

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

**DR INŻ. TOMASZ HADAŚ**

INSTYTUT GEODEZJI I GEOINFORMATYKI  
WYDZIAŁ INŻYNIERII KSZTAŁTOWANIA ŚRODOWISKA I GEODEZJI  
UNIwersytet PRZYRODNICZY WE WROCŁAWIU  
UL. GRUNWALDZKA 53, 50-357 WROCŁAW  
TOMASZ.HADAS@UPWR.EDU.PL

WROCŁAW, 2018

1. Imię i nazwisko:

**Tomasz Andrzej Hadaś**

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

- **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia, specjalność geodezja satelitarna, nadany 22 września 2015 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu; praca wyróżniona

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Doskonalenie metod precyzyjnego pozycjonowania satelitarnego GNSS w czasie rzeczywistym.*

Promotor rozprawy doktorskiej: prof. dr hab. inż. Jarosław Bosy

Recenzenci rozprawy doktorskiej:

- 1) prof. dr hab. inż. Mariusz Figurski (Wojskowa Akademia Techniczna w Warszawie)
- 2) dr hab. inż. Paweł Wielgosz, prof. nadzw. (Uniwersytet Warmińsko-Mazurski w Olsztynie)

- **Tytuł zawodowy magister inżynier** w zakresie geodezji i kartografii, specjalność geoinformatyka nadany 9 lipca 2009 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu; ocena 5.0/5.0

Tytuł pracy magisterskiej: *Niwelacja satelitarna GNSS z wykorzystaniem serwisu NAWGEO systemu ASG-EUPOS.*

Promotor pracy magisterskiej: prof. dr hab. inż. Jarosław Bosy

- **Tytuł zawodowy inżynier** w zakresie geodezji i kartografii nadany 7 lutego 2008 r. przez Radę Wydziału Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu; ocena 5.0/5.0

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych.

Institut Geodezji i Geoinformatyki, Wydział Inżynierii Kształtowania Środowiska i Geodezji, Uniwersytet Przyrodniczy we Wrocławiu:

- październik 2011 do wrzesień 2015 na stanowisku asystenta,
- listopad 2015 do teraz na stanowisku adiunkta.

#### 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. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

##### a) Tytuł osiągnięcia naukowego

Rozprawę habilitacyjną pt.: „**Analiza źródeł błędów w precyzyjnym pozycjonowaniu techniką GNSS Precise Point Positioning i nowe sposoby ich redukcji**” stanowi cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

Przedstawiony poniżej cykl publikacji dotyczy szczegółowych zagadnień w zakresie wykorzystania satelitarnych systemów globalnego pozycjonowania i stanowi osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust.2 ustawy z dnia 14 marca 2003r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki. Wspólnym mianownikiem przedstawionego cyklu publikacji jest technika GNSS Precise Point Positioning (PPP). Przedstawione badania dotyczą analiz i sposobów eliminacji różnych źródeł błędów wpływających na dokładność estymacji parametrów techniką PPP. W szczególności badania te dotyczą: opóźnienia troposferycznego, opóźnienia jonosferycznego wyższego rzędu, błędów orbit i zegarów satelitów w czasie rzeczywistym, wagowania obserwacji wielosystemowych.

##### b) Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

- [1] **Hadaś T.**, Teferle F. N., Kaźmierski K., Hordyniec P., Bosy J., 2017, *Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time*, GPS Solutions, Vol. 21 No. 3, Berlin-Heidelberg 2017, pp. 1069-1081. <https://doi.org/10.1007/s10291-016-0595-0> (pkt. 35, IF=4.061), udział 70%
- [2] Wilgan K., **Hadaś T.**, Hordyniec P., Bosy J., 2017, *Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model*, GPS Solutions, Vol. 23 No. 3, Berlin-Heidelberg 2017, pp. 1341-1353. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0617-6> (pkt. 35, IF=4.061), udział 35%
- [3] **Hadas T.**, Krypiak-Gregorczyk A., Hernández-Pajares M., Kaplon J., Paziewski J., Wielgosz P., Garcia-Rigo A., Kazmierski K., Sośnica K., Kwasniak D., Sierny J., Bosy J., Pucilowski M., Szyszko R., Portasiak K., Olivares-Pulido G., Gulyaeva T., Orus-Perez R., 2017, *Impact and implementation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS applications*, Journal of Geophysical Research: Solid Earth, Vol. 122 No. 11, Washington, DC, USA 2017, pp. 9420-9436. <https://doi.org/10.1002/2017JB014750> (pkt. 40, IF=3,350), , udział 25%
- [4] Kaźmierski K., Sośnica K., **Hadaś T.**, 2017, *Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time Precise Point Positioning*, GPS Solutions 2018, 22:11, online. <https://doi.org/10.1007/s10291-017-0678-6> (pkt. 35, IF=4.061), udział 20%
- [5] Kaźmierski K., **Hadaś T.**, Sośnica K., 2018, *Weighting of multi-GNSS observations in real-time Precise Point Positioning*, Remote Sensing, Vol. 10(1), 84. <https://doi.org/10.3390/rs10010084> (pkt. 35, IF= 3.244), udział 45%

Wszystkie publikacje znajdują się na liście A MNiSW; w nawiasie podano liczbę punktów wg. MNiSW oraz Impact Factor na rok opublikowania. Łączna liczba punktów MNiSW za publikacje stanowiące cykl wynosi 180, a sumaryczny Impact Factor jest równy 18,777.

Szczegółowy opis wkładu wnioskodawcy w przygotowanie poszczególnych publikacji przedstawiono w załączniku nr 3, część I B).

### c) Omówienie celu naukowego ww. prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

#### **Wprowadzenie**

Globalny System Nawigacji Satelitarnej (GNSS) jest jedną z głównych technik obserwacyjnych systemu ziemia-atmosfera w geodezji satelitarnej, a jednocześnie ma fundamentalne znaczenie w rozwoju gospodarki, nawigacji oraz budowie systemów monitorowania i ostrzegania przed katastrofami naturalnymi. Dynamiczny rozwój GNSS stymuluje budowę aplikacji opartych o ich klasyczne przeznaczenie, tj. pozycjonowanie, nawigację oraz transfer czasu. Oprócz tego powstają liczne zaawansowane aplikacje o charakterze naukowym, np. modelowanie jonosfery (Hernández-Pajares et al. 2011), monitorowanie zawartości pary wodnej w atmosferze (Bosy et al. 2012), wyznaczanie wilgotności gleby (Larson et al. 2008) i zdalne pomiary wysokości pokrywy śnieżnej (Jin and Najibi 2014). W wielu obszarach, takich jak geodynamika czy długoterminowe obserwacje poziomu morza, dopuszczalne jest dostarczanie wyników opracowania danych z opóźnieniem sięgającym nawet kilkudziesięciu dni, nie wpływając negatywnie na przydatność takich wyników do dalszych analiz. Z drugiej strony, powstaje coraz więcej aplikacji, w których wymagana jest precyzyjna pozycja w czasie rzeczywistym np. w fotogrametrii z wykorzystaniem bezzałogowych statków latających (Eling et al. 2015), w systemach wczesnego ostrzegania przed tsunami (Hoechner et al. 2013), w precyzyjnym rolnictwie (Tayari et al. 2015) oraz w monitorowaniu osiągnięć sportowców (Aughey and Falloon 2010).

Precyzyjne pozycjonowania GNSS przez wiele lat zdominowane było przez techniki różnicowe (względne) wykorzystujące obserwacje kodowe i fazowe. Formowanie podwójnych różnic obserwacji pozwala wyeliminować główne źródła błędów pozycjonowania tj. błędy orbit i zegarów satelitów, opóźnienie jonosferyczne i troposferyczne (w przypadku krótkich wektorów), oraz opóźnienia sprzętowe. Istotnymi ograniczeniami dla technik różnicowych są duża złożoność obliczeń oraz regionalny zasięg, ponieważ w pobliżu odbiornika musi znajdować się stacja referencyjna GNSS (Pirti 2011). W czasie rzeczywistym wykorzystuje się technikę RTK, w której odległość od stacji referencyjnej może sięgać do 100 km, jeżeli skorzysta się z zewnętrznych korekt jonosferycznych (Grejner-Brzezinska et al. 2005) lub rozwiązania sieciowego (Rizos 2002). Odległość ta może sięgać nawet kilkuset kilometrów wg. koncepcji Wide Area RTK (WARTK) (Hernández-Pajares et al. 2004), lecz w żadnym przypadku nie stanie się techniką o zasięgu globalnym. W trybie postprocessingu odległości pomiędzy odbiornikami mogą sięgać kilku tysięcy kilometrów, ale wymaga to długich sesji obserwacyjnych i dokładnego modelowania źródeł błędów pozycjonowania. W ten sposób zatracą się główną zaletę z formowania podwójnych różnic obserwacji.

Niezależność od stacji referencyjnej możliwa jest do uzyskania przy pomocy techniki Precise Point Positioning (PPP). PPP jest autonomiczną techniką pozycjonowania pojedynczego odbiornika, która korzysta z precyzyjnych orbit i zegarów satelitów. Jest to wydajne i skuteczne podejście, które pozwala użytkownikom w dowolnym miejscu na świecie uzyskać dokładności zbliżone do tych, jakie uzyskuje się w globalnych rozwiązaniach Międzynarodowej Służby GNSS (ang. International GNSS Service, IGS) (Zumberge et al. 1997).

Niestety, część estymowanych parametrów tj. błąd zegara odbiornika, składowa wysokościowa współrzędnych odbiornika oraz opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu, są ze sobą silnie skorelowane. W konsekwencji wykorzystanie PPP w niektórych aplikacjach czasu rzeczywistego jest niepraktyczne, ponieważ potrzebnych jest przynajmniej kilkadziesiąt minut prowadzenia ciągłych obserwacji, zanim rozwiązanie uzyska zbieżność na oczekiwanym poziomie dokładności. Liczne badania prowadzone w zakresie techniki PPP skupiają się między innymi nad skróceniem czasu zbieżności rozwiązania (Banville et al. 2014), w tym poprzez doskonalenie modelu funkcjonalnego i stochastycznego opracowania obserwacji (Zhang et al. 2011; Lou et al. 2016), w szczególności poprzez łączenie obserwacji z wielu systemów (Li et al. 2015; Abdi et al. 2017) i rozwiązywanie nieoznaczoności (Laurichesse and National 2011; Shi and Gao 2014).

Podstawowym założeniem w technice PPP jest bezbłądność orbit i zegarów satelitów w rozwiązywanym układzie równań, co oznacza, że otrzymane rezultaty są mocno zależne od jakości użytych produktów. Kluczowe jest przy tym zachowanie spójności modeli geofizycznych po stronie użytkownika z tymi, które zostały wykorzystane przez centra obliczeniowe dostarczające produktów precyzyjnych (Witchayangkoon 2000). Ponieważ PPP nie jest techniką różnicową, konieczne jest również uwzględnienie błędów propagacji sygnału GNSS w atmosferze. W klasycznym podejściu opóźnienie jonosferyczne pierwszego rzędu, odpowiedzialne za 99% całego opóźnienia jonosferycznego, usuwane jest poprzez wykorzystanie kombinacji liniowej obserwacji na dwóch częstotliwościach. Opóźnienie troposferyczne w kierunku do zenitu jest natomiast parametrem estymowanym, które może być przeliczone na opóźnienie skośne w kierunku do satelity przy pomocy wybranych funkcji odwzorowujących.

## Cel

Wśród praktycznych implementacji techniki PPP, szczególnie w aplikacjach czasu rzeczywistego, istnieją liczne różnice w modelach funkcjonalnych i stochastycznych (Choy et al. 2017). Wpływ opóźnienia jonosferycznego wyższego rzędu jest najczęściej ignorowany lub ograniczony do stopnia drugiego. Opóźnienie troposferyczne jest modelowane jako błądzenie losowe o różnie zdefiniowanym kroku. Niejednorodne są warianty wagowania obserwacji w rozwiązaniach multi-GNSS, przy czym powszechne jest traktowanie obserwacji z różnych systemów w sposób równie dokładny. W aplikacjach czasu rzeczywistego wykorzystywane są różne korekty orbit i zegarów satelitów, przy jednoczesnym braku dogłębnej analizy tych produktów, szczególnie dla wschodzących systemów GNSS tj. Galileo i BeiDou.

Wspólnym celem cyklu pięciu publikacji powiązanych tematycznie i stanowiących osiągnięcie naukowe jest analiza wpływu głównych źródeł błędów w technice PPP na precyzyjne pozycjonowanie GNSS. W cyklu publikacji w szczególności zajęto się następującą problematyką:

- optymalnego modelowania opóźnienia troposferycznego w aplikacjach czasu rzeczywistego,
- wykorzystania numerycznych modeli prognozy pogody jako dodatkowego źródła informacji o opóźnieniu troposferycznym w pozycjonowaniu PPP w czasie rzeczywistym,
- wpływu wyższych wyrazów opóźnienia jonosferycznego na wyniki pozycjonowania PPP,

- jakości orbit i zegarów czasu rzeczywistego dla systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou,
- wagowania obserwacji multi-GNSS w pozycjonowaniu techniką PPP czasie rzeczywistym.

Nadrzędnym priorytetem cyklu publikacji jest optymalizacja sposobu opracowania obserwacji GNSS techniką PPP, poprzez udoskonalenie modelu funkcjonalnego i stochastycznego, szczególnie w aplikacjach czasu rzeczywistego. Prace te wpisują się w aktualne, światowe badania dotyczące precyzyjnego pozycjonowania GNSS, o czym świadczą publikacje w prestiżowych czasopismach wyróżnionych na liście JCR oraz realizacja badań w międzynarodowych zespołach badawczych i w ramach międzynarodowych projektów badawczych.

### Omówienie wyników

**Publikacja [1]** dotyczy optymalizacji modelu stochastycznego w modelowaniu opóźnienia troposferycznego technikami GNSS w czasie rzeczywistym. Motywacją do realizacji badań był udział w międzynarodowej Akcji COST ES 1206 „GNSS4SWEC - Advanced Global Navigation Satellite Systems tropospheric products for monitoring severe weather events and climate”, której jednym z celów było doskonalenie algorytmiki, budowa serwisów i narzędzi do modelowania zawartości pary wodnej w atmosferze na podstawie obserwacji GNSS w czasie rzeczywistym. Koncepcja i plan pracy powstały w trakcie stażu na Uniwersytecie w Luksemburgu we współpracy z prof. Felixem Normanem Teferle, kierownikiem jednego z zadań akcji COST. W pracy podjęto problematykę estymacji opóźnienia troposferycznego w czasie rzeczywistym w postaci błędzenia losowego o zdefiniowanym kroku. Zauważono, że jest to jeden z aspektów, który nie został dotychczas szczegółowo przeanalizowany, przez co w różnych badaniach stosowane są różne podejścia (Lu et al. 2015; de Oliveira et al. 2017), w tym podejście empiryczne, polegające na doświadczalnym doborze ustawień (Dousa and Vaclavovic 2014). W pracy zaproponowano, aby krok błędzenia losowego ustalić na podstawie analizy szeregów czasowych mokrej części opóźnienia troposferycznego (ZWD). W tym celu zmodyfikowano równanie procesu Markova (Chung and Walsh 1969) na potrzeby modelowania troposfery aby wyznaczyć szum procesu na podstawie analizy szeregu czasowego ZWD. Zaproponowano dwa podejścia: 1) z wykorzystaniem rocznych obserwacji z globalnego modelu prognozy pogody ECEMWF oraz 2) z wykorzystaniem aktualnych krótkoterminowych prognoz pogody z regionalnego, wysokorozdzielczego modelu GFS4.

W oparciu o podejście 1) zauważono, że średni roczny krok błędzenia losowego jest geograficznie zmienny i mieści się w przedziale od 0.1 mm/ $\sqrt{h}$  (na Antarktydzie i Grenlandii) do 12 mm/ $\sqrt{h}$  (na oceanach wzdłuż równoleżników 40°N i 40°S), ze średnią wartością 5 mm/ $\sqrt{h}$ . Wartości te korespondują z warunkami, jaki nakładane były na ZWD w innych pracach, przy czym zaproponowane podejście jest całkowicie niezależne. Opracowano więc globalną, statyczną mapę optymalnej wartości kroku błędzenia losowego dla estymowanego opóźnienia troposferycznego z obserwacji GNSS w czasie rzeczywistym. W podejściu 2) konieczne jest wykorzystanie techniki ray-tracingu (Boehm 2004) w celu wyznaczenia chwilowego, punktowego kroku błędzenia losowego. W przypadku stabilnych warunków atmosferycznych wartość kroku pozostaje niska, nakładając w ten sposób silny warunek ograniczający na estymowane opóźnienie troposferyczne. W przypadku oczekiwanej dużej dynamiki w atmosferze, wartość kroku odpowiednio wzrasta, a w konsekwencji warunek na estymowane opóźnienie troposferyczne jest odpowiednio luźniejszy. Podejście wymaga dużej mocy obliczeniowej, ale aktualne prace pokazują, że możliwe jest dostarczanie produktów

troposferycznych z numerycznych modeli prognozy pogody w czasie rzeczywistym (Zus et al. 2014; Wilgan 2015). Na podstawie przeprowadzonych doświadczeń numerycznych stwierdzono, że podejście 1) pozwala zastąpić podejście empiryczne zwracając wartości kroku błędzenia losowego, które nie różnią się o więcej niż  $1 \text{ mm}/\sqrt{h}$ . Podejście 2) pozwala uzyskać najlepsze wyniki, ponieważ wartość kroku błędzenia losowego zmienia się dynamicznie, jako odpowiedź na zmieniające się warunki atmosferyczne.

**Publikacja [2]** również dotyczy problematyki modelowania opóźnienia troposferycznego, przy czym w tym przypadku zaproponowano wykorzystanie numerycznego modelu prognozy pogody jako źródła dodatkowej informacji o stanie troposfery. Zewnętrzny model opóźnienia troposferycznego, łączący obserwacje GNSS i krótkoterminowe prognozy pogody, bazuje na technice kolokacji metodą najmniejszych kwadratów (Wilgan et al. 2017). Współczynniki funkcji mapującej opóźnienie troposferyczne w zenicie na opóźnienie w kierunku do satelity wyznaczone zostały metodą ray-tracingu. Innowatorskim elementem pracy jest autorska metodologia nakładania warunku na estymowaną wartość opóźnienia troposferycznego w kierunku zenitu poprzez dołożenie dodatkowego równania do układu równań obserwacyjnych.

Metodologia ta została zweryfikowana poprzez pozycjonowanie GNSS techniką PPP, symulując obliczenia w czasie rzeczywistym, tj. poprzez rekonstrukcję strumienia poprawek do orbit i zegarów satelitów GPS. Pozycjonowanie przeprowadzono w trybie statycznym i kinematycznym, dla 3 okresów testowych i 14 stacji EPN w Polsce. Analizie poddano: różnice współrzędnych względem oficjalnych współrzędnych stacji z rozwiązań tygodniowych EPN, powtarzalność wyznaczenia współrzędnych oraz czas zbieżności rozwiązania. Na podstawie analizy uzyskanych wyników stwierdzono, że w pozycjonowaniu statycznym wykorzystanie danych z opracowanego modelu troposfery pozwala zredukować błąd systematyczny wyznaczenia składowej wysokościowej średnio o 20 mm, przy czym powtarzalność współrzędnych pogorsza się o około 1.5 mm. Nie odnotowano istotnych różnic dla składowych horyzontalnych. W pozycjonowaniu kinematycznym stwierdzono redukcję systematycznego błędu i poprawę powtarzalności dla składowej wysokościowej, przy stosunkowo niewielkim pogorszeniu statystyk dla składowych poziomych. Trójwymiarowy błąd systematyczny ulega redukcji o około 10 mm, a powtarzalność współrzędnych w różnych wariantach obliczeń nie różni się o więcej niż 4 mm. W pozycjonowaniu kinematycznym zaobserwowano również wyraźne skrócenie czasu inicjalizacji rozwiązania, wynoszące 13 % dla składowych horyzontalnych i 20% dla wysokości. Jednocześnie zauważono, że wpływ samych funkcji mapujących nie jest znaczący, ponieważ różnice odnotowano jedynie dla bardzo niskich kątów elewacji.

**Publikacja [3]** związana jest z modelowaniem wyższych wyrazów opóźnienia jonosferycznego ( $I_{2+}$ ) i ich eliminacją z wieloczęstotliwościowych obserwacji multi-GNSS. Prace realizowane były w międzynarodowym projekcie finansowanym przez Europejską Agencję Kosmiczną. Bezpośrednią motywacją do podjęcia prac były teoretyczne analizy wpływu  $I_{2+}$  na produkty GNSS, opisane w (Hernández-Pajares et al. 2014). Praca w sposób kompleksowy przedstawia jak poszczególne składowe  $I_{2+}$  przekładają się na obserwacje fazowe oraz jaki jest wpływ  $I_{2+}$  na estymację orbit satelitów GPS i GLONASS, modelowanie troposfery oraz precyzyjne pozycjonowanie absolutne (PPP) i względne (RTK). Na potrzeby realizacji projektu i związanych z nim badań powstał serwis HORION-PL v2, opisany szerzej w rozdziale 5a załącznika 2.

W pracy przedstawiono kompletny i praktyczny model wyznaczenia wyższych wyrazów opóźnienia troposferycznego: opóźnienia rzędu drugiego i trzeciego, ugięcia geometrycznego

i ugięcia wynikającego z różnicy zawartości elektronów dla sygnałów o różnej częstotliwości. Na podstawie rzeczywistych obserwacji GNSS potwierdzono, że korekty jonosferyczne wyższego rzędu mają nawet kilku centymetrowy wpływ na obserwacje, przy czym główną składową jest opóźnienie rzędu drugiego. Korekty  $I_{2+}$  różnią się w czasie, w zależności od aktywności jonosfery i rozkładu natężenia pola magnetycznego Ziemi. Główny produktem GNSS, na który oddziałują  $I_{2+}$  są orbity i zegary satelitów, dla których znaleziono różnice na poziomie odpowiednio 1 i 2 cm w stosunku do rozwiązań, w których zaniedbano wpływ  $I_{2+}$ . Nie udało się natomiast wykazać, które z rozwiązań jest dokładniejsze, ze względu na równy poziom błędów formalnych estymowanych parametrów w obu rozwiązaniach. Różnice w produktach satelitarnych przełożyły się natomiast bezpośrednio na pozycjonowanie absolutne techniką PPP. Zauważono systematyczne różnice w estymowanych wartościach współrzędnych, w szczególności dla składowej północnej i wysokościowej, sięgające nawet 11 mm dla stacji testowych w Brazylii. Dla stacji zlokalizowanych w Polsce różnice nie przekraczają 6 mm w okresie dużej aktywności jonosfery i sztormu geomagnetycznego, a w okresie spokojnej jonosfery różnice nie przekraczają 2 mm. Zauważono, że różnice te mają charakter regionalny i zależą głównie od aktualnej aktywności jonosfery. W pozycjonowaniu względnym różnice w uzyskanych wynikach pomiędzy rozwiązaniami uwzględniającymi i ignorującymi  $I_{2+}$  są nieistotne. Wynika to z faktu podwójnego różnicowania obserwacji, co znacząco redukuje wpływ różnych błędów systematycznych, w tym  $I_{2+}$ . W pozycjonowaniu RTK nie zauważono różnicy w skuteczności rozwiązywania nieoznaczoności fazowych, ani w czasie inicjalizacji, ani w dokładności i precyzji współrzędnych. W estymacji produktów troposferycznych (opóźnienia i gradientów horyzontalnych), również opartej o rozwiązanie względne, różnice pomiędzy estymowanymi parametrami także są nieistotne. W publikacji po raz pierwszy przedstawiono i przeanalizowano wpływ  $I_{2+}$  na produkty GNSS na podstawie rzeczywistych obserwacji, a otrzymane wyniki pokrywają się z symulacjami przeprowadzonymi przez Hernández-Pajares et al. (2014).

**Publikacja [4]** jest kontynuacją badań podjętych w (Hadas and Bosy 2014). W tym przypadku podjęto się kompleksowej oceny jakości orbit i zegarów czasu rzeczywistego dla satelitów GPS, GLONASS, Galileo i Beidou, które udostępniane są przez centrum analiz IGS – CNES (Centre National d'Études Spatiales). Motywacją do podjęcia tych badań była ocena jakości nowych produktów czasu rzeczywistego, jako podstawy do prawidłowego wspólnego opracowania obserwacji z różnych systemów GNSS. Praca przedstawia także opis algorytmu liczenia parametru Issue of Data (IOD) dla systemów GLONASS i BeiDou. IOD wykorzystywany jest do łączenia transmitowanych poprawek z właściwą depeszą nawigacyjną, ale dla wymienionych wyżej systemów nie jest podany wprost w depeszy nawigacyjnej, tak jak dla systemów GPS i Galileo.

Produkty multi-GNSS czasu rzeczywistego oceniono pod kątem ich dostępności w czasie, dokładności orbit i zegarów względem produktów finalnych IGS MGEX (Multi-GNSS Experiment), analizy ciągłości łuków orbitalnych, analizy rezyduów względem obserwacji laserowych do satelitów (SLR) i analizy stabilności zegarów z wykorzystaniem zmodyfikowanego odchylenia Allana. Wreszcie przedstawiono wyniki pozycjonowania PPP w czasie rzeczywistym z wykorzystaniem obserwacji GNSS w różnych kombinacjach wykorzystywanych systemów. Analizy potwierdzają wysoką dostępność produktów czasu rzeczywistego, przekraczającą 90% w okresie testowym dla wszystkich systemów. W porównaniu do finalnych produktów MGEX, dokładność orbit i zegarów czasu rzeczywistego systemu GPS wynosi 3 cm a dla GLONASS 8 cm. Dla systemu Galileo dokładność orbit wynosi 12 cm, a zegarów 9 cm. Dla BeiDou jest to odpowiednio 20 i 10 cm, przy czym dokładność



produktów dla satelitów geostacjonarnych nie została określona, ze względu na brak produktów dla tych satelitów w produktach finalnych MGEX. Pozostałe analizy wykazały podobne zależności, wskazując dodatkowo na bardzo słabą jakość orbit satelitów geostacjonarnych. Otrzymane wyniki świadczą o niedoskonałościach w modelowaniu orbit i zegarów satelitów systemów nawigacyjnych innych niż GPS. Przekłada się to bezpośrednio na wyniki pozycjonowania PPP w czasie rzeczywistym. Dołożenie obserwacji z systemu Galileo lub BeiDou do obserwacji GPS skutkuje pogorszeniem dokładności wyznaczenia współrzędnych statycznych i kinematycznych ze względu na błędy systematyczne i niższą jakość orbit i zegarów Galileo i Beidou. Zmniejszone błędy estymowanych parametrów rozwiązania multi-GNSS wynikają głównie z poprawy geometrii obserwacji.

**Publikacja [5]** powstała w konsekwencji i jako kontynuacja publikacji [4] i dotyczy optymalnego wagowania obserwacji pochodzących z różnych systemów GNSS. W pierwszej kolejności w pracy przedstawiono metodę wykorzystaną do ustalenia wag obserwacji kodowych i fazowych dla systemu GPS. W tym przypadku posłużono się podejściem empirycznym, w którym dążono do uzyskania średniego błędu pojedynczego spostrzeżenia równego 1. Na podstawie informacji o szumie obserwacji kodowych i fazowych (Cai and Gao 2013) oraz wykorzystując wyniki publikacji [4] do obliczenia współczynników SISRE (Montenbruck et al. 2015) dla poszczególnych systemów GNSS, opracowano łącznie 5 schematów wagowania obserwacji dla rozwiązania multi-GNSS PPP czasu rzeczywistego. Każdy ze schematów został zastosowany do wyznaczenia pozycji statycznych dla 12 stacji śledzących satelity wszystkich 4 rozpatrywanych systemów nawigacyjnych w 14 dobowych sesjach obserwacyjnych. Analizowano błąd formalny wyznaczonych współrzędnych, powtarzalność współrzędnych w rozwiązaniach dobowych oraz czas zbiegania rozwiązania do poziomu 1 cm. Wyniki porównywano z rozwiązaniem opartym jedynie na obserwacjach z systemu GPS.

W pracy wykazano, że równe wagowanie obserwacji z różnych GNSS prowadzi do pogorszenia powtarzalności współrzędnych nawet o 50%, i to pomimo zmniejszenia się ich błędu formalnego. Zmniejszony błąd estymowanych parametrów współrzędnych stacji, charakterystyczny dla rozwiązań multi-GNSS, jest bowiem skutkiem włączenia dodatkowych obserwacji do układu równań, natomiast wpływ błędów modelowania orbit oraz różna charakterystyka sygnałów GNSS powinna być czynnikiem różnicującym wagowanie obserwacji z poszczególnych systemów. Opracowany na podstawie współczynników SISRE schemat wagowania obserwacji okazał się być najlepszym spośród zaproponowanych wariantów. Schemat ten charakteryzuje się obniżeniem wag obserwacji kodowych i fazowych dla systemów GLONASS, Galileo i BeiDou w stosunku do systemu GPS. W efekcie uzyskano poprawę jakości pozycjonowania we wszystkich analizowanych aspektach. Powtarzalność współrzędnych z rozwiązań dobowych zwiększyła się średnio o 6% tj. z 4,1 mm do 3,9 mm, z 8,4 mm do 8,0 mm i z 11,0 mm do 10,1 mm, odpowiednio dla składowej północnej, wschodniej i wysokości. Błąd formalny wyznaczenia współrzędnych został zredukowany średnio o 39% dla wszystkich składowych. Czas zbieżności rozwiązania do poziomu 0.01 m dla współrzędnych płaskich został skrócony średnio o 39% (z 3 godz. 34 minut do 2 godzin 11 minut), a dla wysokości o 47% (z 5 godzin 43 minut do 3 godzin 1 minuty).

### **Podsumowanie cyklu**

W pracach stanowiących cykl publikacji przedstawiono oryginalne rozwiązania z zakresu opracowania obserwacji GNSS na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania techniką GNSS.

Skuteczność zaproponowanych metod i algorytmów została zweryfikowana poprzez eksperymenty numeryczne. Za moje najważniejsze osiągnięcia w cyklu publikacji uważam:

- opracowanie mapy kroku błędzenia losowego ZWD, która może być w bezpośredni sposób wykorzystana w dowolnym oprogramowaniu do opracowania obserwacji GNSS (publikacja [1]);
- opracowanie i walidacja metodologii dynamicznej zmiany kroku błędzenia losowego na podstawie krótkoterminowych prognoz pogody (publikacja [1]);
- opracowanie metodologii warunkowania estymowanego opóźnienia troposferycznego z wykorzystaniem informacji z zewnętrznego modelu prognozy pogody (publikacja [2]);
- potwierdzenie przydatności numerycznych modeli prognozy pogody w precyzyjnym pozycjonowaniu GNSS w czasie rzeczywistym (publikacja [2]);
- ocenę wpływu wyższych wyrazów opóźnienia jonosferycznego na modelowanie orbit i zegarów satelitów GPS i GLONASS oraz na pozycjonowanie GNSS techniką PPP (publikacja [3]);
- ocena dokładności orbit i zegarów satelitów GNSS systemów GPS, GLONASS, Galileo i BeiDou, dostępnych w czasie rzeczywistym, w porównaniu z produktami finalnymi MGEX (publikacja [4]);
- udowodnienie, że równe wagowanie obserwacji z różnych systemów GNSS może prowadzić do pogorszenia jakości rozwiązania, w szczególności powtarzalności współrzędnych (publikacja [5]);
- współautorstwo optymalnego schematu wagowania obserwacji GPS+GLONASS+Galileo+BeiDou dla precyzyjnego pozycjonowania techniką PPP w czasie rzeczywistym (publikacja [5]).

Powyższe osiągnięcia stanowią istotny wkład w rozwój algorytmiki pozycjonowania precyzyjnego GNSS PPP w międzynarodowym wymiarze.

## Literatura

- Abdi N, Ardalan AA, Karimi R, Rezvani MH (2017) Performance assessment of multi-GNSS real-time PPP over Iran. *Adv Sp Res* 59:2870–2879 . doi: 10.1016/j.asr.2017.03.024
- Aughey RJ, Falloon C (2010) Real-time versus post-game GPS data in team sports. *J Sci Med Sport* 13:348–349 . doi: 10.1016/j.jsams.2009.01.006
- Banville S, Collins P, Zhang W, Langley RB (2014) Global and regional ionospheric corrections for faster PPP convergence. *Navig J Inst Navig* 61:115–124 . doi: 10.1002/navi.57
- Boehm J (2004) Vienna mapping functions in VLBI analyses. *Geophys Res Lett* 31:L01603 . doi: 10.1029/2003GL018984
- Bosy J, Kaplon J, Rohm W, et al (2012) Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data. *Ann Geophys* 30:1379–1391 . doi: 10.5194/angeo-30-1379-2012
- Cai C, Gao Y (2013) Modeling and assessment of combined GPS/GLONASS precise point positioning. *GPS Solut* 17:223–236 . doi: 10.1007/s10291-012-0273-9
- Choy S, Bisnath S, Rizos C (2017) Uncovering common misconceptions in GNSS Precise Point Positioning and its future prospect. *GPS Solut*. 21:13–22
- Chung KL, Walsh JB (1969) To reverse a Markov process. *Acta Math* 123:225–251 . doi: 10.1007/BF02392389
- de Oliveira PS, Morel L, Fund F, et al (2017) Modeling tropospheric wet delays with dense and sparse

- network configurations for PPP-RTK. *GPS Solut* 21:237–250 . doi: 10.1007/s10291-016-0518-0
- Dousa J, Vaclavovic P (2014) Real-time zenith tropospheric delays in support of numerical weather prediction applications. *Adv Sp Res* 53:1347–1358 . doi: 10.1016/j.asr.2014.02.021
- Eling C, Wieland M, Hess C, et al (2015) Development and evaluation of a uav based mapping system for remote sensing and surveying applications. In: *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences - ISPRS Archives*. pp 233–239
- Grejner-Brzezinska DA, Kashani I, Wielgosz P (2005) On accuracy and reliability of instantaneous network RTK as a function of network geometry, station separation, and data processing strategy. *GPS Solut* 9:212–225 . doi: 10.1007/s10291-005-0130-1
- Hadas T, Bosy J (2014) IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time. *GPS Solut* 19:93–105 . doi: 10.1007/s10291-014-0369-5
- Hernández-Pajares M, Aragón-Ángel À, Defraigne P, et al (2014) Distribution and mitigation of higher-order ionospheric effects on precise GNSS processing. *J Geophys Res Solid Earth* 119:3823–3837 . doi: 10.1002/2013JB010568
- Hernández-Pajares M, Juan JM, Sanz J, et al (2004) Wide area real time kinematics with Galileo and GPS signals. 17th Int Tech Meet Satell Div Inst Navig ION GNSS 2004 2541–2554
- Hernández-Pajares M, Juan JM, Sanz J, et al (2011) The ionosphere: Effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. *J Geod* 85:887–907 . doi: 10.1007/s00190-011-0508-5
- Hoechner A, Ge M, Babeyko AY, Sobolev S V. (2013) Instant tsunami early warning based on real-time GPS-Tohoku 2011 case study. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 13:1285–1292 . doi: 10.5194/nhess-13-1285-2013
- Hordyniec P, Bosy J, Rohm W (2015) Assessment of errors in Precipitable Water data derived from global navigation satellite system observations. *J Atmos Solar-Terrestrial Phys* 129:69–77 . doi: 10.1016/j.jastp.2015.04.012
- Jin S, Najibi N (2014) Sensing snow height and surface temperature variations in Greenland from GPS reflected signals. *Adv Sp Res* 53:1623–1633 . doi: 10.1016/j.asr.2014.03.005
- Larson KM, Small EE, Gutmann ED, et al (2008) Use of GPS receivers as a soil moisture network for water cycle studies. *Geophys Res Lett* 35: . doi: 10.1029/2008GL036013
- Laurichesse D, National C (2011) The CNES Real-time PPP with undifferenced integer ambiguity resolution demonstrator. In: *Proceedings of the 24th International Technical Meeting of The Satellite Division of the Institute of Navigation (ION GNSS 2011)*. pp 654–662
- Li X, Zhang X, Ren X, et al (2015) Precise positioning with current multi-constellation Global Navigation Satellite Systems: GPS, GLONASS, Galileo and BeiDou. *Sci Rep* 5:8328 . doi: 10.1038/srep08328
- Lou Y, Zheng F, Gu S, et al (2016) Multi-GNSS precise point positioning with raw single-frequency and dual-frequency measurement models. *GPS Solut* 20:849–862 . doi: 10.1007/s10291-015-0495-8
- Lu C, Li X, Nilsson T, et al (2015) Real-time retrieval of precipitable water vapor from GPS and BeiDou observations. *J Geod* 89:843–856 . doi: 10.1007/s00190-015-0818-0
- Montenbruck O, Steigenberger P, Hauschild A (2015) Broadcast versus precise ephemerides: a multi-GNSS perspective. *GPS Solut* 19:321–333 . doi: 10.1007/s10291-014-0390-8
- Pirti A (2011) Evaluating The Repeatability of RTK GPS. *Surv Rev* 43:177–186 . doi: 10.1179/003962611X12894696204984
- Rizos C (2002) Network RTK Research and Implementation: A Geodetic Perspective. *J Glob Position Syst* 1:144–150 . doi: 10.5081/jgps.1.2.144
- Shi J, Gao Y (2014) A comparison of three PPP integer ambiguity resolution methods. *GPS Solut* 18:519–528 . doi: 10.1007/s10291-013-0348-2
- Tayari E, Jamshid AR, Goodarzi HR (2015) Role of GPS and GIS in precision agriculture. *J Sci Res Dev* 2:157–162
- Wilgan K (2015) Zenith total delay short-term statistical forecasts for gnss precise point positioning. *Acta Geodyn Geomater* 12:335–343 . doi: 10.13168/AGG.2015.0035
- Wilgan K, Hurter F, Geiger A, et al (2017) Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-

- squares collocation of meteorological and GNSS data. *J Geod* 91:117–134 . doi: 10.1007/s00190-016-0942-5
- Witchayangkoon B (2000) Elements of gps precise point positioning. Library (Lond) 286 . doi: 10.13140/RG.2.1.3282.6402
- Zhang B, Teunissen PJG, Odijk D (2011) A novel un-differenced PPP-RTK concept. *J Navig* 64: . doi: 10.1017/S0373463311000361
- Zumberge JF, Heflin MB, Jefferson DC, et al (1997) Precise point positioning for the efficient and robust analysis of GPS data from large networks. *J Geophys Res Solid Earth* 102:5005–5017 . doi: 10.1029/96JB03860
- Zus F, Dick G, Douša J, et al (2014) The rapid and precise computation of GPS slant total delays and mapping factors utilizing a numerical weather model. *Radio Sci* 49:207–216 . doi: 10.1002/2013RS005280

## 5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

### a) Zrealizowane oryginalne osiągnięcia naukowe i technologiczne

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

- **Rozwój autorskiego oprogramowania GNSS-WARP do pozycjonowania PPP**

Realizowane przeze mnie badania wymagają ingerencji w algorytmikę opracowania obserwacji GNSS, w związku z czym stworzyłem od podstaw oprogramowanie do pozycjonowania multi-GNSS techniką PPP. Prace nad oprogramowaniem zacząłem w roku 2011, a od 2015 w jego rozwoju uczestniczy także mgr inż. Kamil Kaźmierki w ramach realizacji swojej pracy doktorskiej.

Oprogramowanie umożliwia opracowanie obserwacji w czasie rzeczywistym, symulowanym czasie rzeczywistym i w trybie postprocessingu. Zostały w nim zaimplementowane wszystkie modele zalecane przez Międzynarodową Służbę GNSS (IGS) oraz Konwencję Międzynarodowej Służby Rotacji Ziemi (IERS) 2010. Ponadto oprogramowanie GNSS-WARP posiada kilka innowacyjnych modułów, w tym umożliwiających wykorzystanie informacji numerycznych modeli prognozy pogody i udoskonalony model wagowania obserwacji multi-GNSS. Oprogramowanie jest wysoce konfigurowalne, a obliczenia mogą być zautomatyzowane, umożliwiając przetwarzanie długich okresów obserwacji, dla wielu stacji, w różnych wariantach. Wyniki są generowane w postaci szeregów czasowych estymowanych parametrów i ich błędów, a także wybranych wyników pośrednich (np. współrzędne satelitów, rezydua obserwacji) w postaci tekstowej i graficznej, umożliwiając szczegółową analizę i interpretację jakości rozwiązania.

Ze względu na swoją wszechstronność oraz możliwości ingerencji w poszczególne algorytmy opracowania obserwacji GNSS, oprogramowanie to było i jest powszechnie wykorzystywane w realizacji grantów badawczych.

- **Współautorstwo serwisu HORION-PL v2.0**

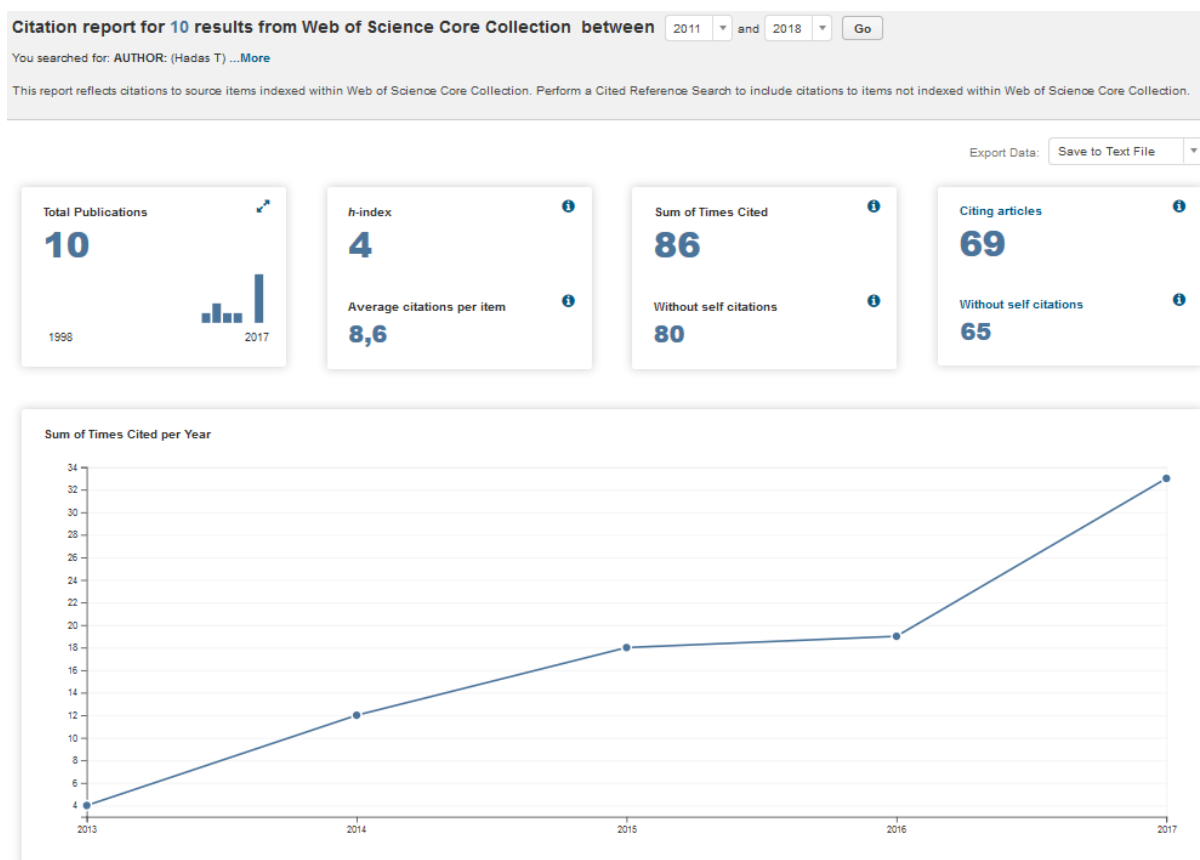
Serwis HORION-PL v2.0 powstał w ramach projektu realizowanego dla Europejskiej Agencji Kosmicznej. Umożliwia on eliminację opóźnienia jonosferycznego wyższego rzędu z obserwacji GNSS przesłanych w pliku RINEX. Serwis wspiera obserwacje systemów GPS,

GLONASS, Galileo i BeiDou na dowolnych częstotliwościach, a pliki RINEX mogą być zapisane w wersji 2.x lub 3.x. Serwis posiada internetowy interfejs użytkownika do wysyłania i obierania plików RINEX. Wraz ze skorygowanym plikiem RINEX użytkownik serwisu otrzymuje raport tekstowy graficzny, charakteryzujący realizację zadania w serwisie na konkretnych obserwacjach.

## b) Wykaz pozostałych wybranych osiągnięć

- Autorstwo bądź współautorstwo 116 prac twórczych (w tym 50 po uzyskaniu stopnia doktora):
  - 7 artykułów w czasopismach z listy JCR (w tym 3 po uzyskaniu stopnia doktora),
  - 2 artykuły w czasopismach z listy „B” MNiSW (0 po uzyskaniu stopnia doktora),
  - 2 artykuły w materiałach pokonferencyjnych (0 po uzyskaniu stopnia doktora),
  - 95 opublikowanych abstraktów w materiałach konferencyjnych (39 po uzyskaniu stopnia doktora),
  - 10 niepublikowanych ekspertyz i raportów (8 po uzyskaniu stopnia doktora).

Sumaryczna liczba punktów MNiSW za publikacje (łącznie z publikacjami stanowiącymi osiągnięcie naukowe): 412 (277 po uzyskaniu stopnia doktora); sumaryczny Impact Factor: 34.998 (27.368 po uzyskaniu stopnia doktora); cytowania według WoS: 86 (52 po uzyskaniu stopnia doktora).



Rysunek 1. Raport cytowań według Web of Science (cz. 1)

	2014	2015	2016	2017	2018	Total	Average Citations per Year
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report or restrict to items published between 2011 and 2018 Go	12	18	19	33	0	86	14.33
<input type="checkbox"/> 1. <b>Quality assessment of multi-GNSS orbits and clocks for real-time precise point positioning</b> By: Kazmierki, Kamil; Sosnica, Krzysztof; Hadas, Tomasz GPS SOLUTIONS Volume: 22 Issue: 1 Article Number: UNSP 11 Published: NOV 6 2017	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 2. <b>On the estimation of higher-order ionospheric effects in precise point positioning</b> By: Banville, Simon; Sieradzki, Rafal; Hoque, Mainul; et al. GPS SOLUTIONS Volume: 21 Issue: 4 Pages: 1817-1828 Published: OCT 2017	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 3. <b>Real-time precise point positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model</b> By: Wilgan, Karina; Hadas, Tomasz; Hordyniec, Pawel; et al. GPS SOLUTIONS Volume: 21 Issue: 3 Pages: 1341-1353 Published: JUL 2017	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 4. <b>Optimum stochastic modeling for GNSS tropospheric delay estimation in real-time</b> By: Hadas, Tomasz; Teferle, Felix Norman; Kazmierki, Kamil; et al. GPS SOLUTIONS Volume: 21 Issue: 3 Pages: 1069-1081 Published: JUL 2017	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 5. <b>Direct MSTID mitigation in precise GPS processing</b> By: Hernandez-Pajares, Manuel; Wielgosz, Pawel; Paziewski, Jacek; et al. RADIO SCIENCE Volume: 52 Issue: 3 Pages: 321-337 Published: MAR 2017	0	0	0	1	0	1	0.50
<input type="checkbox"/> 6. <b>IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time</b> By: Hadas, Tomasz; Bosy, Jaroslaw GPS SOLUTIONS Volume: 19 Issue: 1 Pages: 93-105 Published: JAN 2015	0	3	8	15	0	26	6.50
<input type="checkbox"/> 7. <b>Emergency department crowding</b> By: Barad, Miryam; Hadas, Talma; Yarom, Rony Adkerman; et al. Book Group Author(s): IEEE Conference: 19th IEEE International Conference on Emerging Technology and Factory Automation (ETFA) Location: Barcelona, SPAIN Date: SEP 16-19, 2014 Sponsor(s): Univ Politecnica Catalunya; IEEE Ind Elect Soc; IEEE 2014 IEEE EMERGING TECHNOLOGY AND FACTORY AUTOMATION (ETFA) Published: 2014	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> 8. <b>Performance of ZTD models derived in near real-time from GBAS and meteorological data in GPS fast-static positioning</b> By: Wielgosz, P.; Krukowska, M.; Paziewski, J.; et al. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 24 Issue: 12 Article Number: 125802 Published: DEC 2013	2	2	3	2	0	9	1.50
<input type="checkbox"/> 9. <b>Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique</b> By: Hadas, T.; Kaplon, J.; Bosy, J.; et al. MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 24 Issue: 5 Article Number: 055003 Published: MAY 2013	7	7	2	10	0	27	4.50
<input type="checkbox"/> 10. <b>Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data</b> By: Bosy, J.; Kaplon, J.; Rohm, W.; et al. ANNALES GEOPHYSICAE Volume: 30 Issue: 9 Pages: 1379-1391 Published: 2012	3	6	6	5	0	23	3.29

Rysunek 2. Raport cytowani wg. Web of Science (cz. 2)

- Odbycie zagranicznych staży naukowych – 4;
- Ukończenie kursów specjalistycznych dotyczących opracowania obserwacji GNSS – 2;
- Recenzowanie artykułów naukowych w czasopismach wyróżnionych w Journal Citation Reports – 21;
- Członkostwo w międzynarodowych organizacjach naukowych: International GNSS Service IGS), International Association of Geodesy (IAG);
- 95 wystąpień na konferencjach naukowych (postery i referaty), w tym 19 wygłoszonych referatów;
- Współopiekun Studenckiego Koła Naukowego Geodetów na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu;
- Współzałożyciel Studenckiego Koła Naukowego Geoinformatyki na Uniwersytecie Przyrodniczym we Wrocławiu;

- Uczestnictwo w międzynarodowych projektach badawczych – 4 (w tym 1 jako kierownik z ramienia UPWr);
- Uczestnictwo w krajowych projektach badawczych – 6 (w tym 1 jako kierownik);
- Krajowe nagrody za działalność naukową – 6;
- Promotorstwo prac dyplomowych- 8 (1 magisterska, 7 inżynierskich);
- Opiekun pomocniczy w przewodzie doktorskim – 1.

Szczegółowy opis powyższych osiągnięć znajduje się w załączniku 3, część II i III.

### c) Wykaz pozostałych publikacji niewchodzących w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie

#### Po uzyskaniu stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

1. Hernández-Pajares M., Wielgosz P., Paziewski J., Krypiak-Gregorczyk A., Krukowska M., Stępnia K., Kapłon J., Hadaś T., Sośnica K., Bosy J., Orus-Perez R., Monte-Moreno E., Yang H., Garcia-Rigo A., Olivares-Pulido G., 2017, *Direct MSTID mitigation in precise GPS processing*, Radio Science, Vol. 52 No. 3, 2017, pp. 321-337 (pkt. 20, IF=1.581);
2. Banville S., Sieradzki R., Hoque M., Węzka K., Hadaś T., 2017, *On the estimation of higher-order ionospheric effects in precise point positioning*, GPS Solutions, Vol. 21 No. 4, Berlin - Heidelberg 2017, pp. 1817-1828 (pkt. 35, IF=4.061);
3. Sośnica K., Prange L., Kaźmierski K., Bury G., Drożdżewski M., Zajdel R., Hadaś T., 2017, *Validation of Galileo orbits using SLR with a focus on satellites launched into incorrect orbital planes*, Journal of Geodesy, online, Berlin Heidelberg 2017, pp. 1-18 (pkt. 40, IF=2.949);
4. Martin A., Hadaś T., Dimas A., Anquela B., Berne J. L., 2015, *Influence of Real-time Products Latency on Kinematic PPP Results*, Proceedings of 5th International Colloquium Scientific and Fundamental Aspects of the Galileo Programme, 27-29 October 2015, Braunschweig, Germany (pkt. 0).

#### Przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora nauk technicznych:

5. Hadaś T., Bosy J., 2015, *IGS RTS precise orbits and clocks verification and quality degradation over time*, GPS Solutions, Vol. 19 No. 1, Berlin - Heidelberg 2015, pp. 93-105 (pkt. 30, IF=2.918);
6. Hadaś T., Kapłon J., Bosy J., Sierny J., K Wilgan, 2013, *Near-real-time regional troposphere models for the GNSS precise point positioning technique*, Measurement Science and Technology, Vol. 24 No. 5, 2013, pp. 055003, pp 1-12 (pkt. 30, IF=1.435);
7. Wielgosz P., Krukowska M., Paziewski J., Krypiak-Gregorczyk A., Stępnia K., Kapłon J., Sierny J., Hadaś T., Bosy J., 2013, *Performance of ZTD models derived in near real-time from GBAS and meteorological data in GPS fast-static positioning*, Measurement Science and Technology, Vol. 24 No. 12, 2013, pp. 125802 (8) (pkt. 35, IF=1.435);
8. Bosy J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J., Hadaś T., 2012, *Near real-time estimation of water vapour in the troposphere using ground GNSS and the meteorological data*, Annales Geophysicae, Vol. 30 No. , Göttingen, Germany 2012, pp. 1379-1391 (pkt. 25, IF=1.842);

9. Hadaś T., 2015, *GNSS-Warp Software for Real-Time Precise Point Positioning*, Artificial Satellites. Journal of Planetary Geodesy, Vol. 50 No. 2, Warsaw, Poland; Oldenburg, Germany 2015, pp. 59-76 (pkt. 6);
10. Hadaś T., Bosy J., Kapłon J., Rohm W., Sierny J., Wilgan K., 2014, Meteorologia GNSS, Geodeta. Magazyn Geoinformacyjny, Vol. 1 No. (244), Warszawa 2014, pp. 44-48 (pkt. 0);
11. Hadaś T., 2012, *GNSS software receiver*. Proceedings of the 14th Professional Conference of Postgraduate Students "JUNIORSTAV 2012", Brno, Czech Republic, 26.01.2012 , pp. 420 (pkt. 0);
12. Hadaś T., Bosy J., 2009, *Niwelacja satelitarna GNSS z wykorzystaniem serwisu NAWGEO systemu ASG-EUPOS*, Acta Scientiarum Polonorum, s. Geodesia et Descriptio Terrarum, Vol. 8 No. 2, Wrocław 2009, pp. 53-66 (pkt. 6).

Tomasz Hadaś