.1007/s00190-013-0644-1, (IF=3,917, IF<sub>Sy</sub>=3,440, I<sub>pMNI</sub>SW=40), <http://link.springer.com/article/10.1007/s00190-013-0644-1>
- [14<sup>P</sup>] Jäggi, A., H. Bock, D. Thaller, K. Sośnica, U. Meyer, C. Baumann, R. Dach; 2013: *Precise Orbit Determination of Low Earth Satellites at AIUB using GPS and SLR data*. ESA Special Publications 722, Papers from the ESA Living Planet Symposium 2013, Edinburgh, United Kingdom, December 2013, [http://www.bernese.unibe.ch/publist/2013/artproc/ESA\\_LP\\_jaggi.pdf](http://www.bernese.unibe.ch/publist/2013/artproc/ESA_LP_jaggi.pdf)
- [15<sup>P</sup>] Sośnica, K., D. Thaller, A. Jäggi, R. Dach, G. Beutler; 2012: *Sensitivity of Lageos Orbits to Global Gravity Field Models*. Artificial Satellites Journal of Planetary Geodesy, 47(2), pp. 47-65, DOI 10.2478/v10018-012-0013-y, (I<sub>pMNI</sub>SW=8) <http://www.degruyter.com/view/j/arsa.2012.47.issue-2/v10018-012-0013-y/v10018-012-0013-y.xml>
- [16<sup>P</sup>] Jäggi, A., K. Sośnica, D. Thaller, G. Beutler; 2012: *Validation and estimation of low-degree gravity field coefficients using LAGEOS*. Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie Band 48, "Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, Extending the Range", May 16-20, 2011 Bad Koetzing, Germany; vol. 48, pp. 302-304; ISSN 1436-3445; ISBN 978-3-89888-999-5 [http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/papers/posters/06-ILRSWS\\_jaeggi.pdf](http://cddis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/papers/posters/06-ILRSWS_jaeggi.pdf)
- [17<sup>P</sup>] Sośnica, K., D. Thaller, R. Dach, A. Jäggi, G. Beutler; 2012: *Availability of SLR Normal Points at ILRS Data Centers*. Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie Band 48, "Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, Extending the Range", May 16-20, 2011 Bad Koetzing, Germany; vol. 48, pp. 365-368; ISSN 1436-3445; ISBN 978-3-89888-999-5 [http://www.bernese.unibe.ch/publist/2012/artproc/proceedings\\_sosnica.pdf](http://www.bernese.unibe.ch/publist/2012/artproc/proceedings_sosnica.pdf)

- [18<sup>P</sup>] Sośnica, K., D. Thaller, R. Dach, A. Jäggi, C. Baumann, G. Beutler; 2012:  
*The Blue-Sky effect*. Proceedings of the International Technical Laser Workshop 2012 (ITLW-12), Frascati (Rome), Italy, November 5-9, 2012  
[http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/4thursday/7\\_7sosnica/article\\_sosnika.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/4thursday/7_7sosnica/article_sosnika.pdf)
- [19<sup>P</sup>] Sośnica, K., D. Thaller, A. Jäggi, R. Dach, C. Baumann, G. Beutler; 2012:  
*Can we improve LAGEOS solutions by combining with LEO satellites?* Proceedings of the International Technical Laser Workshop 2012 (ITLW-12), Frascati (Rome), Italy, November 5-9, 2012  
[http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3\\_4\\_8sosnica/sosnica\\_1.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3_4_8sosnica/sosnica_1.pdf)
- [20<sup>P</sup>] Thaller D., K. Sośnica, R. Dach, A. Jäggi, G. Beutler; 2012: *LAGEOS-ETALON solutions using the Bernese Software*. Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie Band 48, "Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, Extending the Range", May 16-20, 2011 Bad Koetzing, Germany; vol. 48, pp. 333-336; ISSN 1436-3445; ISBN 978-3-89888-999-5  
[http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/papers/posters/14-proceedings\\_thaller\\_lageos.pdf](http://cdis.gsfc.nasa.gov/lw17/docs/papers/posters/14-proceedings_thaller_lageos.pdf)
- [21<sup>P</sup>] Thaller D., K. Sośnica, R. Dach, A. Jäggi, M. Mareyen, B. Richter, G. Beutler; 2012: *GNSS satellites as co-locations for a combined GNSS and SLR analysis*. Mitteilungen des Bundesamtes fuer Kartographie und Geodäsie Band 48, "Proceedings of the 17th International Workshop on Laser Ranging, Extending the Range", May 16-20, 2011 Bad Koetzing, Germany; vol. 48, pp. 82-86; ISSN 1436-3445; ISBN 978-3-89888-999-5  
[http://www.bernese.unibe.ch/publist/2012/artproc/proceedings\\_thaller\\_slr-gnss.pdf](http://www.bernese.unibe.ch/publist/2012/artproc/proceedings_thaller_slr-gnss.pdf)
- [22<sup>P</sup>] Thaller, D., K. Sośnica, R. Dach, A. Jäggi, C. Baumann; 2012:  
*The space tie between GNSS and SLR*. Proceedings of the International Technical Laser Workshop 2012 (ITLW-12), Frascati (Rome), Italy, November 5-9, 2012  
[http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3\\_4\\_9thaller/thaller\\_1.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3_4_9thaller/thaller_1.pdf)
- [23<sup>P</sup>] Thaller, D., K. Sośnica, R. Dach, A. Jäggi, C. Baumann; 2012:  
*SLR residuals to GPS / GLONASS and combined GNSS-SLR analysis*. Proceedings of the International Technical Laser Workshop 2012 (ITLW-12), Frascati (Rome), Italy, November 5-9, 2012  
[http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/3wednesday/11\\_thaller/thaller\\_1.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/3wednesday/11_thaller/thaller_1.pdf)
- [24<sup>P</sup>] Baumann C., K. Sośnica, D. Thaller, A. Jäggi, R. Dach, M. Mareyen; 2012:  
*LARES: Analysis of the first months of data*. Proceedings of the International Technical Laser Workshop 2012 (ITLW-12), Frascati (Rome), Italy, November 5-9, 2012  
[http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3\\_4\\_6baumann/baumann\\_1.pdf](http://www.lnf.infn.it/conference/laser2012/2tuesday/3_4_6baumann/baumann_1.pdf)
- [25<sup>P</sup>] Sośnica, K.,  
*Application of the wavelet transform to filtering Airborne Laser Scanning data*.  
 Proceedings of the 12th Professional Conference of Postgraduate Students Juniorstav 2010, Brno, Czech Republic, 24.02.2010,  
[http://www.igig.up.wroc.pl/download/Sosnica\\_Krzysztof\\_Juniorstav2010.pdf](http://www.igig.up.wroc.pl/download/Sosnica_Krzysztof_Juniorstav2010.pdf)

[26<sup>P</sup>] Borkowski, A., **K. Sońnica**; 2009:

*Zastosowanie dyskretnej transformacji falkowej do filtracji danych lotniczego skaningu laserowego.*

Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 20 (2009), pp. 35-45, (Ip<sub>MNISW</sub>=6)

<http://yadda.icm.edu.pl/yadda/element/bwmeta1.element.baztech-3af2bbbe-3687-444b-9da6-a0bc1a38c8f1>

