Tomasz Liwosz
Politechnika Warszawska
Wydział Geodezji i Kartografii
Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa
email: `tomasz.liwosz@pw.edu.pl`

Autoreferat

1. Imię i nazwisko

Tomasz Liwosz

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

2005 Stopień naukowy doktora nauk technicznych w zakresie geodezji i kartografii. Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska. Tytuł rozprawy: *System automatycznego opracowania obserwacji GPS dla użytkowników indywidualnych.* Promotor: Prof. dr hab. inż. Jerzy B. Rogowski.

2000 Tytuł zawodowy magistra inżyniera w zakresie geodezyjnych pomiarów podstawowych. Wydział Geodezji i Kartografii, Politechnika Warszawska.

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

Miejsce zatrudnienia

Politechnika Warszawska
Wydział Geodezji i Kartografii
Katedra Geodezji i Astronomii Geodezyjnej
Pl. Politechniki 1
00–661 Warszawa

Historia zatrudnienia

2005- Adiunkt w Katedrze Geodezji i Astronomii Geodezyjnej na Wydziale Geodezji i Kartografii.

2004-2005 Asystent w Katedrze Geodezji i Astronomii Geodezyjnej na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej.

4. Wskazanie osiągnięcia naukowego

Jako osiągnięcie naukowe wynikające 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311.) przedkładam monografię wydaną w roku 2017:

> Tomasz Liwosz, *Wpływ niepływowych efektów obciążeniowych na współrzędne punktów i realizację układu odniesienia w regionalnej sieci GPS*, Prace Naukowe Geodezja z. 56, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, ISBN 978--83-7814-695-7, język polski ze streszczeniem w języku angielskim. Recenzent wydawniczy: prof. dr hab. inż. Jerzy B. Rogowski.

4.1. Omówienie celu naukowego pracy i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

W przedstawionej monografii zająłem się zbadaniem wpływu modelowania niepływowych efektów obciążeniowych podczas opracowania obserwacji GPS (Globalny System Pozycjonowania, ang. *Global Positioning System*) na współrzędne punktów w regionalnej sieci GPS. Monografia stanowi podsumowanie moich wieloletnich doświadczeń związanych z opracowaniem obserwacji GPS, kombinacją rozwiązań GPS, realizacją układu odniesienia oraz analizą szeregów czasowych współrzędnych GPS.

Punkty na powierzchni Ziemi podlegają rozmaitym efektom geodynamicznym, które powodują ich przemieszczenia i deformację skorupy ziemskiej. Efekty te można podzielić na efekty wywołane siłami grawitacyjnymi (efekty pływowe) oraz na efekty wywołane niepływowym naciskiem mas atmosfery, wody kontynentalnej i oceanów na powierzchnię Ziemi (niepływowe efekty obciążeniowe). Efekty pływowe, jak na przykład pływy Ziemi stałej czy pływy oceaniczne, są dobrze poznane oraz opisane przy pomocy konwencjonalnych modeli, których dokładność szacuje się na poziomie 1 mm [*Ray i in.*, 2007; *Petit i Luzum*, 2010]. Wysoka dokładność modeli pływowych powoduje, że są one standardowo używane a priori podczas redukcji obserwacji geodezyjnych technik satelitarno-kosmicznych takich jak GPS, laserowe pomiary odległości do satelitów (SLR, ang. *Satellite Laser Ranging*), czy interferometria wielkobazowa (VLBI, ang. *Very Long Baseline Interferometry*), w celu wyznaczania współrzędnych stacji śledzących oraz innych parametrów (np. orbit satelitów, parametrów ruchu obrotowego Ziemi). Dokładność aktualnych modeli dla niepływowych efektów obciążeniowych jest niższa niż modeli dla efektów pływowych. Z tego powodu efekty obciążeniowe nie są uwzględniane w rutynowych opracowaniach obserwacji wspomnianych technik satelitarno-kosmicznych. Niemniej, zaleca się aby badania nad wpływem tych efektów na rozwiązania uzyskiwane przy pomocy technik satelitarno-kosmicznych były prowadzone (np. *Ray i in.* [2007]; *Collilieux i in.* [2012]). Zakres zmian wysokości punktów z powodu wszystkich niepływowych efektów obciążeniowych łącznie jest znaczący i może wynieść ok. 40 mm na powierzchni Ziemi (w Europie ok. 30 mm). Wysoka, milimetrowa, dokładność pomiarów uzyskiwana przez współczesne techniki geodezyjne powoduje, że efekty obciążeniowe są widoczne we współrzędnych punktów wyznaczanych przy pomocy

tych technik. Obecność niepływowych efektów obciążeniowych została także potwierdzona w wynikach otrzymywanych zarówno przy pomocy GPS [*Van Dam i in.*, 2001; *Tregoning i van Dam*, 2005; *Dach i in.*, 2011], SLR [*Bock i in.*, 2005; *Sośnica i in.*, 2013], jak i VLBI [*Van Dam i Wahr*, 1987; *Petrov i Boy*, 2004; *Eriksson i MacMillan*, 2014]. Analizowano wpływ modelowania niepływowego obciążenia powierzchni Ziemi atmosferą [*Dach i in.*, 2011; *Sośnica i in.*, 2013], wodą kontynentalną [*Van Dam i in.*, 2001; *Rajner i Liwosz*, 2012; *Eriksson i MacMillan*, 2014], oceanami [*Williams i Penna*, 2011; *Van Dam i in.*, 2012], a także wszystkich efektów łącznie [*Collilieux i in.*, 2010, 2012]. Stosowanie modeli efektów obciążeniowych podczas redukcji obserwacji satelitarno-kosmicznych (lub jako poprawek do współrzędnych wynikowych) prowadzi m.in. do poprawy powtarzalności szeregów czasowych współrzędnych oraz zmniejszenia amplitud sygnałów o okresie rocznym. Uwzględnianie efektów obciążeniowych w wynikach technik geodezyjnych powinno prowadzić także do wyznaczania dokładniejszych długookresowych ziemskich układów odniesienia (np. ITRF, ang. *International Terrestrial Reference Frame*) [*Collilieux i in.*, 2010]. Jest to szczególnie istotne w kontekście wyzwań jakie stoją przed geodezją aby wyznaczać ziemskie układy odniesienia z dokładnością 1 mm oraz stabilnością długookresową 0.1 mm/y [*Plag i in.*, 2009].

4.1.1. Motywacja

Wyniki przedstawiające wpływ modelowania efektów obciążeniowych na rozwiązania GPS publikowane w literaturze światowej dotyczą głównie sieci globalnych lub dotyczą jednego wybranego efektu obciążeniowego. W sieciach regionalnych GPS, zarówno odchylenia standardowe szeregów czasowych współrzędnych jak i amplitudy sygnałów rocznych obecnych w tych szeregach są zazwyczaj mniejsze niż w sieciach globalnych. Dzieje się tak, ponieważ szeregi czasowe współrzędnych w sieci regionalnej zależą od jej wielkości (tzw. efekt sieci). Ponadto, interpretacja szeregów czasowych współrzędnych w sieci regionalnej może być utrudniona, ponieważ także fazy sygnałów rocznych w rozwiązaniach regionalnych mogą różnić się od faz sygnałów rocznych w rozwiązaniach globalnych [*Legrand i in.*, 2012]. Ponieważ efekty obciążeniowe zawierają także sygnały roczne (zwłaszcza efekt obciążeniowy z powodu wody kontynentalnej), to modelowanie efektów obciążeniowych podczas opracowania obserwacji GPS może przyczynić się do lepszej interpretacji zmienności szeregów czasowych współrzędnych.

Obecnie istnieje kilka serwisów które publikują poprawki deformacyjne dla wspomnianych niepływowych efektów obciążeniowych. Serwisy te korzystają zazwyczaj z różnych danych źródłowych oraz stosują odmienne podejścia do policzenia deformacji. Porównanie udostępnianych modeli oraz analiza ich wpływu na wyniki GPS ma istotne znaczenie w ocenie dokładności tych modeli, a także w zwiększaniu wiedzy odnośnie interpretacji wyników uzyskiwanych przy pomocy GPS.

Powyższe argumenty skłoniły mnie do zbadania wpływu niepływowych efektów obciążeniowych na wyniki współrzędnych uzyskiwanych w regionalnej sieci GPS. Ponadto, przyjąłem założenie, że modelowanie wszystkich niepływowych efektów obciążeniowych, a nie tylko wybranego, pozwoli lepiej opisać zmienność współrzędnych punktów GPS i umożliwi pełniejszą interpretację wpływu poszczególnych efektów na wyniki GPS.

4.1.2. Cel i zakres pracy

W pracy przyjąłem tezę, że modelowanie niepływowych efektów deformacyjnych wywołanych obciążeniem powierzchni Ziemi atmosferą, oceanami i wodą kontynentalną podczas opracowania obserwacji GPS w sieci regionalnej, prowadzi do poprawy dokładności wyznaczanych współrzędnych i prędkości punktów, umożliwia lepszą interpretację zmienności szeregów czasowych współrzędnych oraz przyczynia się do lepszego zrozumienia własności regionalnych sieci GPS.

W celu wykazania słuszności powyższej tezy przeprowadziłem wszechstronną analizę wpływu modelowania wszystkich wspomnianych powyżej niepływowych efektów obciążeniowych (w różnych konfiguracjach) na pozycje i prędkości punktów w regionalnej permanentnej sieci GPS oraz na realizację geodezyjnego układu odniesienia. Przeanalizowałem także wpływ modelowania efektów obciążeniowych na szeregi czasowe współrzędnych GPS, a w szczególności na powtarzalność współrzędnych, zawarte w nich okresowości, a także na strukturę szumu stochastycznego. Poprawki obciążeniowe stosowałem na poziomie obserwacji GPS, tzn. jako poprawki do chwilowych współrzędnych punktów (metoda a priori). Dodatkowo, wykonałem także analizy stosując poprawki obciążeniowe (uśrednione w ramach sesji obserwacyjnej) do wyrównanych współrzędnych punktów (metoda a posteriori). Metoda a priori pozwala uwzględnić zmienność w czasie poprawek obciążeniowych podczas trwania sesji obserwacyjnej oraz zastosować je tylko wówczas, jeśli w danej epoce została wykonana obserwacja. Z kolei metoda a posteriori ma tę zaletę, że umożliwia testowanie różnych modeli obciążeniowych bez potrzeby ponownego wyrównania obserwacji GPS, które bywa bardzo czasochłonne. Wszystkie przeprowadzone w pracy analizy wykonałem z wykorzystaniem modeli obciążeniowych udostępnianych przez trzy serwisy: NASA (ang. *National Aeronautics and Space Administration, Goddard Flight Space Center*), IMLS (ang. *International Mass Loading Service*) oraz TUW (Uniwersytet Techniczny w Wiedniu). Umożliwiło to ocenę spójności rozwiązań GPS otrzymanych przy użyciu różnych modeli, a także pozwoliło wybrać model, który najlepiej opisuje dany efekt obciążeniowy.

Współrzędne GPS, które poddałem analizie, otrzymałem w wyniku własnego opracowania ciągłych obserwacji GPS zarejestrowanych na 51 punktach Europejskiej Sieci Permanentnej (EPN, *EUREF Permanent Network*) w okresie 10 lat (2003–2012) za pomocą oprogramowania Bernese GNSS Software 5.2 [*Dach i in.*, 2015]. Punkty GPS dobrałem starannie pod względem lokalizacji oraz kompletności i jakości danych obserwacyjnych.

4.1.3. Najważniejsze wyniki i wnioski

Celem niniejszej pracy było przeanalizowanie wpływu modelowania niepływowych efektów obciążeniowych podczas opracowania obserwacji GPS na współrzędne punktów GPS w sieci regionalnej. Analizie poddałem szeregi czasowe dobowych i tygodniowych współrzędnych GPS, prędkości stacji oraz szeregi czasowe parametrów transformacji wyznaczone pomiędzy rozwiązaniami dobowymi i rozwiązaniami długookresowymi. Rozwiązania długookresowe zostały wyznaczone za pomocą oprogramowania CATREF [*Altamimi i in.*, 2016]. Jednym

z parametrów, który wykorzystałem do oceny wpływu modelowania efektów obciążeniowych na powtarzalność szeregów czasowych współrzędnych była średnia kwadratowa ważona (WRMS, ang. *Weighted Root Mean Square*).

Modelowanie efektu z powodu obciążenia powierzchni Ziemi atmosferą (ATM) spowodowało zmniejszenie WRMS składowej wysokościowej w rozwiązaniach dobowych średnio o 6.3% dla modeli NASA i IMLS i o 6.0% dla modelu TUW. Pomimo ogólnie wysokiej zgodności wszystkich testowanych modeli ATM, najlepsze wyniki zaobserwowałem dla rozwiązania z modelem IMLS, w którym dla największej liczby stacji uzyskałem najmniejszy błąd WRMS. Największe różnice WRMS (maksymalnie 0.15 mm) dla składowej wysokościowej pomiędzy trzema rozwiązaniami z testowanymi modelami ATM zaobserwowałem dla kilku stacji położonych w okolicy Morza Północnego (prawdopodobnie w wyniku niedokładności hipotezy odwróconego barometru) i Morza Bałtyckiego (prawdopodobnie z powodu różnego traktowania tego zbiornika wodnego przy wyznaczaniu poprawek deformacyjnych przez poszczególne serwisy: ocean lub ląd). Dla tych stacji najlepsze wyniki uzyskałem dla rozwiązania z zastosowanym modelem NASA, który ma 10-krotnie mniejszą rozdzielczość przestrzenną niż modele IMLS i TUW. Różnice pomiędzy szeregami czasowymi współrzędnej wysokościowej uzyskanymi w rozwiązaniach z modelowanym efektem ATM przy wykorzystaniu modeli NASA, IMLS i TUW dla większości stacji nie przekraczały 1 mm. Wyjątkiem była szwedzka stacja położona na Gotlandii na Morzu Bałtyckim, dla której zwiększone residua (dochodzące nawet do 6 mm) wystąpiły pomiędzy rozwiązaniem z modelem NASA, a pozostałymi rozwiązaniami. Także dla kilku stacji położonych na wybrzeżu Morza Północnego otrzymałem różnice dochodzące do 2 mm.

Modelowanie efektu z powodu obciążenia powierzchni Ziemi wodą kontynentalną (HYD) podczas opracowania obserwacji GPS spowodowało średnie zmniejszenie WRMS składowej wysokościowej w rozwiązaniach dobowych o 2.1% dla modelu NASA (zmniejszenie dla 78% stacji) i o 1.2% dla modelu IMLS (zmniejszenie WRMS dla 73% stacji). Dla ok. 70% stacji maksymalne różnice współrzędnej wysokościowej pomiędzy rozwiązaniami z wykorzystanym modelem NASA i IMLS wynosiły od 1 do 2 mm. Modelowanie efektu OCN spowodowało niewielką poprawę średniej wartości WRMS składowej wysokościowej: 0.6% dla modelu NASA i 0.9% dla modelu IMLS. Niemniej, dla stacji położonej na wyspie Helgoland (Niemcy) na Morzu Północnym zmniejszenie WRMS wyniosło aż 18% (dla modelu IMLS). Dla większości stacji położonych w pobliżu wybrzeży Morza Północnego, gdzie wpływ efektu OCN jest największy, lepsze wyniki uzyskano dla modelu IMLS. Z kolei w rejonie Morza Bałtyckiego model IMLS okazał się znacznie mniej dokładny od modelu NASA; dla stacji położonej na Gotlandii (Szwecja), pogorszenie WRMS wyniosło 10% (w przypadku modelu NASA wystąpiła niewielka poprawa WRMS o 1%). Łączne modelowanie wszystkich efektów obciążeniowych spowodowało największą redukcję WRMS w stosunku do rozwiązań standardowych: 9.8% dla modeli NASA (zmniejszenie dla 98% stacji) i nieco mniej, 9.6%, dla modeli IMLS (zmniejszenie wystąpiło dla wszystkich stacji). Modelowanie wszystkich efektów obciążeniowych pozwoliło więc najlepiej opisać zmienność położenia punktów GPS w analizowanej sieci. Wskazuje to na istotność modelowania wszystkich efektów obciążeniowych podczas opracowania obserwacji GPS.

Zbadałem również wpływ modelowania efektów obciążeniowych na parametry transformacji (przesunięcia, obroty i skala), które wyznaczyłem pomiędzy dobowymi rozwiązaniami GPS, a rozwiązaniem długookresowym (kombinowanym). Modelowanie efektu ATM zmniejszyło rozrzut szeregów czasowych parametrów transformacji oraz uwydatniło w szeregu czasowym skali sygnał roczny. Z kolei modelowanie efektu HYD spowodowało usunięcie sygnału rocznego z szeregu czasowego skali. W wyniku modelowania wszystkich efektów łącznie, otrzymano mniejsze odchylenia standardowe dla szeregów czasowych wszystkich parametrów transformacji. Modelowanie efektów obciążeniowych pozwoliło zatem uzyskać dokładniejsze układy odniesienia realizowane przez dobowe rozwiązania GPS. Wykazałem również, że z powodu tzw. *efektu sieci*, konieczne jest wyznaczanie siedmiu parametrów transformacji (trzech składowych przesunięcia, trzech kątów obrotu oraz skali) podczas tworzenia rozwiązania kombinowanego.

Modelowanie efektów obciążeniowych nie wpłynęło istotnie na układ odniesienia zrealizowany na podstawie 10-letnich obserwacji. Modelowanie wszystkich efektów obciążeniowych łącznie spowodowało największe zmniejszenie błędów prędkości punktów GPS, które dla wszystkich składowych wyniosło 7% i aż 23%, jeśli dodatkowo podczas wyznaczania prędkości wyznaczano także wyrazy o okresie rocznym i półrocznym. Takie samo zmniejszenie błędów prędkości otrzymano niezależnie od rozpiętości czasowej danych używanych podczas tworzenia rozwiązań długookresowych.

Szeregi czasowe współrzędnych przeanalizowałem także pod względem występujących w nich okresowości. W standardowych szeregach zaobserwowano sygnały o okresach rocznym i półrocznym, a także sygnały o okresie roku drakonicznego GPS i jego harmonicznych do szóstej włącznie. Modelowanie efektów obciążeniowych nie wpłynęło znacząco ani na okresowości, ani na wartości amplitud sygnałów rocznych i półrocznych. Niemniej, modelowanie efektu HYD pozwoliło lepiej zinterpretować szeregi czasowe współrzędnej wysokościowej dla dwóch stacji położonych we Włoszech. Z powodu efektu sieci, w standardowych szeregach czasowych składowej wysokościowej dla tych stacji pojawił się sztuczny sygnał roczny o zbyt dużej amplitudzie. Modelowanie efektu HYD spowodowało znaczne zmniejszenie amplitud sygnałów rocznych oraz pozwoliło lepiej zinterpretować mechanizm ich powstawania w sieci regionalnej. Dla dwóch bliskich stacji w Józefosławiu, modelowanie efektu HYD (który jest taki sam dla obu stacji) wpłynęło w różny sposób na amplitudy sygnałów rocznych w składowej wysokościowej. Wskazuje to na istnienie innych sygnałów o okresie rocznym w szeregach współrzędnych tych stacji, które mogą być spowodowane czynnikami lokalnymi (np. wielodrożnością sygnału).

Wpływ efektów obciążeniowych na szeregi czasowe współrzędnych GPS zaobserwowałem także w wynikach analizy szumowej. Modelowanie efektu ATM w rozwiązaniach GPS spowodowało wzrost średniej amplitudy szumu białego oraz zmniejszenie amplitudy szumu potęgowego. Jednocześnie średnia wartość indeksu spektralnego zwiększyła się, co oznacza, że modelowanie efektu ATM uwydatniło większą korelację czasową w szeregach współrzędnych. Modelowanie efektu HYD z kolei spowodowało zmniejszenie indeksu spektralnego, co oznacza, że modelowanie tego efektu zmniejszyło korelację czasową w szeregach współrzędnych. Analiza szumowa wykazała także, że dla rozwiązań, w których modelowano

efekt HYD otrzymano lepsze dokładności wyznaczanych prędkości stacji. Najmniejsze błędy prędkości otrzymano dla rozwiązań, w których modelowano wszystkie efekty obciążeniowe łącznie.

Porównałem także dwa podejścia stosowania modeli obciążeniowych: 1) a priori, 2) a posteriori. Do wykonania rozwiązań kombinowanych a posteriori konieczna była modyfikacja kodów źródłowych oprogramowania CATREF. Uzyskałem wysoką zgodność WRMS dla szeregów czasowych współrzędnych w obydwóch podejściach, zarówno w przypadku rozwiązań dobowych, jak i tygodniowych. W różnicach szeregów czasowych współrzędnych z modelowanym efektem HYD, pomiędzy podejściem a priori i a posteriori, zaobserwowałem sygnał roczny o niewielkiej amplitudzie, która wyniosła maksymalnie 0.2 mm dla punktów położonych na obrzeżu analizowanej sieci. Podejście a posteriori (stosowanie uśrednionych poprawek do wyznaczonych współrzędnych) ma tę zaletę, iż umożliwia testowanie różnych modeli obciążeniowych bez potrzeby ponownej analizy obserwacji GPS, która bywa czasochłonna. Wobec stwierdzonych istotnych różnic pomiędzy szeregami czasowymi otrzymanymi przy wykorzystaniu różnych modeli opisujących dany efekt (dochodzących do kilku milimetrów), stosowanie podejścia a posteriori może być zatem bardziej zasadne.

Powyższe wyniki, dotyczące stosowania modeli efektów obciążeniowych podczas opracowania obserwacji GPS, pozwoliły uznać słuszność tezy postawionej w niniejszej pracy. Efekty obciążeniowe są wyraźnie widoczne w wynikach analizowanej sieci regionalnej GPS. Stwierdziłem zarówno poprawę dokładności wyznaczanych parametrów (lepsza powtarzalność współrzędnych, mniejsze błędy prędkości), jak i zdołałem, przy pomocy modelowania efektów obciążeniowych, wytłumaczyć wpływ efektu sieci na szeregi czasowe współrzędnych punktów GPS i parametrów transformacji w sieci regionalnej. Niemniej, uzyskane wyniki wykazały także dość znaczne różnice w szeregach czasowych współrzędnej wysokościowej (kilka milimetrów) pomiędzy rozwiązaniami, w których stosowano poprawki obciążeniowe z różnych serwisów. Przy czym, nie było możliwe jednoznaczne wskazanie najlepszego modelu. Dotyczy to zwłaszcza rozwiązań, w których wykorzystano efekt niepływowego obciążenia powierzchni Ziemi ocenami i wodą kontynentalną. Modele dla tych efektów wymagają udoskonalenia. Stwierdzone rozbieżności są zbyt duże (> 1 mm) aby rekomendować analizowane w tej pracy modele dla efektów obciążeniowych do stosowania ich w oficjalnych wynikach GPS. Innym podejściem, które pozwala uzyskać wyraźnie mniejsze błędy prędkości oraz lepszą powtarzalność współrzędnych w stosunku do rozwiązań standardowych, jest tworzenie rozwiązań długookresowych z jednoczesnym wyznaczaniem wyrazów sezonowych (rocznych i półrocznych). Podejście takie zostało wykorzystane przy tworzeniu najnowszej realizacji globalnego ziemskiego układu odniesienia – ITRF2014 [*Altamimi i in.*, 2016].

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych

Od wielu lat zajmuję się analizą obserwacji GNSS (ang. *Global Navigation Satellite Systems*) w sieciach regionalnych. Moje zainteresowania dotyczą badania rozmaitych efektów mających wpływ na współrzędne punktów oraz na realizację geodezyjnego układu odniesienia.

W 2011 roku opracowałem geodezyjny przestrzenny układ odniesienia (PL-ETRF2000) dla polskiej osnowy podstawowej [*Liwosz i in.*, 2011]. Układ ten został przyjęty przez Główny Urząd Geodezji i Kartografii jako oficjalny geodezyjny układ odniesienia w Polsce i obowiązuje do dzisiaj. Jestem także współautorem nowej realizacji układu odniesienia, która została stworzona w celu weryfikacji PL-ETRF2000 [*Liwosz i Ryczywolski*, 2016]. Nowy układ został zaakceptowany przez organizację EUREF jako najwyższej klasy zagęszczenie europejskiego geodezyjnego systemu odniesienia – ETRS89 (ang. *European Terrestrial Reference System 89*). Organizacja EUREF jest podkomisją Komisji 1 „Układy Odniesienia"Międzynarodowej Asocjacji Geodezji, której zadaniami są definicja, realizacja i utrzymanie ETRS89. Zadania te wykonywane są za pomocą sieci punktów permanentnie obserwujących satelity GNSS (EPN, ang. *EUREF Permanent Network*).

Prowadzę również prace nad testowaniem nowych strategii obliczeniowych opracowania obserwacji GNSS. Moje badania dotyczyły między innymi wpływu stosowania w obliczeniach modeli centrów fazowych anten naziemnych dla obserwacji GLONASS na współrzędne punktów i opóźnienie troposferyczne [*Liwosz*, 2013]. Praca ta wymagała zaawansowanej modyfikacji kodów źródłowych oprogramowania Bernese GNSS Software w wersji 5.0. Ponadto, w pracy *Liwosz* [2012] analizowałem współrzędne punktów GPS uzyskane w wyniku wyrównania obserwacji GPS w sieci regionalnej i globalnej. W pracy stwierdziłem rozbieżności pomiędzy polami prędkości uzyskanymi w obydwóch rozwiązaniach; stwierdziłem również mniejsze amplitudy wyrazów rocznych w szeregach czasowych współrzędnych w rozwiązaniach regionalnych. Z kolei tematyką wpływu niepływowych efektów obciążeniowych na współrzędne punktów GPS (będącej także tematyką mojej monografii wskazanej jako osiągnięcie naukowe), zajmowałem się także w pracach *Rajner i Liwosz* [2012]; *Liwosz* [2015]; *Zygmunt i in.* [2016]; *Rajner i Liwosz* [2017].

Od 2009 roku, w ramach współpracy z organizacją EUREF, prowadzę Centrum Analiz EPN (WUT EPN AC, ang. *Warsaw University of Technology EPN Analysis Centre*), które działa na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej od 1996 roku [*Liwosz*, 2016]. Centrum WUT zajmuje się regularną analizą obserwacji GNSS rejestrowanych na punktach EPN w celu wyznaczania ich precyzyjnych współrzędnych. Centrum WUT jest jednym z 16 centrów analiz w Europie, działających w organizacji EUREF. Rozwiązania tworzone przez WUT EPN AC są wykorzystywane do tworzenia oficjalnego geodezyjnego układu odniesienia dla Europy. Brałem także udział w pierwszym projekcie „EPN Reprocessing" mającym na celu ponowną analizę obserwacji GPS zarejestrowanych na punktach EPN w latach 1996–2006 oraz stworzenie dokładniejszego geodezyjnego układu odniesienia dla Europy. W ramach centrum analiz WUT prowadzone są także badania opóźnienia troposferycznego, które jest wyznaczane podczas opracowania obserwacji GPS [*Kruczyk i Liwosz*, 2012].

Od 2013 roku, w konsorcjum z naukowcami z Wojskowej Akademii Technicznej, prowadzę Centrum Kombinacji EUREF, które zajmuje się kombinacją współrzędnych uzyskiwanych przez wszystkie (16) centra obliczeniowe EUREF. Od początku 2016 roku, w ramach tej współpracy, pełnię funkcję koordynatora centrów analiz EPN (EPN ACC, ang. *EPN Analysis Centres Coordinator*). Jako koordynator, wykonuję oficjalne dobowe i tygodniowe rozwiązania kombinowane współrzędnych EPN, które służą do chwilowej realizacji ETRS89, a także są wykorzystywane do tworzenia oficjalnego, długookresowego rozwiązania EPN.

Rozwiązanie długookresowe EPN jest z kolei podstawowym układem odniesienia rekomendowanym przez EUREF do realizowania geodezyjnych układów odniesienia przez poszczególne kraje w Europie. Tworzone przeze mnie rozwiązania kombinowane współrzędnych punktów EPN są także używane przez Międzynarodową Służbę GNSS (IGS, ang. *International GNSS Service*) do tworzenia łącznego rozwiązania współrzędnych punktów globalnej sieci IGS i punktów należących do sieci regionalnych położonych na różnych kontynentach. Rozwiązania kombinowane EPN są również wykorzystywane w projekcie EPOS (ang. *European Plate Observing System*), który ma na celu stworzenie infrastruktury do integracji wszelkich danych oraz produktów przydatnych w badaniu procesów geofizycznych zachodzących na powierzchni i wewnątrz stałej Ziemi [*Bruyninx i in.*, 2017b; *Fernandes i in.*, 2017]. Oprócz wykonywania rutynowych kombinacji, prowadzę również badania nad poprawieniem spójności rozwiązań współrzędnych wykonywanych przez centra analiz EPN. Wprowadziłem nowy sposób kombinacji wykorzystujący dobowe współrzędne centrów analiz zamiast tygodniowych, który pozwala lepiej eliminować odstające residua współrzędnych i dzięki temu pozwala uzyskiwać spójniejsze współrzędne kombinowane punktów EPN [*Bruyninx i in.*, 2017a; *Liwosz i Araszkiewicz*, 2017a]. Ponadto, wprowadziłem również ujednolicenie sposobu modelowania opóźnienia troposferycznego pomiędzy centrami analiz EPN, które pozwoli uzyskać lepszą zgodność współrzędnych centrów analiz oraz lepszą interpretację geofizyczną szeregów czasowych kombinowanych współrzędnych EPN [*Liwosz i Araszkiewicz*, 2017b].

Od 2015 roku uczestniczę w międzynarodowym projekcie naukowym Europejskiej Agencji Kosmicznej (ESA, ang. *European Space Agency*) – GalAc (ang. *Galileo and Accelerometry*) realizowanym w Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk [*Kalarus i in.*, 2016; *Wielgosz i in.*, 2017]. Projekt ma na celu przeanalizowanie czy umieszczenie akcelerometrów na pokładach satelitów Galileo może przyczynić się do poprawy dokładności wyznaczania orbit tych satelitów. W projekcie GalAc współtworzyłem koncepcję przeanalizowania wpływu danych rejestrowanych przez akcelerometr na wyznaczane orbity sztucznych satelitów GNSS. Zajmowałem się również modyfikacją kodów źródłowych oprogramowania Bernese GNSS Software 5.2, aby umożliwić wykorzystanie w nim danych z akcelerometru podczas wyznaczania orbit GNSS.

W latach 2001–2008 brałem udział w międzynarodowym projekcie geodynamicznym dla Europy Środkowej – CERGOP (ang. *Central Europe Regional Geodynamics Project*), np. *Hefty i in.* [2009]. W projekcie tym zajmowałem się opracowaniem obserwacji GPS zarejestrowanych podczas okresowych kampanii obserwacyjnych wykonanych w latach 1994–2007.

Od roku 2000 do chwili obecnej zajmuję się także prowadzeniem ciągłych obserwacji GNSS na punktach znajdujących się w Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnym Politechniki Warszawskiej w Józefosławiu, które należą do międzynarodowych sieci geodezyjnych (IGS, EPN) [*Kruczyk i Liwosz*, 2016].

Inna działalność naukowo-organizacyjna:

- członkostwo w Radzie Nadzorczej EUREF (ang. *EUREF Governing Board*),
- członkostwo w konsorcjum EPOS-GNSS,

- członkostwo w komitecie naukowym międzynarodowej konferencji poświęconej centrom analiz EPN (ang. *EPN Analysis Centres Workshop*), która odbyła się w Brukseli w 2017 roku,
- recenzowanie artykułów naukowych w czasopismach znajdujących się na liście JCR (ang. *Journal Citation Reports*),
- w latach 2010–2012 redaktor naczelny czasopisma *Reports on Geodesy* wydawanego na Wydziale Geodezji i Kartografii Politechniki Warszawskiej.

Literatura

Altamimi, Z., P. Rebischung, L. Métivier, X. Collilieux (2016), ITRF2014: A new release of the International Terrestrial Reference Frame modeling nonlinear station motions, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *121*(8), 6109–6131, 2016JB013098, doi: 10.1002/2016JB013098.

Bock, D., R. Noomen, H.-G. Scherneck (2005), Atmospheric pressure loading displacement of SLR stations, *Journal of Geodynamics*, *39*(3), 247 – 266, doi: http://dx.doi.org/10.1016/j.jog.2004.11.004.

Bruyninx, C., A. Araszkiewicz, E. Brockmann, A. Kenyeres, T. Liwosz, R. Pacione, W. Söhne, G. Stangl, K. Szafranek, C. Völksen (2017a), EUREF Permanent Network, [W:] *IGS 2016 Technical Reports*, red. A. Villiger i R. Dach, s. 95–103, University of Bern, Bern Open Publishing, doi:10.7892/boris.99278.

Bruyninx, C., J. Legrand, J. Dousa, R. Fernandes, A. Kenyeres, M. Lidberg, T. Liwosz, W. Söhne (2017b), EUREF's contribution to the European Plate Observing System, Referat wygłoszony na Sympozjum EUREF, 17–19 maja, 2017, Wrocław.

Collilieux, X., Z. Altamimi, D. Coulot, T. Van Dam, J. Ray (2010), Impact of loading effects on determination of the international terrestrial reference frame, *Advances in Space Research*, *45*(1), 144 – 154, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2009.08.024.

Collilieux, X., T. Van Dam, J. Ray, D. Coulot, L. Métivier, Z. Altamimi (2012), Strategies to mitigate aliasing of loading signals while estimating GPS frame parameters, *Journal of Geodesy*, *86*(1), 1–14, doi:10.1007/s00190-011-0487-6.

Dach, R., J. Böhm, S. Lutz, P. Steigenberger, G. Beutler (2011), Evaluation of the impact of atmospheric pressure loading modeling on GNSS data analysis, *Journal of Geodesy*, *85*(2), 75–91, doi:10.1007/s00190-010-0417-z.

Dach, R., S. Lutz, P. Fridez, P. Walser (2015), *Bernese GNSS Software, Version 5.2*, Astronomical Institute, University of Bern.

Eriksson, D., D. S. MacMillan (2014), Continental hydrology loading observed by VLBI measurements, *Journal of Geodesy*, *88*(7), 675–690, doi:10.1007/s00190-014-0713-0.

Fernandes, R., M. Bos, C. Bruyninx, P. Crocker, J. Dousa, A. Socquet, A. Walpersdorf, A. Avallone, A. Ganas, B. Gunnar, C. Ionescu, A. Kenyeres, H. Ozener, M. Vergnolle, M. Lidberg, T. Liwosz, W. Soehne (2017), EPOS-GNSS – Improving the infrastructure for GNSS data and products in Europe, Konferencja: European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, April 17–22 2017.

Hefty, J., L. Gerhatova, M. Becker, R. Drescher, G. Stangl, S. Krauss, A. Caporali, T. Liwosz, R. Kratochvil (2009), Long-Term Densification of Terrestrial Reference Frame in Central Europe as the Result of Central Europe Regional Geodynamic Project 1994-2006, [W:] *Geodetic Reference Frames: IAG Symposium Munich, Germany, 9-14 October 2006*, red. H. Drewes, s. 149–154, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-00860-3_23.

Kalarus, M., K. Sośnica, A. Wielgosz, T. Liwosz, J. Zieliński (2016), Possible advantages of equipping GNSS satellites with on-board accelerometers, IAG Commission 4 Positioning and Applications Symposium, Wroclaw University of Environmental and Life Sciences, Wroclaw, Poland, September 4–7, 2016.

Kruczyk, M., T. Liwosz (2012), Tropospheric delay from EPN reprocessing by WUT LAC as valuable data source – in comparison to operational EPN products and aerological data, *Reports on Geodesy*, *92*(1), 109–122.

Kruczyk, M., T. Liwosz (2016), Permanentne pomiary satelitarne w ramach IGS i EUREF i ich wyniki, [W:] *Udział Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego PW w Józefosławiu w europejskich i globalnych programach badawczych: ciągła służba pomiarowa*, red. M. Kruczyk, s. 25–47, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Legrand, J., N. Bergeot, C. Bruyninx, G. Wöppelmann, A. Santamaría-Gómez, M.-N. Bouin, Z. Altamimi (2012), *Comparison of Regional and Global GNSS Positions, Velocities and Residual Time Series*, s. 95–103, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-20338-1_12.

Liwosz, T. (2012), Processing of a regional EPN sub-network with global IGS sites at WUT EPN LAC, poster prezentowany na IGS Workshop, 23–29 lipca, 2012, Olsztyn.

Liwosz, T. (2013), Effect of the GLONASS-specific receiver antenna phase center corrections on the results of European regional GNSS network, *Artificial Satellites*, *48*(4), 191–203, doi:10.2478/v10018-013-0016.

Liwosz, T. (2015), Impact of non-tidal loading effects on regional GPS solutions, poster prezentowany na symposium Międzynarodowej Unii Geodezji i Geofizyki, 23.06-2.07 2017, Praga, Czechy.

Liwosz, T. (2016), Prace Centrum Analiz EUREF przy Politechnice Warszawskiej, [W:] *Udział Obserwatorium Astronomiczno-Geodezyjnego PW w Józefosławiu w europejskich i globalnych programach badawczych: ciągła służba pomiarowa*, red. M. Kruczyk, s. 48–65, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej.

Liwosz, T., A. Araszkiewicz (2017a), EPN Analysis Coordintor status report, Referat wygłoszony na Sympozjum EUREF, 17–19 maja, 2017, Wrocław.

Liwosz, T., A. Araszkiewicz (2017b), EPN Analysis Coordintor report, Referat wygłoszony na EPN Analysis Centres Workshop, 25–26 października, 2017, Bruksela, Belgia.

Liwosz, T., M. Ryczywolski (2016), Verification of the Polish geodetic reference frame by means of a new solution based on permanent GNSS data from the years 2011–2014, *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, *102*(1), 52–66, doi:https://doi.org/10.1515/rgg-2016-0027.

Liwosz, T., J. Rogowski, M. Kruczyk, M. Rajner, W. Kurka (2011), Wyrównanie kontrolne obserwacji satelitarnych GNSS wykonanych na punktach ASG-EUPOS, EUREF-POL, EUVN, POLREF i osnowy I klasy wraz z oceną wyników, raport techniczny dla Głównego Urzędu Geodezji i Kartografii, s. 269.

Petit, G., B. Luzum (Red.) (2010), *IERS Conventions (2010)*, IERS Technical Note 36, Verlag des Bundesamts für Kartographie und Geodäsie, Frankfurt am Main, Germany.

Petrov, L., J.-P. Boy (2004), Study of the atmospheric pressure loading signal in very long baseline interferometry observations, *Journal of Geophysical Research (Solid Earth)*, *109*, B03405, doi:10.1029/2003JB002500.

Plag, H.-P., Z. Altamimi, S. Bettadpur, G. Beutler, G. Beyerle, A. Cazenave, D. Crossley, A. Donnellan, R. Forsberg, R. Gross, J. Hinderer, A. Komjathy, C. Ma, A. Mannucci, C. Noll, A. Nothnagel, E. Pavlis, M. Pearlman, P. Poli, U. Schreiber, K. Senior, P. Woodworth, S. Zerbini, C. Zuffada (2009), *The goals, achievements, and tools of modern geodesy*, s. 15–88, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-02687-4_2.

Rajner, M., T. Liwosz (2012), Studies of crustal deformation due to hydrological loading on GPS height estimates, *Geodesy and Cartography*, *60*(2), 135 – 144, doi:10.2478/v10277-012-0012-y.

Rajner, M., T. Liwosz (2017), Analysis of seasonal position variation for selected GNSS sites in Poland using loading modelling and GRACE data, *Geodesy and Geodynamics*, *8*(4), 253 – 259, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.geog.2017.04.001.

Ray, P., Z. Altamimi, T. van Dam, T. Herring (2007), Principles for Conventional Contributions to Modeled Station Displacements, IERS Conventions Workshop, Sèvres, France, 20-21 September, 2007.

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*, *87*(8), 751–769, doi:10.1007/s00190-013-0644-1.

Tregoning, P., T. van Dam (2005), Atmospheric pressure loading corrections applied to GPS data at the observation level, *Geophysical Research Letters*, *32*(22), L22310, doi:10.1029/2005GL024104.

Van Dam, T., J. Wahr, P. Milly, A. Shmakin, G. Blewitt, D. Lavallée, K. Larson (2001), Crustal displacements due to continental water loading, *Geophysical Research Letters*, *28*(4), 651–654.

Van Dam, T., X. Collilieux, J. Wuite, Z. Altamimi, J. Ray (2012), Nontidal ocean loading: amplitudes and potential effects in GPS height time series, *Journal of Geodesy*, *86*(11), 1043–1057, doi:10.1007/s00190-012-0564-5.

Van Dam, T. M., J. M. Wahr (1987), Displacements of the earth's surface due to atmospheric loading: Effects on gravity and baseline measurements, *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, *92*(B2), 1281–1286, doi:10.1029/JB092iB02p01281.

Wielgosz, A., M. Kalarus, T. Liwosz (2017), GNSS orbit determination by precise modeling of non-gravitational forces acting on satellite's body, Referat wygłoszony na konferencji European Geosciences Union General Assembly, Vienna, Austria, April 23–28.

Williams, S. D. P., N. T. Penna (2011), Non-tidal ocean loading effects on geodetic GPS heights, *Geophysical Research Letters*, *38*(9), doi:10.1029/2011GL046940.

Zygmunt, M., M. Rajner, T. Liwosz (2016), Assessment of continental hydrosphere loading using GNSS measurements, *Reports on Geodesy and Geoinformatics*, *101*(1), 36–53, doi:https://doi.org/10.1515/rgg-2016-0020.