

**AUTOREFERAT
PRZEDSTAWIAJĄCY OPIS DOROBKU
I OSIĄGNIĘĆ NAUKOWYCH HABILITANTKI**

dr inż. Anna Krypiak-Gregorczyk

Instytut Geodezji

Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa

Uniwersytet Warmińsko-Mazurski

w Olsztynie

Olsztyn 2018

SPIS TREŚCI

1. Imię i Nazwisko	2
2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej.....	2
3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	2
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 (t.j. z dnia 15 września 2017, Dz. U. 2017 r. poz. 1789) w związku z art. 179 ust. 2 ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym (Dz. U. z 2018 r. poz. 1669).....	3
4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego	3
4.2. Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.....	3
4.3. Omówienie celu naukowego i uzasadnienie podjęcia tematu badawczego.....	4
4.4. Omówienie osiągniętych wyników monotematycznego cyklu publikacji wraz z omówieniem ich wykorzystania	7
5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	33
5.1. Oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze	33
5.2. Wykaz innych opublikowanych prac naukowych spoza tematyki dotyczącej cyklu publikacji powiązanych tematycznie	33
5.3. Wskaźniki dorobku naukowego	34
5.4. Raport z Web of Science (STAN NA 23.11.2018 R.).....	36



1. IMIĘ I NAZWISKO

Anna Krypiak-Gregorczyk

2. POSIADANE DYPLOMY, STOPNIE NAUKOWE – Z PODANIEM NAZWY, MIEJSCA I ROKU ICH UZYSKANIA ORAZ TYTUŁU ROZPRAWY DOKTORSKIEJ

- **Tytuł zawodowy magistra inżyniera** w zakresie geodezji i kartografii nadany przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM), 22.06.2005 r. (studia stacjonarne)

Tytuł pracy magisterskiej: *Badanie powtarzalności wyznaczeni współrzędnych i długości wektorów GPS w okresie maksymalnej aktywności słonecznej.*

Promotor: prof. dr hab. inż. Andrzej Krankowski (UWM)

- **Tytuł zawodowy magistra** w zakresie zarządzania nieruchomościami nadany przez Radę Wydziału Zarządzania Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, 28.06.2007 r. (studia stacjonarne)

Tytuł pracy magisterskiej: *Dochody z nieruchomości na tle dochodów własnych gminy miejskiej Ciechanów.*

Promotor: dr Agnieszka Napiórkowska-Baryła (UWM)

- **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia w specjalności geodezja satelitarna, nadany przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie, dn. 13.06.2011 r.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *Wykorzystanie obserwacji GNSS z systemu FORMOSAT—3/COSMIC do poprawy monitorowania jonosfery dla potrzeb Służby IGS.*

Promotor rozprawy doktorskiej:
prof. dr hab. inż. Andrzej Krankowski (UWM)

Recenzenci rozprawy doktorskiej:
dr hab. Hanna Rothkaehl, prof. nadzw. (Centrum Badań Kosmicznych PAN)
prof. dr hab. Andrzej Drożyner, prof. zw. (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu)

3. INFORMACJE O DOTYCHCZASOWYM ZATRUDNIENIU W JEDNOSTKACH NAUKOWYCH

- **2005-2010** studia doktoranckie na Wydziale Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM);
- **2010-2011** asystent w Katedrze Astronomii i Geodynamiki na Wydziale Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM);
- **2011-2012** adiunkt w Katedrze Astronomii i Geodynamiki na Wydziale Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM);
- **od 2012** roku adiunkt w Instytucie Geodezji na Wydziale Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (UWM) (**w tym urlop macierzyński w 2014 roku**).

Anna Krypiak-Gregorczyk

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 (T.J. Z DNIA 15 WRZEŚNIA 2017, Dz. U. 2017 R. POZ. 1789) W ZWIĄZKU Z ART. 179 UST. 2 USTAWY Z DNIA 3 LIPCA 2018 R. PRZEPISY WPROWADZAJĄCE USTAWĘ – PRAWO O SZKOLNICTWIE WYŻSZYM (Dz. U. z 2018 R. POZ. 1669)

4.1. TYTUŁ OSIĄGNIĘCIA NAUKOWEGO

Rozprawę habilitacyjną pt.: „*Nowe metody regionalnego modelowania jonosfery w oparciu o wysoce dokładne dwuczęstotliwościowe obserwacje fazowe systemów GPS i GLONASS*” stanowi cykl publikacji naukowych powiązanych tematycznie.

4.2. SPIS PUBLIKACJI STANOWIĄCYCH OSIĄGNIĘCIE NAUKOWE

Spis prac tworzących cykl publikacji powiązanych tematycznie, stanowiących osiągnięcie naukowe, wraz z udziałem procentowym habilitantki w przygotowaniu pracy, wskaźnikiem *Impact Factor* czasopisma oraz liczbą punktów czasopisma wg MNIŚW z roku opublikowania przedstawia tabela 1. Szczegółowy opis wkładu habilitantki w przygotowanie poszczególnych prac zawiera załącznik nr 3.

Tabela 1 Spis prac tworzących cykl publikacji powiązanych tematycznie

Ozn. Publ.	Publikacja	Udział habilitantki	Liczba punktów	Impact Factor
B.1	Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Gościewski D., Paziewski J. (2013) <i>Validation of approximation techniques for local total electron content mapping. Acta Geodynamica et Geomaterialia</i> , Vol. 10, No. 3(171)	40%	10	0.667
B.2	Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P. (2018) <i>Carrier phase bias estimation of geometry-free linear combination of GNSS signals for ionospheric TEC modeling. GPS Solutions</i> , Vol. 22, No.2, p.1:9. doi:10.1007/s10291-018-0711-4	75%	35	4.727
B.3	Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Jarmołowski W. (2017) <i>A new TEC interpolation method based on the least squares collocation for high accuracy regional ionospheric maps. Measurement Science and Technology</i> , Vol. 28, No. 4, p.045801. doi:10.1088/1361-6501/aa58ae	60%	35	1.685
B.4	Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Borkowski A. (2017) <i>Ionosphere Model for European Region Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation. Remote Sensing</i> , Vol. 9, No.12, p.1221, doi:10.3390/rs9121221	60%	35	3.406
B.5	Krypiak-Gregorczyk A. (2018) <i>Ionosphere response to three extreme events occurring near spring equinox in 2012, 2013 and 2015, observed by regional GNSS-TEC model. Journal of Geodesy</i> , doi.org/10.1007/s00190-018-1216-1	100%	40	4.633
Suma IF				15.118

Anna Krypiak-Gregorczyk

4.3. OMÓWIENIE CELU NAUKOWEGO I UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU BADAWCZEGO

4.3.1. CEL NAUKOWY

Zasadniczym celem naukowym prowadzonych przez habilitantkę badań, tworzących monotematyczny cykl publikacji, było opracowanie nowego regionalnego modelu jonosfery w oparciu o wysoce dokładne niezróżnicowane dwuczęstotliwościowe obserwacje fazowe systemów GPS i GLONASS, a tym samym **opracowanie nowych metod regionalnego modelowania jonosfery**.

Prowadzonym przez habilitantkę badaniom przyświecała hipoteza: *zastosowanie precyzyjnych obserwacji fazowych z dwóch systemów satelitarnych GPS i GLONASS pozwoli osiągnąć wyższą dokładność opracowywanego modelu w porównaniu do powszechnie stosowanych metod opartych wyłącznie na wygładzanych obserwacjach kodowych, pochodzących najczęściej z systemu GPS.*

4.3.2. UZASADNIENIE PODJĘCIA TEMATU BADAWCZEGO

Jonosfera odgrywa aktywną i ważną rolę w kształtowaniu pogody kosmicznej (*space weather*), w naziemnej i satelitarnej łączności radiowej oraz w nawigacji satelitarnej, a tym samym wpływa na ważne systemy geodezyjne, jak GNSS (*Global Navigation Satellite System*). Powszechnie wiadomo, że główne źródło błędów mające największy wpływ na wyniki opracowania obserwacji GNSS stanowią błędy związane z propagacją sygnału w atmosferze: refrakcja jonosferyczna i troposferyczna (Leick i in. 2015). Wraz ze wzrostem wykorzystania satelitarnych technik geodezyjnych wzrasta zapotrzebowanie na bardziej wiarygodne i niezawodne opracowanie obserwacji. Tym samym konieczne jest minimalizowanie skutków istniejących źródeł błędów, w tym spowodowanych jonosferą.

Wraz z rozwojem globalnych nawigacyjnych systemów satelitarnych GNSS wzrosły możliwości badania jonosfery, w szczególności pojawiła się możliwość ciągłego prowadzenia pomiarów w skali globalnej i o szerokim zasięgu przestrzennym. Nieustający rozwój technologii GNSS skutkujący zwiększeniem precyzji czyni te globalne systemy jednymi z najbardziej wydajnych sposobów modelowania i monitorowania całkowitej zawartości elektronów (*total electron content-TEC*), stanowiących doskonałe uzupełnienie klasycznego monitorowania zmian zachodzących w jonosferze za pomocą sieci naziemnych jonosond. Ponadto systemy GNSS stwarzają możliwość doskonalenia metod tworzenia wysokorozdzielczych modeli jonosfery, co w przypadku ograniczonej liczby jonosond oraz dostarczaniu przez nie informacji jedynie o stanie dolnej części jonosfery i tylko na ograniczonym lokalnie obszarze jest praktycznie niemożliwe.

Z drugiej strony, z uwagi na decydujący wpływ jonosfery na możliwość wyznaczania nieoznaczoności pomiarów fazowych, dokładna znajomość stanu tej warstwy odgrywa kluczową rolę w wyznaczaniu precyzyjnej pozycji na podstawie obserwacji GNSS. Jest to szczególnie ważne w technice pozycjonowania RTK (*real time kinematic*), a także w nowoczesnych metodach pozycjonowania absolutnego PPP (*precise point positioning*). Dowiedziono, że opóźnienie jonosferyczne charakteryzuje się korelacją przestrzenną malejącą wraz ze zwiększaniem długości wektorów GNSS. Z tego też względu istnieje wyraźna trudność w usunięciu efektów jonosferycznych za pomocą podwójnego różnicowania obserwacji (*double differencing - DD*) (Hu i in. 2005; Wielgosz 2011). Należy podkreślić, że w pozycjonowaniu statycznym, opierającym się na dłuższych sesjach obserwacyjnych, istnieje możliwość wykorzystania liniowej kombinacji sygnałów L1 i L2, zwanej *ionosphere-free* (L_{IF}). Jednakże nieoznaczoności fazy L_{IF} tracą swój całkowity charakter i nie mogą zostać wyznaczone

Anna Krypiak-Gregorczyk

z wykorzystaniem tej kombinacji (Leick i in. 2015). Z kolei wyznaczenie nieoznaczoności pomiarów fazowych jest podstawowym warunkiem uzyskania precyzyjnej pozycji. W celu wyznaczenia nieoznaczoności w pomiarach statycznych można też stosować kombinację *wide lane* (L_{WL}), która jednak nadal jest podatna na wpływ jonosfery. Precyzyjne pozycjonowanie GNSS wymaga więc dokładnych poprawek jonosferycznych w celu szybkiego i poprawnego wyznaczenia nieoznaczoności pomiarów fazowych. Fakt ten jest szczególnie istotny nie tylko w przypadku rozwiązań jednoczesotliwościowych, ale także w rozwiązaniach wieloczesotliwościowych (Kashani i in. 2007, Khodabandeh i Teunissen 2015, Hernández-Pajares i in. 2017). Z tego też względu precyzyjne opracowanie obserwacji GNSS wymaga budowania dokładnych modeli jonosfery.

Niezwykle istotny jest również fakt, że górna warstwa ziemskiej atmosfery charakteryzuje się silną dynamiką zmian, nie tylko w okresie burz magnetycznych czy też rozbłysków słonecznych. Refrakcja jonosferyczna jest związana z częstotliwością sygnału i liczbą elektronów na drodze sygnału od satelity do odbiornika (Hofmann-Wellenhof i in. 2008). Natomiast opóźnienie jonosferyczne, w uproszczeniu, jest odwrotnie proporcjonalne do kwadratu częstotliwości sygnału (Hunsucker i Hargreaves 2002). Wielkość opóźnienia jonosferycznego sygnałów GNSS może przybierać wartości od 1m do ponad 100 m. Należy podkreślić, że jonosfera, jako aktywna warstwa, z uwagi na jej wrażliwość na aktywność słoneczną odgrywa ważną rolę w kształtowaniu pogody kosmicznej. Ta zaś, w związku z gwałtownym rozwojem infrastruktury technicznej ma coraz większy wpływ na społeczeństwo poprzez negatywne oddziaływanie na systemy satelitarne, energetyczne, transport lotniczy, a w efekcie na światową gospodarkę (Schrijver i in. 2015). Z tego też względu badanie zachowania jonosfery odgrywa nieocenioną rolę w zrozumieniu i prognozowaniu pogody kosmicznej. Należy podkreślić, że dynamiczne zmiany w jonosferze można podzielić na regularne i nagłe. Pierwsze związane są bezpośrednio z częstotliwością występowania czynników wpływających na jonosferę, takich jak 11 letni cykl słoneczny czy pory roku wywołujące wahania sezonowe tej warstwy atmosfery. Ten charakter zmian jest dość łatwy do modelowania (Bilitza i Reinisch 2008, Maruyama i in. 2009). Istnieją jednak takie zjawiska jak koronalne wyrzuty masy czy rozbłyski słoneczne, które mogą wywołać szereg nagłych zaburzeń w jonosferze. Zjawiska te często nazywane są burzą jonosferyczną i choć na ogół są zdarzeniem globalnym, to dość często pod wpływem zwiększonej gęstości elektronów dochodzi do regionalnego powstania obszarów z tzw. *storm-enhanced plasma density* (SED). Zdarzenia te charakteryzują się kilku a nawet dwudziestokrotnym wzrostem gęstości elektronów w stosunku do okresu spokojnego. Z tego też względu konieczne jest stałe monitorowanie stanu jonosfery w celu złagodzenia możliwych skutków pogody kosmicznej w systemach nawigacyjnych, komunikacyjnych oraz innej infrastruktury kosmicznej i naziemnej (Maruyama i in. 2009). Dokładność i rozdzielczość opracowanych dotychczas modeli jest jednak niewystarczająca do pełnego zrozumienia klimatologii jonosfery, a w szczególności w badaniu jej stanów zaburzonych charakteryzujących się wysoką dynamiką. W ostatnich latach międzynarodowe środowisko naukowe podjęło działania nad koordynacją tych badań, wyłaniając jako jeden z celów opracowanie coraz bardziej dokładnych modeli odzwierciedlających stan jonosfery (Schrijver et al. 2015). Także Międzynarodowa Asocjacja Geodezji (*International Association of Geodesy - IAG*) wspiera i koordynuje badania jonosfery poprzez Komisję 4 *IAG Positioning & Applications* i jej grupy robocze. Należy podkreślić, że habilitantka jest aktywnym członkiem grupy roboczej *Real-time Ionosphere Monitoring*.

Współcześnie, z uwagi na złożoność i różnorodność procesów zachodzących w jonosferze, rozwijanych jest kilka podejść do jej modelowania. Modelem opartym na fizycznych właściwościach jonosfery jest globalny model asymilacyjny jonosfery - *the Global Assimilative Ionospheric Model* (Schunk i in. 2004). Wciąż rozwijane są modele empiryczne, takie jak *the International Reference Ionosphere* (IRI) (Bilitza i in. 2011) oraz *NeQuick2* (Nava i in. 2011). Najlepsze dokładności modelowania uzyskuje się jednak

Anna Krypiak-Gregorczyk

z wykorzystaniem obserwacji z satelitarnych technik geodezyjnych do estymacji parametrów modelu (Alizadeh i in. 2015). Ten rodzaj modelowania, z racji wykorzystywania obserwacji GNSS, stał się obiektem zainteresowania habilitantki.

Literatura przedmiotu wskazuje, że większość obecnie dostępnych modeli jonosfery, zarówno globalnych jak i regionalnych, charakteryzuje niska rozdzielczość czasowo-przestrzenna. Wynika to z faktu, że modele te najczęściej oparte są na wykorzystaniu wygładzanych fazowo obserwacji pseudoodległości, które charakteryzują się niską dokładnością, co wymaga znacznego wygładzania wyników (Schaer 1999; Hernández-Pajares i in. 2011). W rezultacie, opóźnienie jonosferyczne otrzymane z tak opracowanych obserwacji reprezentuje względnie małą dokładność na poziomie kilku jednostek TEC ($1 \text{ Total Electron Content Unit} = 1 \text{ TECU} = 10^{16} \text{ el/m}^2$; 1 TECU odpowiada 0,162 m opóźnienia sygnału GPS L1). Z tego też względu, w rozwiązaniach globalnych, jak również regionalnych, główne ośrodki naukowe do modelowania jonosfery wykorzystują rozwinięcie całkowitej zawartości elektronów w szereg funkcji sferycznych (Schaer 1999; Hernández-Pajares i in. 2011; Schmidt i in. 2011). Skutkuje to niską dokładnością i rozdzielczością omawianych modeli jonosfery. Przykładowo, powszechnie stosowany model IGS (*the International GNSS Service*) charakteryzuje się rozdzielczością przestrzenną $5,0^\circ \times 2,5^\circ$, zaś czasową 2 godzin. Ponadto powszechne modele jonosfery często korzystają wyłącznie z danych jednego systemu, GPS. Kolejnym ważnym aspektem w modelowaniu jonosfery jest zastosowanie prostej funkcji odwzorowującej w modelu pojedynczej warstwy (*single layer model- SLM*). Przy niskich kątach elewacji może to skutkować wyznaczeniem wartości całkowitej zawartości elektronów znacznie odbiegających od ich rzeczywistego poziomu, nawet o kilka TECU (Rovira-Garcia i in. 2017; Zus i in. 2017).

W pracy Hernández-Pajares i in. (2017) przeprowadzona została ocena ogólnie dostępnych modeli jonosfery, globalnego modelu IGS, modeli opracowywanych przez centra Analiz IGS oraz modelu UQRG (popularny model opracowany na Politechnice w Barcelonie, Universitat Politècnica de Catalunya - UPC). Do oceny wykorzystano pionowy pomiar TEC (**vTEC**) pochodzący z opracowania obserwacji altimetrycznych w latach 2002-2015. Uzyskane wyniki wykazały, że dokładność absolutnego vTEC kształtuje się na poziomie 4-5 TECU (względnie: 15-25%). Dodatkowo porównano zmiany skośny TEC na drodze satelita - odbiornik (**sTEC**) podczas 4 wybranych dni 2015 roku dla 50 globalnie rozmieszczonych stacji, które nie były używane do opracowania analizowanych modeli. Badania te potwierdziły niską względną dokładność powszechnie dostępnych modeli, dochodzącą do 30% sTEC.

Wobec istotnego znaczenia jonosfery w rozwoju geodezji (np. precyzyjne pozycjonowanie, konserwacja systemów odniesienia) i nawigacji satelitarnej, czy też badaniach geodynamicznych i geofizycznych, habilitantka wysnuła wniosek, iż **niezbędne jest opracowanie wysoce dokładnego modelu stanu jonosfery, o zwiększonej rozdzielczości czasowo-przestrzennej w stosunku do powszechnie dostępnych globalnych i regionalnych modeli jonosfery**. Przeprowadzona zaś przez habilitantkę, po uzyskaniu stopnia doktora, analiza literatury przedmiotu dała podstawę do stwierdzenia, że w technice GNSS drzemie jeszcze znaczny, wciąż niewykorzystany potencjał, dotyczący wykorzystania precyzyjnych, niezróżnicowanych obserwacji fazowych do modelowania jonosfery.

Anna Krypiak-Gregorczyk

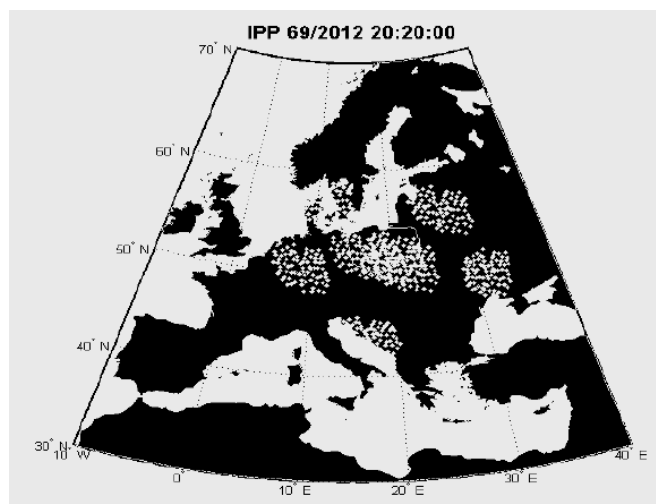
4.4. OMÓWIENIE OSIĄGNIĘTYCH WYNIKÓW MONOTEMATYCZNEGO CYKLU PUBLIKACJI WRAZ Z OMÓWIENIEM ICH WYKORZYSTANIA

Realizacja postawionego celu badawczego wymagała od habilitantki przeprowadzenia szeregu analiz, począwszy od zastosowania do modelowania jonosfery powszechnie wykorzystywanych wygładzanych fazowo obserwacji pseudoodległości, poprzez zbadanie różnych technik interpolacji, opracowanie metod wykorzystania obserwacji fazowych, aż do opracowania wysoce dokładnych, regionalnych map jonosfery opartych na obserwacjach fazowych. Opracowanie nowego modelu jonosfery wymagało opracowania autorskiej metodologii dokładnego modelowania jonosfery z wykorzystaniem obserwacji fazowych GNSS, a w szczególności rozwiązania problemu estymacji tzw. *carrier phase bias*, parametru obejmującego różnicę nieoznaczoności obserwacji fazowych na obu częstotliwościach sygnałów satelitarnych oraz różnice opóźnień sprzętowych. W konsekwencji stworzone zostały nowe algorytmy oraz ich implementacja w autorskim oprogramowaniu napisanym w środowisku Matlab.

4.4.1. WPŁYW WYBORU METODY INTERPOLACJI NA DOKŁADNOŚĆ MODELU JONOSFERY OPRACOWANEGO Z WYGŁADZANYCH FAZOWO OBSERWACJI PSEUDOODLEGŁOŚCI

W pierwszym etapie prowadzonych badań habilitantka przystąpiła do opracowania lokalnego modelu jonosfery dla Polski [B.1]. Do modelowania wykorzystane zostały dwuczęstotliwościowe dane obserwacyjne systemu GPS pochodzące z blisko 100 stacji referencyjnych krajowej sieci ASG-EUPOS. Habilitantka wykorzystwała tu metodologię przedstawioną w pracy [16]. Mianowicie, opóźnienie jonosferyczne zostało obliczone przy zastosowaniu kombinacji liniowej *geometry-free* wygładzonych fazowo obserwacji pseudoodległości. Międzyczęstotliwościowe opóźnienia sprzętowe (DCB) odbiorników zostały wyznaczone przez habilitantkę dla każdej stacji poprzez kalibrację z globalnymi mapami jonosfery (*Global Ionosphere Maps - GIMs*). W przypadku opóźnienia sprzętowego satelitów, wykorzystane zostały wartości DCB wyznaczone przez Centrum Analiz CODE (*Center for Orbit Determination in Europe*). Parametryzacja całkowitej zawartości elektronów oparta została na modelu pojedynczej nieskończenie cienkiej warstwy SLM (Ciraolo 1993; Georgiadiou 1994; Shagimuratov i in. 2002). Takie podejście zakłada, że wszystkie elektrony położone są na nieskończenie cienkiej warstwie, która znajduje się na wysokości 350 – 450 km. W omówionym w publikacji [B.1] modelu jonosfery przyjęto wysokość tej warstwy na 400 km. W celu wyznaczenia wartości pionowego TEC w punktach przebiecia jonosfery IPP (*the ionospheric pierce points*) wykorzystana została funkcja mapująca (odwzorowująca) modelu SLM. Ponadto przetwarzaniu poddano dane obserwacyjne z 30-sekundowym interwałem i kątem elewacji 20°. Zwiększenie kąta odcięcia horyzontu było podyktowane chęcią zminimalizowania błędów wyznaczenia pionowego TEC wynikających z zastosowania prostej funkcji mapującej jaką jest SLM. W efekcie obliczono wartości vTEC w punktach IPP dla wszystkich stacji sieci ASG-EUPOS dla każdej opracowywanej epoki obserwacyjnej, a więc co 30 sekund. Na tym etapie przeprowadzono analizę rozmieszczenia IPP, którego przykład na wybraną epokę obserwacyjną przedstawia rysunek 1. Białymi kropkami zaznaczone zostały punkty przebiecia jonosfery przez obserwacje ze stacji ASG-EUPOS.

Anna Krypiak-Gregorczyk



Rysunek 1 Przykład rozmieszczenia IPP dla stacji sieci ASG-EUPOS.

Źródło: [B.1]

Wykorzystanie danych wyłącznie ze stacji położonych w Polsce oraz tylko jednego systemu obserwacyjnego (GPS) skutkowało występowaniem obszarów o małej liczbie czy też zupełnym braku obserwacji. Takie klastrowe ułożenie punktów IPP, odzwierciedlające lokalizację IPP dla konkretnych satelitów obserwowanych przez wszystkie stacje ASG-EUPOS, wymagało dobrania odpowiedniej techniki/metody interpolacji w celu stworzenia siatki GRID zawierającej pionowe wartości TEC. Zastosowano dwa podejścia: lokalne, w którym interpolacja wykonywana jest dla każdego punktu siatki osobno i ogólne podejście używane jednocześnie dla wszystkich IPP wyliczonych w konkretnej epoce. Podejście lokalne skutkuje generowaniem nieciągłej siatki GRID, w której to wartości $vTEC$ zlokalizowane są jedynie wewnątrz i wokół klastrów. Należy jednak zaznaczyć, że takie rozwiązanie nie ma wpływu na użyteczność w pozycjonowaniu GNSS z uwagi na fakt, iż użytkownik takiej sieci, znajdujący się w jej obszarze będzie potrzebował poprawek opóźnienia jonosferycznego jedynie w punktach IPP wewnątrz klastrów.

Wyznaczenie całkowitej zawartości elektronów w punktach przebicia jonosfery dało podstawę do opracowania map stanu tej warstwy nad stacjami sieci ASG-EUPOS. Stworzono regularne siatki GRID z wartościami $vTEC$ o rozdzielczości przestrzennej $0,25^\circ$ zarówno w szerokości jak i długości geograficznej, przy wykorzystaniu 8 technik interpolacji różniących się wykorzystywanymi funkcjami jak również zasięgiem/promieniem poszukiwań punktów. Opis metod interpolacji można znaleźć w publikacji [B.1]. W kolejnym kroku wygenerowane zostały mapy całkowitej zawartości elektronów nad Polską z interwałem 5 minutowym.

Wszystkie metody interpolacji przetestowane zostały dla dwóch różnych poziomów aktywności geomagnetycznej (dzień zaburzony 9 marca 2012 r. z $\Sigma Kp = 44o$ i maksymalnym Kp osiągającym 8, dzień spokojny 20 marca 2012 r. z $\Sigma Kp = 10o$). Takie podejście pozwoliło ocenić opracowywany model w czasie różnych stanów jonosfery.

Jakość stworzonych map została sprawdzona na dwa sposoby:

- poprzez porównanie do powszechnie wykorzystywanych globalnych map pochodzących z Centrum Analiz CODE;

Anna Krypiak-Gregorczyk

- porównanie podwójnie zróżnicowanych poprawek opóźnienia jonosferycznego opracowanych na podstawie regionalnego modelu z wartościami referencyjnymi, wyznaczonym w pozycjonowaniu GPS.

Sprawdzenie dokładności absolutnego poziomu TEC w porównaniu do referencyjnych 2-godzinnych map TEC z centrum CODE wykazało, iż średnia różnica w wartościach TEC, obliczonych dla każdego punktu siatki GRID w ciągu 24 godzin, dla większości metod interpolacji nie przekroczyła 0,6 TECU. Wyjątkiem była metoda oparta na wielomianie globalnym 3 stopnia. Błędy RMS wyliczone dla różnic wartości $vTEC$ między mapami nie przekroczyły 1.5 TECU dla lokalnego podejścia, ponadto w większości technik okazały się niższe niż 1.0 TECU. Należy podkreślić, iż błędy RMS osiągnęły wyższe wartości dla dnia zaburzonego. Najgorsze rezultaty, wręcz nierealistyczne, zostały uzyskane dla wielomianu ogólnego stopnia 3. Sugeruje to, iż ten stopień jest zbyt wysoki i prowadzi do niewiarygodnych wyników, zwłaszcza w obszarach o braku punktów IPP. Ten przypadek uwypukla problem wpływu geometrii IPP na dokładność opracowywanych map jonosfery. Lokalne podejście do zwizualizowania jonosfery wyznaczonej z opracowania wygładzonych fazowo obserwacji pseudoodległości wykazuje więc dobrą zgodność z produktem CODE, a uzyskane błędy mieszczą się w zasięgu oficjalnej dokładności map CODE.

Kolejnym krokiem było sprawdzenie możliwości zastosowania map jonosfery opracowanych różnymi technikami interpolacyjnymi w precyzyjnym pozycjonowaniu. Analiza praktycznej dokładności map TEC została przeprowadzona poprzez porównanie podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego (DD) wyliczonego z modelu z prawdziwymi wartościami obliczonymi dla dwóch prostopadłych linii bazowych (Grejner-Brzezinska i in. 2006). Z uwagi na zasięg modelu oraz charakter zmian zachodzących w jonosferze wybrane zostały wektory zlokalizowane w centralnej Polsce oraz skierowane: północ-południe (N-S) wektor SOCH-CCHN o długości 77 km oraz zachód-wschód (W-E), wektor SOCH-MIMA o długości 90 km. Miara jakości opracowanych map jonosfery została wyrażona w postaci różnic między poprawkami zawierającymi podwójnie zróżnicowane opóźnienia jonosferyczne wyznaczone z map jonosfery w dwóch 24-godzinnych okresach, a wzorcowym podwójnie zróżnicowanym opóźnieniem jonosferycznym wyznaczonym z opracowania testowych wektorów. Wyniki dokładności poprawek jonosferycznych dla wszystkich analizowanych map w czasie dwóch różnych okresów aktywności jonosfery przedstawiają tabele 2 i 3. W celu dobrego zobrazowania wyników przedstawiono procentowy udział różnic poprawek DD w umownych granicach ± 10 cm i ± 20 cm, reprezentujących odpowiednio połowę i pełną długość fali sygnału L1.

Uzyskane wyniki wykazały dobrą zgodność opracowanych map jonosfery z mapami CODE. W dniu spokojnym dokładność poprawek jonosferycznych wygenerowanych z opracowanych map była wyraźnie wyższa niż w przypadku map CODE. Natomiast w czasie aktywnej jonosfery zbliżone wyniki do map CODE uzyskano dla techniki opartej na płaszczyźnie lokalnej (LP i NLP). Należy podkreślić jednak, że w przypadku wektora SOCH-MIMA, czyli zlokalizowanego zachód-wschód osiągnięta została lepsza dokładność dla wspomnianych metod interpolacji w porównaniu do map referencyjnych. Uzyskane wyniki pokazały potencjał zaproponowanej metody lokalnego modelowania jonosfery. Duże rozbieżności w uzyskanych wynikach z różnych technik interpolacyjnych uwypukliły istotę problemu z odpowiednim doбором metody interpolacji. Jednakże kluczowe dla habilitantki okazały się uzyskane, z tych wstępnych badań wyniki testów DD, które wykazały że dokładność opracowanego modelu jonosfery z opracowania wygładzonych fazowo obserwacji pseudoodległości jest z jednej strony wystarczająca jedynie by wspierać opracowanie dłuższych sesji statycznych z obserwacji GPS. Ponadto rezultaty uzyskane w publikacji [B.1] dowiodły, że opracowanie map stanu jonosfery przy użyciu

Anna Krypiak-Gregorczyk

różnych technik interpolacji może dać lepszą dokładność w stosunku do powszechnie używanego rozwinięcia w szereg funkcji sferycznych, nawet w przypadku wykorzystania wygładzonych fazowo obserwacji kodowych. Z drugiej zaś strony, opracowanie modelu jonosfery o jeszcze większej dokładności wyznaczenia całkowitej zawartości elektronów przy zastosowaniu odpowiedniej metody interpolacji rokuje stworzeniem map stanu jonosfery mogących wspierać pozycjonowanie szybkie statyczne czy też kinematyczne.

Osiągnięcie naukowe habilitantki powstałe w wyniku prac nad modelem jonosfery z opracowania wygładzonych fazowo obserwacji pseudoodległości, przedstawionym w publikacji [B.1]:

- opracowanie metodologii wyznaczenia międzyczęstotliwościowych opóźnień sprzętowych odbiorników GPS;
- praktyczne zastosowanie opracowanej metodologii do wyznaczania opóźnień sprzętowych dla systemu GPS;
- stworzenie lokalnego modelu jonosfery z opracowania wygładzanych fazowo obserwacji pseudoodległości o dokładnościach zbliżonych do powszechnie używanych map z centrum CODE.

Tabela 2 Dokładność poprawek podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego w dniu zaburzonym - 9 Marzec 2012 r. Źródło: [B.1]

% of the residuals within the selected limits			
Baseline and model		<±10cm	<±20cm
SOCH_CCHN	CODE	69,4	91,3
	NLP	67,7	92,2
	NLP2	64,2	89,6
	NTL	50,0	80,7
	LP	65,9	91,0
	LP2	64,1	88,4
	TL	50,1	80,5
	GP2	64,6	89,8
	GP3	63,5	88,5
SOCH_MIMA	CODE	79,9	95,7
	NLP	81,3	96,0
	NLP2	76,4	94,0
	NTL	54,2	83,9
	LP	80,0	95,9
	LP2	75,2	93,1
	TL	54,1	84,7
	GP2	77,9	95,7
	GP3	76,6	94,1

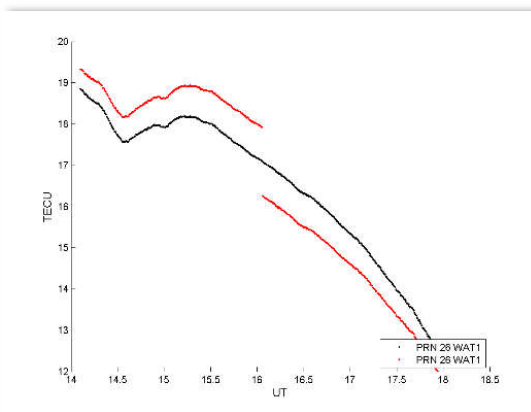
Tabela 3 Dokładność poprawek podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego w dniu spokojnym - 20 Marzec 2012 r. Źródło: [B.1]

% of the residuals within the selected limits			
Baseline and model		<±10cm	<±20cm
SOCH_CCHN	CODE	74,9	94,8
	NLP	77,5	95,4
	NLP2	78,3	95,2
	NTL	59,7	86,4
	LP	76,5	94,3
	LP2	76,8	94
	TL	59,5	86,3
	GP2	75,7	94,4
	GP3	75,8	93,9
SOCH_MIMA	CODE	61,7	84,1
	NLP	65,2	86,2
	NLP2	64,7	85,3
	NTL	48,5	77,4
	LP	63,2	85,0
	LP2	64,4	83,5
	TL	48,3	77,5
	GP2	63,4	84,9
	GP3	62,6	84,7

Ponadto w toku prowadzonych badań nad opracowaniem niniejszego modelu jonosfery habilitantka poddała analizom problem dokładności TEC wyznaczonego z wygładzonych fazowo obserwacji kodowych. Wykazano wpływ długości łuku obserwacji satelity na wartość wyznaczonej całkowitej

Anna Krypiak-Gregorczyk

zawartości elektronów (Rys. 2). Stwierdzono, że fakt ten ogranicza możliwość dalszego podniesienia dokładności modeli jonosfery opartych o te obserwacje. W konsekwencji osiągniętych wyników opracowanego lokalnego modelu jonosfery nad Polską oraz w obliczu przeprowadzonych licznych badań towarzyszących owemu modelowaniu, m. in. dotyczących problemu dokładności wygładzanych obserwacji kodowych, habilitantka postanowiła odejść w swoim autorskim podejściu od opracowania tych obserwacji, a skupić się na o wiele dokładniejszych, precyzyjnych obserwacjach fazowych. Taki też cel przyświecał kolejnym badaniom.



Rysunek 2 Wpływ długości łuku obserwacyjnego na dokładność wyznaczenia $vTEC$ z wygładzanych fazowo obserwacji pseudoodległości (20 marzec 2012 r.)

Źródło: Krypiak-Gregorczyk i inni, 2013.

4.4.2. NOWA METODA PARAMETRYZACJI TEC SŁUŻĄCA WYZNACZENIU PARAMETRÓW NIEOZNACZONOŚCI ORAZ OPÓŹNIEŃ SPRZĘTOWYCH ABSOLUTNYCH POMIARÓW FAZOWYCH GNSS

Opracowanie modelu jonosfery o wysokiej dokładności, z wyższą przestrzenną i czasową rozdzielczością, mogącego wspierać szybkie wyznaczenie nieoznaczoności fazy fali nośnej zostało oparte przez habilitantkę na wykorzystaniu niezróżnicowanych dwuczęstotliwościowych obserwacji fazowych systemów GPS oraz GLONSS oraz ich kombinacji liniowej *geometry-free* do wyznaczania TEC. Nowa metodologia przedstawiona przez habilitantkę w publikacji [B.2] może być wykorzystywana do modelowania jonosfery zarówno na poziomie lokalnym jak i regionalnym. Zaproponowana przez habilitantkę procedura opracowania map stanu jonosfery składa się z trzech etapów:

1. Estymacja nieoznaczoności oraz opóźnień sprzętowych pomiarów fazowych (tzw. *carrier phase bias*).
2. Obliczenie TEC w punktach przebicia jonosfery (IPP).
3. Interpolacja TEC w celu utworzenia regularnej siatki GRID (mapa TEC).

Dokładność ostatecznie wygenerowanych map stanu jonosfery zależy więc w znacznej mierze od dokładności estymacji nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych pomiarów fazy dla każdego wyznaczonego ciągłego łuku obserwacyjnego. Innymi słowy, **dokładne wyznaczenie nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych absolutnych pomiarów fazowych jest warunkiem koniecznym uzyskania wysoce dokładnych map TEC**. Ten niezwykle istotny i trudny do rozwiązania problem został przedstawiony w publikacji [B.2].

Anna Krypiak-Gregorczyk

Rozwijana przez habilitantkę metoda opracowania modelu jonosfery opiera się na nowej metodologii łącznej estymacji nieoznaczoności oraz opóźnień sprzętowych dwuczęstotliwościowych pomiarów fazowych. Równania 1 i 2 przedstawiają powszechnie znane równania obserwacyjne fazowych sygnałów L1 i L2.

$$L1_i^k = q_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta T_i^k - \Delta I_i^k - \lambda_1 N1_i^k + c(b_{L1}^k + b_{L1,i}) + \varepsilon \quad (1)$$

$$L2_i^k = q_i^k + c(\Delta t_i - \Delta t^k) + \Delta T_i^k - \xi \Delta I_i^k - \lambda_2 N2_i^k + c(b_{L2}^k + b_{L2,i}) + \varepsilon \quad (2)$$

gdzie: q_i^k – odległość geometryczna między satelitą k a odbiornikiem i ,
 Δt – błąd chodu zegara,
 ΔT_i^k – opóźnienie troposferyczne,
 ΔI_i^k – opóźnienie jonosferyczne,
 $\xi = \frac{f_1^2}{f_2^2}$ – współczynnik przeliczający opóźnienie jonosferyczne dla częstotliwości sygnału L1 do opóźnienia dla L2,
 f_1 i f_2 – częstotliwości sygnałów L1 i L2,
 λ_1 i λ_2 – długości fali sygnału L1 i L2,
 $N1$ i $N2$ – całkowitoliczbowa, początkowa liczba cykli pomiaru fazowego L1 i L2 (nieoznaczoność),
 b_{L1}^k i b_{L2}^k – opóźnienie sprzętowe satelity (dla sygnałów L1, L2),
 $b_{L1,i}$ i $b_{L2,i}$ – opóźnienie sprzętowe odbiornika (dla sygnałów L1, L2).

W celu uzyskania informacji o opóźnieniu jonosferycznym z obserwacji GNSS należy stworzyć kombinację liniową **geometry-free** (L_{GF}) dwuczęstotliwościowych obserwacji fazowych:

$$L_{i\ GF}^k = L1_i^k - L2_i^k = -\xi_{GF} \Delta I_i^k + B_{i\ GF}^k \quad (3)$$

w której $\xi_{GF} = 1 - \xi = 1 - \frac{f_1^2}{f_2^2} \approx -0.647$ jest współczynnikiem konwertującym opóźnienie jonosferyczne kombinacji L_{GF} na opóźnienie sygnału L1, f_1 i f_2 są częstotliwościami sygnałów na L1 i L2, $B_{i\ GF}^k$ jest parametrem zawierającym nieoznaczoności oraz opóźnienia sprzętowe pomiarów fazowych. Zastosowanie kombinacji L_{GF} do dwuczęstotliwościowych obserwacji fazowych umożliwi wyeliminowanie błędów związanych z geometrią pomiaru, opóźnienia troposferycznego oraz błędów spowodowanych niedokładnością zegarów odbiorników i satelitów GNSS (równanie 3). Niestety kombinacja L_{GF} poza informacją o opóźnieniu jonosferycznym, zawiera także nieoznaczoności oraz opóźnienia sprzętowe pomiarów fazowych, które w zaproponowanej, autorskiej metodzie należy wyznaczyć jako jeden parametr B_{GF} , zwany *carrier phase bias*.

$$B_{i\ GF}^k = \lambda_1 N_{i1}^k - \lambda_2 N_{i2}^k - (b_{L1}^k - b_{L2}^k) - (b_{L1,i} - b_{L2,i}) \quad (4)$$

Równanie 4 zawiera: b - opóźnienia sprzętowe (satelity i odbiornika), N - nieoznaczoności fazy nośnej, gdzie λ_1 i λ_2 to długości fali sygnałów L1 i L2.

W pracy [B.2] przedstawiona została metoda estymacji parametru B_{GF} poprzez opracowanie odpowiedniego modelu matematycznego obserwacji, który jest rozwiązywany metodą najmniejszych kwadratów. Parametr B_{GF} łączący w sobie nieoznaczoności i opóźnienia sprzętowe estymowany jest dla każdego ciągłego łuku obserwacyjnego (równania 3, 4) . W procesie przetwarzania obserwacji,

Anna Krypiak-Gregorczyk

parametryzacja jonosfery może odbywać się co 10-20 minut przy zastosowaniu szerokiego wachlarza różnych funkcji, np. rozwinięcie w szereg funkcji sferycznych (SHE), funkcje sklepane, wielomiany ogólne czy też wielomiany lokalne [B1].

Model, a zatem też macierz współczynników \mathbf{A} , zawiera dwie grupy parametrów: (1) zależne od epoki parametry funkcji reprezentujących jonosferę [A_i] oraz (2) stałe w czasie parametry [A_B] czyli *carrier phase bias* B_{GF} obserwacji fazowych estymowane dla każdego ciągłego łuku L_{GF} . [L] natomiast jest wektorem obserwacji L_{GF} .

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{I_1} & \cdots & A_B \\ & A_{I_2} & \cdots & A_B \\ & & \ddots & \vdots \\ & & \cdots & A_{I_n} & A_B \end{bmatrix} \quad \mathbf{L} = \begin{bmatrix} L_{GF_i} \\ L_{GF_i} \\ \vdots \\ L_{GF_i} \end{bmatrix} \quad (5)$$

Zakładając, że wszystkie obserwacje są tej samej precyzji i nieskorelowane macierz wag przyjmuje postać macierzy jednostkowej. Powstały układ składa się z bardzo dużej liczby obserwacji. Przeprowadzone testy wewnętrzne wykazały, że zastosowanie wagowania obserwacji zależnego od elewacji nie poprawia wyników. Ponadto, ze względu na przestrzenną korelację jonosfery, funkcja ją parametryzująca musi charakteryzować się odpowiednią rozdzielczością przestrzenną. Wybrana funkcja opisująca jonosferę służy jedynie do wyznaczenia nieznanego parametru B_{GF} , a parametry tej funkcji nie są wykorzystywane na dalszym etapie obliczeń. Ostatecznie rozwiązanie modelu prowadzi do wyznaczania wspólnego parametru zawierającego nieoznaczoności i opóźnienia sprzętowe absolutnych pomiarów fazowych. Znajomość tego parametru pozwala z kolei w etapie (2) wyznaczyć precyzyjne wartości skośnego opóźnienia jonosferycznego w punktach przebicia jonosfery:

$$\Delta I_i^k = \frac{L_{iGF}^k - B_{iGF}^k}{-\xi_4} \quad (6)$$

Skośne opóźnienie zostaje następnie przekształcone w pionowe opóźnienie za pomocą funkcji mapującej SLM. Ostateczne, dokładne, wysokorozdzielcze mapy $vTEC$ uzyskuje się w etapie (3) w wyniku zastosowania dowolnie dobranej metody interpolacji pionowego TEC obliczonego w etapie (2). W omawianym modelowaniu zastosowany został model jednowarstwowy oraz powiązana z nim funkcja mapująca SLM (Schaer 1999; Shagimuratov i in. 2002). Z powodu błędów związanych z prostą funkcją mapującą jaką jest SLM, w proponowanym podejściu zaleca się zwiększenie kąta odcięcia horyzontu dla obserwacji GNSS do 20 ° - 30 °. Należy tu wspomnieć, że zaproponowane podejście (etap 1 i 2) określane jest często terminem *two-step adjustment*.

4.4.2.1. DOKŁADNOŚĆ WYZNACZENIA PARAMETRU B (CARRIER PHASE BIAS) ZAWIERAJĄCEGO NIEOZNACZONOŚCI I OPÓŹNIENIA SPRZĘTOWE

Przedstawione w publikacji [B.2] podejście do modelowania jonosfery z opracowania absolutnych pomiarów fazowych zostało sprawdzone pod kątem oceny dokładności łącznego wyznaczenia, w etapie 1, nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych absolutnych pomiarów fazowych oraz dokładności wartości TEC w punktach przebicia jonosfery otrzymanych w etapie 2.

Analizy przeprowadzono dla 7 dni marca 2012 roku. Okres ten charakteryzował się występowaniem zmiennych warunków w jonosferze, w tym silnej burzy geomagnetycznej. Opracowaniu poddane

Anna Krypiak-Gregorczyk

zostały obserwacje z systemów GPS i GLONASS z ponad 200 stacji europejskich. Wstępne przetwarzanie danych zostało przeprowadzone z 30 sekundowym interwałem, zaś jonosfera została sparametryzowana za pomocą rozwinięcia w szereg funkcji sferycznych w przedziałach 20 minutowych. Parametr B_{GF} zawierający nieoznaczoności oraz opóźnienia sprzętowe estymowano dla każdego ciągłego łuku obserwacyjnego wraz z parametrami rozwinięcia w szereg funkcji sferycznych. Metoda ta pozwoliła oddzielić wartości skośnego opóźnienia jonosferycznego od nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych obserwacji fazowych. Wyznaczony w etapie (1) *carrier phase bias* dla każdego łuku obserwacyjnego został następnie wykorzystany w etapie (2) do wyznaczenia precyzyjnych wartości skośnej całkowitej zawartości elektronów (równanie 6).

Dokładność estymowanego parametru nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych, tym samym poprawność proponowanej metody, została sprawdzona poprzez analizę różnic wyznaczeń *carrier phase bias* na granicy dnia. Badania przeprowadzono dla 12 stacji leżących w środkowej Europie, dla 2 wariantów kąta odcięcia horyzontu: 30° i 20°. Statystyki dotyczące średnich różnic między wartościami *carrier phase bias* na granicy dnia, ich wartością minimalną, maksymalną, średnim błędem kwadratowym RMS dla dwóch analizowanych wariantów odcięcia horyzontu, dla wszystkich satelitów GPS i GLONASS obserwowanych przez 12 wybranych stacji przedstawiają tabele 4 i 5. Analizy pokazują, że zastosowanie przedstawionego podejścia powoduje różnice w wyznaczeniu *carrier phase bias* w zakresie ± 20 cm w 100% przypadków dla pierwszego wariantu (30°). Natomiast przez cały analizowany okres ponad 84% różnic w wyznaczeniu B_{GF} mieści się w zakresie ± 10 cm. W drugim wariantcie, dokładność wyznaczenia *carrier phase bias* zmniejsza się (tabela 5). Choć wartości RMS wzrosły tylko o 1 cm w porównaniu do pierwszego wariantu to istotne różnice można zaobserwować w wyznaczonych zakresach ± 10 cm i ± 20 cm. Zwiększenie kąta elewacji (wariant 1) poprawiło dokładność estymowanego parametru, jednakże takie podejście zmniejsza o około 10% liczbę obserwacji, a to z kolei może wpływać na dokładność wyznaczenia map $vTEC$. Na podkreślenie zasługuje fakt, że średnia dokładność wyznaczenia *carrier phase bias* kształtowała się na poziomie 7-8 cm, a więc poniżej 0,5 TECU.

Tabela 4 Statystyki różnic wyznaczenia *carrier phase bias* na granicy dnia (30°-kąt odcięcia horyzontu) [m]. Źródło: [B.2]

DOY	RMS	min	max	mean	< ± 10 cm [%]	< ± 20 cm [%]
67/68	0.09	-0.20	0.20	0.03	75.00	100.00
68/69	0.07	-0.11	0.15	0.03	89.47	100.00
69/70	0.06	-0.12	0.13	0.03	91.23	100.00
70/71	0.05	-0.10	0.13	0.02	95.92	100.00
71/72	0.07	-0.14	0.15	0.02	79.25	100.00
72/73	0.07	-0.12	0.14	0.02	78.57	100.00
mean	0.07				84.91	100.00

Anna Krypiak-Gregorczyk

Tabela 5 Statystyki różnic wyznaczenia *carrier phase bias* na granicy dnia (20°- kąt odcięcia horyzontu) [m]. Źródło: [B.2]

DOY	RMS	min	max	mean	<±10 cm [%]	<±20 cm [%]
67/68	0.10	-0.20	0.27	0.04	70.77	92.31
68/69	0.09	-0.05	0.21	0.06	66.67	98.48
69/70	0.06	-0.12	0.13	0.02	92.86	100.00
70/71	0.06	-0.12	0.14	0.02	90.00	100.00
71/72	0.07	-0.15	0.18	0.03	78.57	100.00
72/73	0.10	-0.28	0.19	0.01	71.25	93.75
mean	0.08				78.35	97.42

Wysoka dokładność wyznaczanych *carrier phase bias* znalazła odzwierciedlenie w dokładności pionowych wartości TEC obliczonych w sąsiednich epokach obserwacyjnych na granicy dnia. Należy podkreślić, że TEC pochodzi z różnych i niezależnych estymacji parametru B_{GF} , obliczonych z różnych dziennych plików RINEX. Tabele 6 i 7 przedstawiają statystyki różnic pionowego TEC na granicy dnia dla dwóch rozpatrywanych wariantów kąta odcięcia horyzontu 30° i 20°. Większość różnic w wyznaczeniu pionowego TEC mieści się w granicach ± 1 TECU, a mianowicie 94% i 87%, odpowiednio dla pierwszego i drugiego wariantu.

Tabela 6 Statystyki różnic wyznaczenia pionowego TEC na granicy dnia (30°- kąt odcięcia horyzontu) [TECU]. Źródło: [B.2]

DOY	RMS	min	max	mean	<0.5 TECU [%]	<1 TECU [%]
67/68	0.72	0.02	1.81	0.55	56.14	87.72
68/69	0.54	0.03	1.33	0.46	61.40	96.49
69/70	0.49	0.00	1.11	0.39	68.97	96.55
70/71	0.42	0.00	1.07	0.34	76.00	98.00
71/72	0.57	0.02	1.21	0.48	60.38	94.34
72/73	0.58	0.00	1.11	0.47	61.40	89.47
mean	0.55				64.05	93.76

Tabela 7 Statystyki różnic wyznaczenia pionowego TEC na granicy dnia (20°- kąt odcięcia horyzontu) [TECU]. Źródło: [B.2]

DOY	RMS	min	max	mean	<0.5 TECU [%]	<1 TECU [%]
67/68	0.79	0.00	2.08	0.59	61.54	76.92
68/69	0.74	0.02	1.79	0.61	46.15	81.54
69/70	0.46	0.02	1.13	0.38	71.43	97.14
70/71	0.45	0.00	1.13	0.36	76.27	94.92
71/72	0.57	0.01	1.51	0.45	59.70	91.04
72/73	0.69	0.01	1.58	0.52	61.84	81.58
mean	0.62				62.82	87.19

Anna Krypiak-Gregorczyk

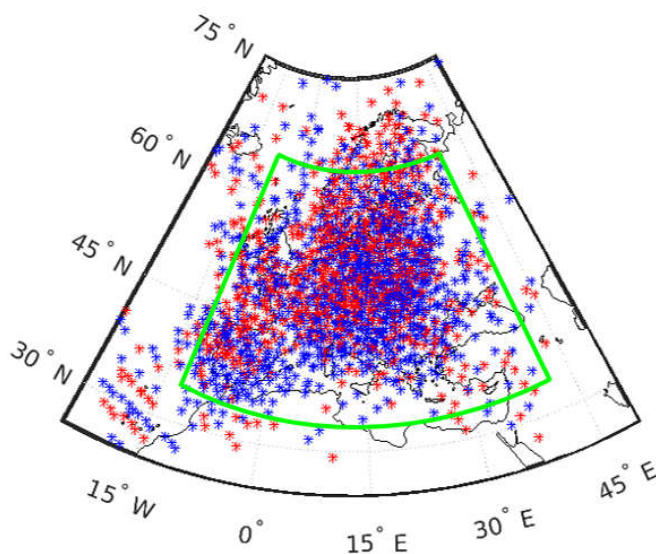
Osiągnięcie naukowe habilitantki powstałe w wyniku prac nad regionalnym modelem jonosfery z opracowania niezróżnicowanych obserwacji fazowych, przedstawione w publikacji [B.2]:

- opracowanie nowej, autorskiej metodologii łącznego wyznaczania nieoznaczoności i opóźnień sprzętowych absolutnych pomiarów fazowych systemów GPS i GLONASS;
- nowa metodyka oraz algorytmy wyznaczania całkowitej zawartości elektronów (TEC) w jonosferze, z opracowania absolutnych pomiarów fazowych systemów GPS i GLONASS;
- praktyczne zastosowanie opracowanej metodologii do precyzyjnego wyznaczenia wartości TEC w punktach przebiecia jonosfery z opracowania absolutnych pomiarów fazowych systemu GPS i GLONASS;
- wysoka dokładność zaproponowanej metody przekładająca się na wyznaczenie wysoce dokładnych wartości $vTEC$ w punktach IPP;

4.4.3. WYBÓR METODY INTERPOLACJI A DOKŁADNOŚĆ MAP TEC Z OPRACOWANIA ABSOLUTNYCH POMIARÓW FAZOWYCH GNSS

Ostatnim etapem prac nad stworzeniem dokładnych, wysokorozdzielczych map stanu jonosfery jest zastosowanie odpowiedniej metody interpolacji, dającej możliwość uzyskania lepszej dokładności w stosunku do powszechnie używanego rozwinięcia w szereg funkcji sferycznych. Taka konkluzja wypłynęła z publikacji [B.1]. Wobec zadowalających, z uwagi na dokładność, przedstawionych w pracy [B.2], rezultatów wyznaczenia pionowej całkowitej zawartości elektronów w punktach przebiecia jonosfery z opracowania absolutnych pomiarów fazowych, habilitantka w kolejnym kroku swoich badań sprawdziła zasadność użycia alternatywnych metod interpolacji do ostatecznego generowania map TEC w etapie (3) zaproponowanej metody [B.3, B.4].

Na tym etapie prac modelowanie jonosfery zostało oparte na opracowaniu dwuczęstotliwościowych obserwacji fazowych z systemów GPS i GLONASS z ponad 200 stacji europejskich. Przykład rozmieszczenia punktów przebiecia jonosfery wyznaczonych na godzinę 11:30 UT w dniu 17 marca 2015 roku przedstawia rysunek 3.



Rysunek 3 Przykładowe rozmieszczenie punktów IPP w dniu 17 marca 2015 r., godzina 11:30 UT (kropki niebieskie - GPS, czerwone-GLONASS, kolor zielony-obszar opracowywanej mapy jonosfery)

Źródło: [M.1]

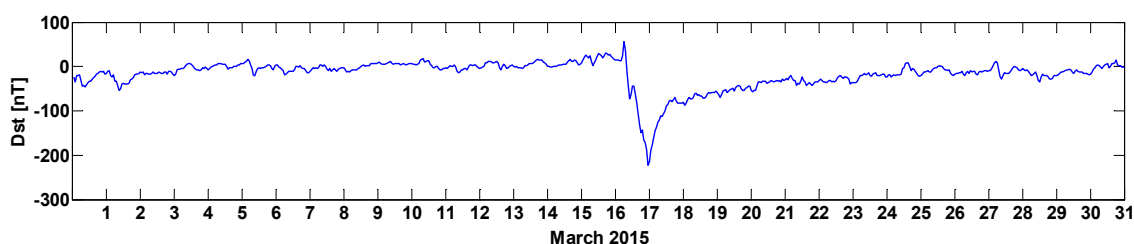
Anna Krypiak-Gregorczyk

4.4.3.1. ANALIZA DOKŁADNOŚCI POPRAWEK JONOSFERYCZNYCH GENEROWANYCH NA PODSTAWIE OPRACOWANYCH MAP TEC

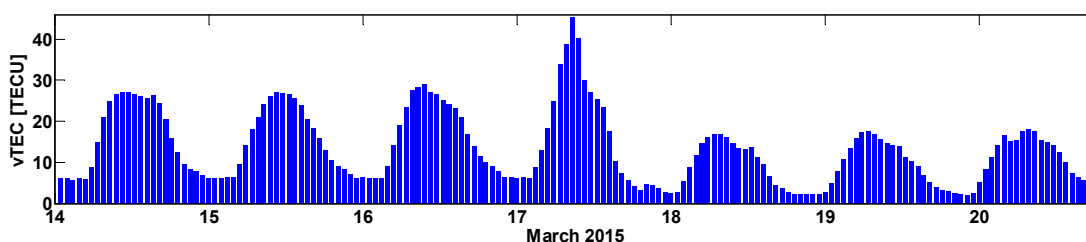
W toku prac nad wyborem najbardziej optymalnej metody interpolacji habilitantka sprawdziła jakość map TEC opracowanych m. in. metodą krigingu. Wysoce dokładne wartości vTEC wyznaczone w punktach przebicia jonosfery dały podstawę stworzenia, z zastosowaniem tej stochastycznej techniki interpolacji, regularnej siatki GRID o rozdzielczości przestrzennej $0,25^\circ$ zarówno dla szerokości jak i długości geograficznej. Na podstawie map TEC wygenerowane zostały poprawki jonosferyczne, które następnie zostały wykorzystane do poprawy precyzyjnego pozycjonowania GNSS. Badania służące zweryfikowaniu użyteczności modelu w pozycjonowaniu statycznym z wykorzystaniem specjalnie w tym celu zmodyfikowanego oprogramowania naukowego Bernese GNSS Software 5.2., zostały wykonane przy współpracy z naukowcami z Instytutu Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Potwierdziły one przydatność nowego regionalnego modelu jonosfery do opracowania wektorów o długości do ok. 100 km z wykorzystaniem obserwacji jednoczesnościowych (Wielgosz i in. 2015).

Wobec obiecujących rezultatów osiągniętych w toku prowadzonych badań nad wyborem metody interpolacji, habilitantka postanowiła sprawdzić przydatność alternatywnej stochastycznej metody interpolacji dla regionalnego modelowania TEC, często porównywanej z krigingiem zwykłym (*ordinary kriging*) metody kolokacji najmniejszych kwadratów (*least squares collocation LSC*) [B.3]. Należy podkreślić, że metoda LSC ze względu na wysoką dokładność i wiarygodność jest standardem, np. w modelowaniu pola siły ciężkości. Ponadto jest wykorzystywana w modelowaniu ruchów skorupy Ziemi czy też modelowaniu anomalii pola magnetycznego (El-Fiky i in. 1997; Arabelos i Tscherning 2003; Jarmołowski 2015).

W celu zbadania jakości regionalnego modelu jonosfery opracowanego z absolutnych pomiarów fazowych przy zastosowaniu interpolacji metodą LSC, analizy zostały przeprowadzone dla 7 dni marca 2015 roku. Testowy tydzień charakteryzował się zmiennymi warunkami w jonosferze, w tym występowaniem największej w obecnym 24 cyklu aktywności słonecznej, burzy geomagnetycznej, zwanej burzą Św. Patryka (17 marzec 2015 r.).



Rysunek 4 Zmiany indeksu Dst w marcu 2015 r. Źródło: [B.3]



Rysunek 5 Godzinne wartości vTEC nad Europą Środkową podczas analizowanego okresu (14- 20 Marzec 2015). Źródło: [B.3]

Anna Krypiak-Gregorczyk

Typowa burza geomagnetyczna obejmuje trzy fazy: początkową, główną oraz regeneracji. Rysunek 4 przedstawia zmienność indeksu DST (*disturbance storm time index*) w analizowanym okresie. Okres testowy obejmuje trzy spokojne dni przed burzą (14-16 marzec 2017 r.), pierwszy dzień burzy oraz trzy dni po burzy. Główna faza burzy miała miejsce 17 marca, wówczas indeks Dst spadł aż do -225nT. Rysunek 5 przedstawia średnie godzinne wartości vTEC dla Europy Środkowej wyznaczone przy wykorzystaniu stworzonego przez habilitantkę regionalnego serwisu modelowania jonosfery (<http://ginpos.uwm.edu.pl/iono/>).

W ciągu trzech dni przed burzą wartość pionowego TEC nie przekroczyła 29 TECU, podczas gdy w dniu zaburzonym nastąpił wyraźny wzrost do 45 TECU. W kolejnych dniach wskaźnik kształtował się na poziomie nieprzekraczającym 18 TECU.

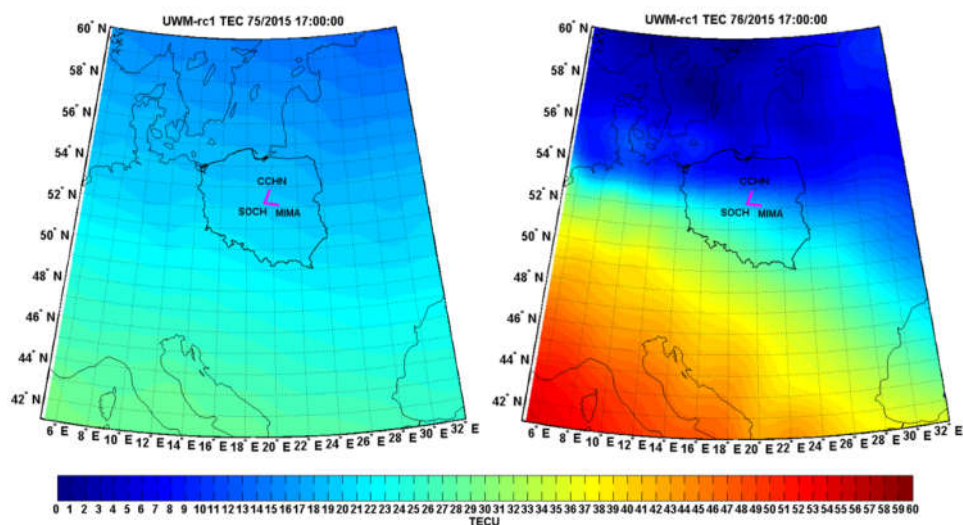
Zgodnie z metodologią przedstawioną w pracy [B.2], stworzenie wysoce dokładnego modelu jonosfery wymagało opracowania absolutnych dwuczęstotliwościowych obserwacji fazowych. W omawianym modelowaniu do wyznaczenia precyzyjnych wartości TEC w punktach przebiecia jonosfery wykorzystane zostały wyłącznie 30 sekundowe obserwacje systemu GPS, pochodzące z krajowej sieci ASG-EUPOS oraz stacji sieci EPN (*EUREF Permanent network*). W celu zminimalizowania błędów związanych z zastosowaniem funkcji mapującej SLM kąt odcięcia horyzontu został ustawiony na 30°. Zastosowanie interpolacji metodą kolokacji najmniejszych kwadratów pozwoliło stworzyć wysoce dokładny regionalny model jonosfery **UWM-rc1**. Szczegóły zastosowania metody LSC do stworzenia regularnej siatki GRID zawiera praca [B.3].

Badania nad weryfikacją jakości oraz przydatności regionalnego modelu UWM-rc1 do poprawy precyzyjnego pozycjonowania skoncentrowały uwagę habilitantki na bardziej wymagającym pozycjonowaniu kinematycznym. Testy numeryczne zostały oparte na trzech stacjach referencyjnych zlokalizowanych w centralnej Polsce. Analizom poddane zostały dwa wektory: skierowany w kierunku północ-południe (SOCH-CCHN) o długości 77 km, oraz w kierunku zachód-wschód (SOCH-MIMA) o długości 90 km (Rysunek 6). Model UWM-rc1 został użyty do obliczenia poprawek jonosferycznych dla analizowanych wektorów, które następnie zostały porównane do rozwiązania referencyjnego. Rozwiązanie analizowanych wektorów, przy wyznaczeniu poprawnych nieoznaczoności, daje możliwość wyznaczenia prawdziwego podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego z dokładnością bliską 1 cm (0,06 TECU) z wykorzystaniem liniowej kombinacji *geometry-free* sygnałów L1 i L2 obserwacji fazowych (Wielgosz i in. 2005). Rozwiązanie to ma na celu zbadanie jakości poprawek jonosferycznych poprzez porównanie wartości otrzymanych poprawek z wartościami obserwowanego opóźnienia. Z uwagi na wysoką dokładność wyznaczonych poprawek jonosferycznych, są one często wykorzystywane do oceny dokładności modeli jonosferycznych (Grejner-Brzezinska i in. 2006; [B.1]).

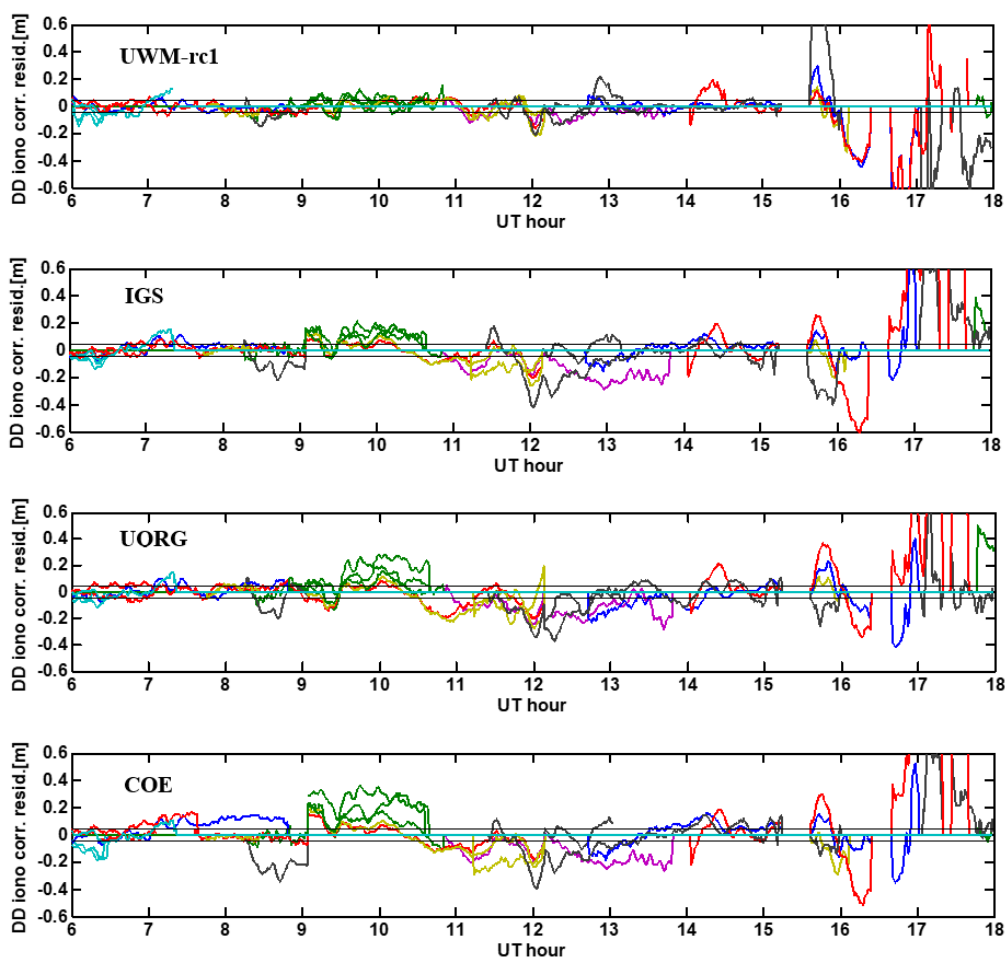
Analizom poddane zostały odchyłki otrzymane z porównania podwójnie zróżnicowanych poprawek jonosferycznych uzyskanych z modelu jonosfery do podwójnie zróżnicowanego opóźnienia referencyjnego, pochodzącego z rozwiązania testowych wektorów. Analogiczne analizy zostały przeprowadzone przy wykorzystaniu globalnych map IGS i UQRG oraz regionalnych COE dostarczanych przez Centrum Analiz CODE. Rysunek 7 przedstawia odchyłki modeli w odniesieniu do wartości referencyjnych dla dwóch wektorów w dniu zaburzonym (76/2015). Różne kolory odzwierciedlają różne pary satelitów używane do tworzenia podwójnie zróżnicowanych poprawek jonosferycznych. Rankiem dnia zaburzonego odchyłki względem wartości referencyjnych osiągnęły ± 40 cm, podczas gdy po 17:00 UTC przekroczyły nawet ± 60 cm. Analizy wykazały, że mapy UWM-rc1 charakteryzuje dobre dopasowanie do prawdziwych wartości opóźnienia jonosferycznego podczas gdy globalne mapy IGS i UQRG oraz regionalne mapy COE wykazują większe odchylenia. Stan ten można poniekąd

Anna Krypiak-Gregorczyk

wytlumaczyć mniejszą rozdzielczością przestrzenną jak również czasową analizowanych globalnych i regionalnych map.



Rysunek 6 Przykład map vTEC otrzymanych z modelu UWM-rc1 dla dnia spokojnego (16 marzec 2015 r.-lewy panel) oraz zaburzonego (17 marzec 2015 r.-prawy panel) na godzinę 17.00 UTC. Źródło: [B.3]



Rysunek 7 Odchyłki poprawek jonosferycznych (DD ionospheric residuals) wyznaczonych z modelu UWM-rc1 (a), IGS (b), UORG (c), COE (d) w dniu zaburzonej (DoY 76/2015) dla wektora SOCH-CCHN. Źródło: [B.3]

Anna Krypiak-Gregorczyk

Statystyki rezydów podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego dla dwóch testowych wektorów w analizowanym okresie przedstawia tabela 1 w pracy [B.3]. Wyniki prezentują procent odchyłek poprawek jonosferycznych mieszczących się w wybranych przedziałach dokładności $\pm 2,5$ cm, ± 5 cm, $\pm 7,5$ cm, ± 10 cm i ± 20 cm. Szczególnie istotny jest przedział $\pm 7,5$ cm, gdyż dokładność poprawki mieszcząca się w tym przedziale (poniżej połowy długości cyklu sygnału L1) daje możliwość szybkiego rozwiązania nieoznaczoności w kinematycznym pozycjonowaniu GNSS (Khodabandeh i Teunissen 2015; Paziewski 2016). Uzyskane wyniki pokazują, że podczas trzech dni przed burzą, nowy regionalny model UWM-rc1 zapewnia poprawki opóźnienia jonosferycznego z dokładnością większą niż $\pm 7,5$ cm w 82-87% przypadkach, dla obu wektorów. Poprawki pochodzące z map IGS, UQRG oraz COE wykazały zaś mniejszą dokładność, na poziomie 68-78% w omawianym zakresie. Mapy UWM-rc1 dostarczają średnio 10% więcej poprawek o dokładności pozwalającej na szybkie wyznaczenie nieoznaczoności. Podczas burzy Św. Patryka wyraźny jest spadek dokładności wyznaczonych poprawek. W przypadku map UWM-rc1 79% (SOCH-CCHN) i 74% (SOCH-MIMA) odchyłek podwójnie zróżnicowanego opóźnienia jonosferycznego mieści się w granicach $\pm 7,5$ cm. Testowane mapy charakteryzuje znaczny spadek dokładności zwłaszcza dla zlokalizowanego północ-południe wektora SOCH-CCHN. Mianowicie, jedynie 50-58% poprawek pozwala na szybkie wyznaczenie nieoznaczoności. W przypadku wektora SOCH-MIMA zacierza się wyraźna różnica między dokładnością poprawek pochodzących z map UWM-rc1 i map IGS, UQRG oraz COE. Ta, bezsprzeczna przewaga prezentowanego modelu dla wektora SOCH-CCHN jest związana z występowaniem w kierunku północ-południe dużych gradientów TEC w jonosferze podczas omawianej burzy, które zostały znacznie lepiej odzwierciedlone przez zaproponowany model. Tym samym wskazuje na wyraźnie lepsze reprezentowanie stanu jonosfery przez model UWM-rc1, podczas jej zaburzeń. Wyniki przedstawione dla fazy regeneracji również potwierdzają przewagę regionalnego modelu.

Wobec wyraźnej zarysowanej przewagi modelu UWM-rc1 w stosunku do map IGS, UQRG i COE, w kolejnym kroku sprawdzono jego rzeczywistą wydajność w zakresie wyznaczania nieoznaczoności. W tym celu przeprowadzone zostały testy pozycjonowania RTK-OTF w trybie postprocessingu. Wektory testowe zostały rozwiązane z zastosowaniem podwójnie zróżnicowanych poprawek jonosferycznych uzyskanych z modeli UWM-rc1, IGS i UQRG. Ponadto wyznaczone zostało rozwiązanie bez zastosowania poprawek jonosferycznych. Podczas testów inicjalizacja była wznawiana co 15 minut, a do rozwiązania nieoznaczoności wykorzystywano maksymalnie 60 minut obserwacji. Analizom poddano czas niezbędny do wyznaczenia nieoznaczoności (*time to fix -TTF*) liczony w epokach oraz współczynnik sukcesu rozwiązania nieoznaczoności (*ambiguity resolution success ratio - ARSR*), zdefiniowany jako stosunek sesji (okien czasowych) z poprawnie rozwiązanymi nieznacznymi do liczby wszystkich przetworzonych sesji. Dla każdego wektora przetworzono 48 sesji. Analizy przeprowadzono dla dwóch reprezentatywnych dni, reprezentującego spokojną jonosferę (73/2015) oraz dnia zaburzonego (76/2015). Uzyskane wyniki przedstawia tabela 8.

Tabela 8 Średnie współczynniki sukcesu rozwiązania nieoznaczoności (ARSR) oraz czasu niezbędnego do wyznaczenia nieoznaczoności (TTF) dla testowych wektorów oraz różnych modeli jonosfery. Źródło: [B.3]

Iono. corr. model	DoY 73/2015 – quiet ionosphere		DoY 76/2015 – disturbed ionosphere	
	ARSR %	TTF (epochs)	ARSR %	TTF (epochs)
NO_IONO	68,08	43,31	40,43	29,37
IGS	100,00	20,41	72,34	32,56
UQRG	100,00	28,76	80,85	37,62
UWM-rc1	100,00	9,26	82,98	17,95

Anna Krypiak-Gregorczyk

Mimo, iż w dniu spokojnym wszystkie analizowane mapy jonosfery pozwoliły rozwiązać nieoznaczoności dla testowych wektorów we wszystkich przetwarzanych sesjach, znaczące różnice można zaobserwować w czasie potrzebnym do wyznaczenia nieoznaczoności pomiaru fazowego w trybie RTK-OTF. Model UWM-rc1 potrzebował zaledwie 9 epok, natomiast w przypadku IGS oraz UQRG było to ponad 20 epok. W dniu zaburzonym, jak zostało to przedstawione w tabeli 8, dokładność poprawek uległa zmniejszeniu, co znalazło odzwierciedlenie w pogorszeniu wydajności pozycjonowania. Najlepsze wyniki uzyskane zostały dla modelu UWM-rc1, ale ich przewaga nad modelem UQRG jest zaledwie 2%. Jednakże należy podkreślić, iż czas niezbędny do wyznaczenia nieoznaczoności jest dla modelu UWM-rc1 praktycznie dwa razy krótszy niż w przypadku map IGS i UQRG. Uzyskane wyniki wyraźnie potwierdzają przewagę wydajności modelu UWM-rc1 w pozycjonowaniu satelitarnym, a zatem również jego wysoką dokładność.

Osiągnięcie naukowe habilitantki powstałe w wyniku prac nad regionalnym modelem jonosfery z opracowania niezróżnicowanych obserwacji fazowych systemu GPS oraz zastosowania interpolacji metodą kolokacji najmniejszych kwadratów, przedstawione w publikacji [B.3]:

- opracowanie regionalnego modelu jonosfery bazującego wyłącznie na absolutnych pomiarach fazowych systemu GPS oraz zastosowaniu interpolacji metodą LSC;
- wyraźna przewaga opracowanego regionalnego modelu UWM-rc1 z wykorzystania wyłącznie obserwacji fazowych oraz metody LSC, w szybkości wyznaczenia nieoznaczoności w okresie spokojnej jonosfery;
- najwyższy współczynnik sukcesu wyznaczenia nieoznaczoności w dniu zaburzonym w stosunku do modeli referencyjnych;
- wyższa dokładność regionalnego modelu jonosfery UWM-rc1 w stosunku do konkurencyjnych rozwiązań w odzwierciedlaniu stanów zaburzonych w jonosferze.

4.4.3.2. ANALIZA WEWNĘTRZNEJ SPÓJNOŚCI REGIONALNEGO MODELU JONOSFERY Z OPACOWANIA ABSOLUTNYCH OBSERWACJI FAZOWYCH SYSTEMÓW GNSS

Wyniki uzyskane w pracy [B.3] wykazały trafność wybranej metody interpolacji. Jednakże metoda LSC wymaga dużych mocy obliczeniowych, ponieważ wymaga obliczenia empirycznej funkcji kowariancji. Z tego też względu habilitantka podjęła próbę znalezienia metody, która dałaby równie satysfakcjonujące wyniki i stwarzałaby możliwość operacyjnego jej zastosowania. W publikacji [B.4] przedstawione zostało modelowanie jonosfery z opracowania wyłącznie absolutnych pomiarów fazowych systemów GPS i GLONASS oraz zastosowania interpolacji funkcjami sklejanymi typu *thin plate splines* - TPS w celu wyznaczenia dokładnych pionowych wartości TEC w regularnej siatce GRID. Do wstępnego przetworzenia danych wykorzystane zostały dane 30-sekundowe z kątem odcięcia horyzontu 30° w celu zminimalizowania błędów wynikających z niedoskonałości zastosowanej funkcji mapującej SLM. Ostateczne mapy pionowego TEC zostały wygenerowane z interwałem 1 minutowym. Jakość zaprezentowanego modelu jonosfery (UWM-rt1) została sprawdzona poprzez porównanie do powszechnie dostępnych produktów jonosferycznych. W tym celu, jako modele referencyjne, wybranych zostało 5 popularnych modeli jonosfery opracowywanych przez: *International GNSS Service* (IGS), *Center for Orbit determination in Europe* (CODE), *European Space Agency* (ESA), *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) oraz *Technical University of Catalonia* (UPC). Mapy te zostały wybrane nie tyle ze względu na ich dostępność, co z uwagi na rodzaj zastosowanej metody interpolacji. Globalne mapy jonosfery dostarczane przez IGS (IGSG) charakteryzują się, jak zostało już podkreślone w sekcji 4.3.2,

Anna Krypiak-Gregorczyk

niską dokładnością. Produkt ten oferuje jedynie 2.5° na 5° rozdzielczość przestrzenną oraz 2 godzinną rozdzielczość czasową (w analizowanym okresie). Globalne mapy CODE (CODG) opracowane są na podstawie podwójnie zróżnicowanych obserwacji fazowych oraz parametryzacji TEC za pomocą rozwinięcia w szereg funkcji sferycznych przy wykorzystaniu oprogramowania Bernese (Schaer 1999). ESA GIM powstaje z opracowania obserwacji pseudoodległości i parametryzacji TEC przy użyciu funkcji sferycznych SHE (Feltens 2007). Natomiast globalne mapy JPL (JPLG) powstają z trójwarstwowego modelu opartego na funkcjach sklepanych (Mannucci i in. 1998). Zarówno CODG, ESAG jak i JPLG oferują rozdzielczość analogiczną do map IGS. Model UQRG dostarczany przez UPC, uznawany za najdokładniejszy według Hernández-Pajares i in. (2017), powstaje jako kombinacja tomograficznego modelu jonosfery oraz interpolacji metodą krigingu przy wykorzystaniu opracowywanego na UPC oprogramowania TOMION. Rozdzielczość przestrzenna UQRG jest identyczna jak w przypadku pozostałych map, natomiast czasowa wynosi 15 minut (Hernández-Pajares i in. 1999; Orus i in. 2005).

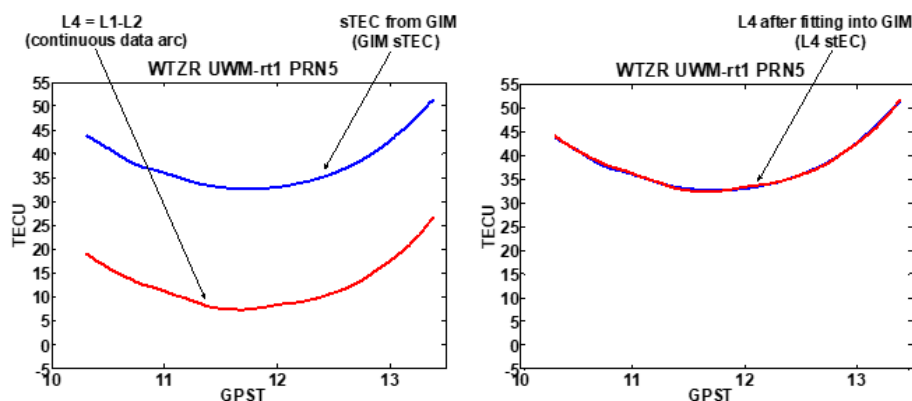
Opracowany model jonosfery UWM-rt1 oraz modele referencyjne zostały poddane analizom wewnętrznej spójności modelu TEC. W tym celu **została opracowana nowa, autorska metoda analiz dokładności modeli jonosfery, tzw. self-consistency analysis**. Badania zostały przeprowadzone dla 12 wybranych stacji testowych zlokalizowanych w Środkowej i Zachodniej Europie, których dane obserwacyjne nie zostały wykorzystane w procesie modelowania jonosfery. Analizom poddany został ten sam okres, zawierający burzę Św. Patryka w dniu 17 marca 2015 r., dla którego przeprowadzona została weryfikacja modelu UWM-rc1 [B.3], co wynika z faktu, że było to najsilniejsze zaburzenie jonosfery w ostatnich latach. Porównywane modele jonosfery posłużyły do kalibracji skośnych wartości TEC dla każdego ciągłego łuku obserwacji pomiarów fazowych zebranych na stacjach testowych. W tym celu zastosowana została liniowa kombinacja L_{GF} , precyzyjnie odzwierciedlająca zmiany opóźnienia jonosferycznego, a w konsekwencji zmiany sTEC w czasie i przestrzeni. Liniowa kombinacja L_{GF} dotychczas w literaturze często opisywana jest jako kombinacja L4, stąd takie jej nazewnictwo występuje w pracy [B.4]. Jednakże dla przejrzystości i spójności autoreferatu habilitantka stosuje bardziej odpowiednią dla obecnych czasów „multi-GNSS”, terminologię L_{GF} .

Autorska metoda analiz wewnętrznej spójności modelu TEC przeprowadzana jest zgodnie z następującym schematem [B.4] (Rysunek 8):

- obliczenie kombinacji L_{GF} dla kombinacji liniowych dla każdego ciągłego łuku obserwacji fazowych;
- określenie wartości sTEC dla tych samych, ciągłych łuków obserwacyjnych z analizowanych map jonosfery;
- wpasowywanie (fitting) obserwacji L_{GF} do map sTEC (L_{GF_sTEC});
- analiza statystyczna rezyduów po wpasowaniu.

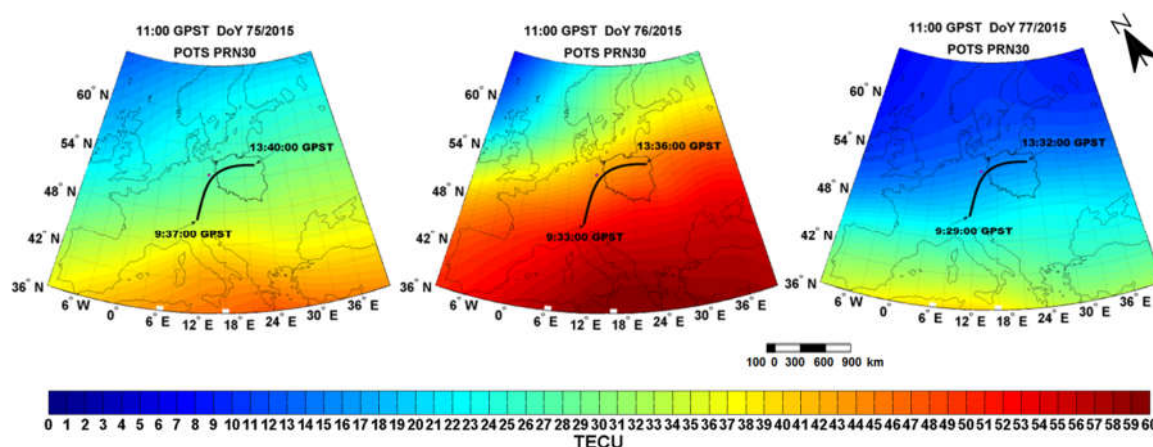
Należy podkreślić, że L_{GF} opiera się na rzeczywistych obserwacjach GNSS, a zatem stanowi doskonałe odniesienie do walidacji map jonosfery, ponieważ bardzo dokładnie odzwierciedla zmiany TEC w jonosferze. Jednakże absolutny poziom TEC jest nieokreślony. Wobec tego bezwzględny poziom L_{GF_sTEC} jest dyktowany przez poziom TEC przedstawiony w używanej do kalibracji mapie jonosfery. Przykładowe mapy TEC z modelu UWM-rt1 w dzień spokojny (75/2015), zaburzony (76/2015) oraz jeden dzień po burzy (77/2015) wraz z zaznaczonym śladem przelotu satelity PRN30 obserwowanym przez stację POTS przedstawia rysunek 9.

Anna Krypiak-Gregorczyk



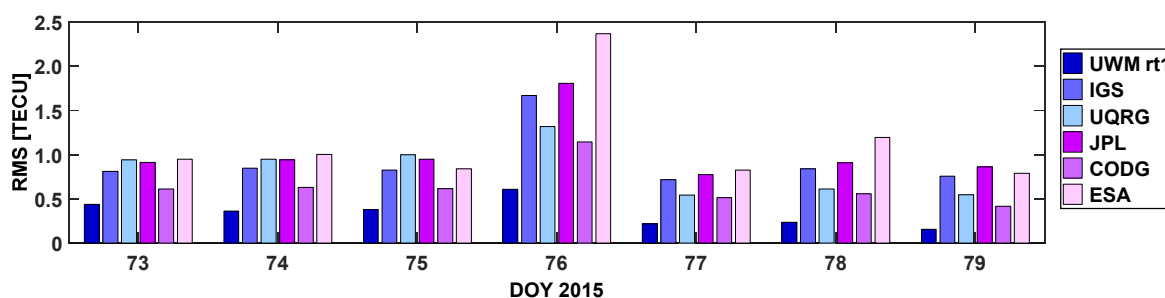
Rysunek 8 Referencyjny STEC: Wpasowanie obserwacji fazowych

Źródło: [B.4]



Rysunek 9 Przykład map vTEC uzyskanych z modelu UWM-rt1 w dniu spokojnym (lewy panel), zaburzonym (środkowy panel), spokojnym po burzy (prawy panel) o godzinie 11:00 UTC wraz z zaznaczonym przelotem satelity GPS PRN30 obserwowanym przez stację POTS.

Źródło: [B.4]



Rysunek 10 Dzienny RMS wyznaczony dla wszystkich analizowanych map TEC [TECU]

Źródło: [B.4]

Analiza statystyczna rezydów po wpasowaniu wykazała, że ich wartości RMS dla poszczególnych modeli były podobne w ciągu trzech spokojnych dni przed burzą geomagnetyczną i nie przekroczyły 1 TECU, a w przypadku modelu UWM-rt1 wielkości te kształtowały się na poziomie 0.4 TECU (rysunek 10). Dzień zaburzony stanowił wyzwanie w modelowaniu jonosfery dla wszystkich analizowanych map TEC. Jednakże, wartości RMS dla modelu UWM-rt1 nie przekroczyły 1 TECU, osiągając 0.6 TECU podczas gdy RMS dla map ESAG przekroczył poziom 2 TECU. Zwiększony RMS spowodowany był większą

Anna Krypiak-Gregorczyk

czasową oraz przestrzenną zmiennością jonosfery podczas burzy geomagnetycznej, która nie jest właściwie odzwierciedlona przez powszechnie dostępne, globalne mapy TEC. W dniu po burzy (77/2015), rozpoczęła się faza regeneracji, charakteryzująca się niskimi wartościami TEC, co znalazło odzwierciedlenie w niższych RMS. W przypadku map UWM-rt1 średni błąd kwadratowy rezyduów po wpasowaniu wyniósł zaledwie ok. 0,2 TECU i utrzymał się na takim poziomie również przez dwa kolejne dni. Mapy referencyjne osiągnęły w tych dniach wyższy poziom RMS, który w dniu bezpośrednio po burzy wyniósł nieco powyżej 0,5 TECU dla map UQRG i CODG, zaś w przypadku JPLG, IGSG i ESAG był na poziomie 0,71-0,82 TECU. W kolejnym dniu nastąpiło zwiększenie wartości RMS, który dla map ESAG przekroczył 1 TECU.

Tabela 9 RMS dla wszystkich dni, łuków obserwacji fazowych śledzonych przez wszystkie stacje testowe [TECU].

Źródło: [B.4]

UWM-rt1	IGS	UQRG	JPL	CODG	ESA
0.34	0.92	0.84	1.02	0.64	1.14

W tabeli 9 przedstawione zostały wartości RMS po wpasowaniu dla wszystkich dni oraz łuków obserwacyjnych śledzonych przez wszystkie testowe stacje. RMS dla map UWM-rt1 wyniósł jedynie 0.34 TECU i był aż trzy razy mniejszy niż w przypadku map IGSG i JPLG i prawie cztery razy mniejszy niż w przypadku map ESAG. Wśród map referencyjnych całkowity RMS osiągnął najniższe wartości dla map CODG (0.64 TECU) oraz map UQRG (0.84 TECU).

Przedstawione analizy wykazały, że zaproponowana nowa metodologia modelowania jonosfery przy użyciu absolutnych pomiarów fazowych i przy zastosowaniu interpolacji funkcjami sklejanymi, pozwala osiągnąć znacznie wyższe dokładności w stosunku do powszechnie dostępnych map jonosfery. Regionalny model UWM-rt1 charakteryzuje się 2-3 krotnie niższym RMS w porównaniu do map referencyjnych. Ponadto w dniu zaburzonym RMS dla wszystkich testowanych map zwiększył się dwukrotnie, jednakże jedynie RMS dla UWM-rt1 nie przekroczył 1 TECU.

Wobec uzyskanych rezultatów można stwierdzić, że założony przez habilitantkę cel naukowy prowadzonych badań został osiągnięty. A mianowicie osiągnięte wyniki potwierdziły stosowność podejścia opartego na zastosowaniu w regionalnym modelowaniu jonosfery absolutnych pomiarów fazowych [B.2, B.3, B.4] oraz interpolacji funkcjami sklejanymi precyzyjnie wyznaczonych wartości TEC w regularnej siatce GRID [B.4].

Osiągnięcie naukowe habilitantki powstałe w wyniku prac nad regionalnym modelem jonosfery z opracowania niezróżnicowanych obserwacji fazowych systemów GNSS oraz zastosowania interpolacji TPS, przedstawione w publikacji [B.4]:

- opracowanie regionalnego modelu jonosfery bazującego wyłącznie na absolutnych pomiarach fazowych systemów **GPS i GLONASS** oraz interpolacji metodą TPS;
- opracowanie autorskiej metody analiz dokładności modeli jonosfery, tzw. **self-consistency analysis**;
- wysoka dokładność zaproponowanego modelu jonosfery w stosunku do powszechnie dostępnych map.

Anna Krypiak-Gregorczyk

4.4.4. BADANIE STANU JONOSFERY PODCZAS NAJWIĘKSZYCH ZABURZEŃ, NA PODSTAWIE MODELU JONOSFERY Z OPRACOWANIA ABSOLUTNYCH POMIARÓW FAZOWYCH GNSS

Prowadzone przez habilitantkę badania wykazały, iż do dokładnego modelowania jonosfery należy wykorzystywać obserwacje fazowe systemów GNSS, oraz że najodpowiedniejszymi metodami interpolacji jonosfery, pozwalającymi na generowanie wysokorozdzielczych map o najwyższej dokładności są metoda *kolokacji najmniejszych kwadratów* (LSC) [B.3] i funkcje sklepane typu *thin plate splines* (TPS) [B.4]. Wysoka dokładność opracowywanych przez habilitantkę regionalnych map jonosfery, co zostało wykazane w pracach [B.2, B3, B4], stworzyła możliwość zbadania zachowania jonosfery w odpowiedzi na największe zaburzenia 24 cyklu aktywności słonecznej. Taki kierunek badań jest również niezwykle istotny z uwagi na dużą dynamikę zmian tej warstwy atmosfery mającą istotny wpływ na pogodę kosmiczną, a dostarczenie środowisku naukowemu precyzyjnego modelu jonosfery, dobrze odzwierciedlającego jej zmiany może przyczynić się do lepszego jej zbadania, zwłaszcza w czasie zaburzeń. W pracy [Verkhoglyadova i inni \(2016\)](#) wykazano, że badanie chwilowych zmian jonosfery w skali globalnej wymaga co najmniej 1 h rozdzielczości czasowej opracowywanych modeli. Zatem analiza zmian w skali regionalnej wymaga jeszcze wyższej rozdzielczości czasowej i przestrzennej map jonosfery.

W pracy [B.5] habilitantka dokonała analizy odpowiedzi jonosfery na trzy wybrane burze geomagnetyczne, mające miejsce w okolicach równonocy wiosennej w latach 2012, 2013, 2015. Wszystkie trzy burze powstały w efekcie koronalnych wyrzutów masy. Ponadto burze z 2013 i 2015 roku miały miejsce w tym samym dniu, 17 marca, stąd zwane są burzami Św. Patryka. Badania zostały przeprowadzone w oparciu o nowy regionalny model jonosfery z wykorzystania dwuczęstotliwościowych, niezróżnicowanych obserwacji fazowych systemów GPS i GLONASS. Precyzyjne wyznaczenie wartości pionowego TEC w punktach przebicia jonosfery zostało oparte na opracowaniu 30 sekundowych obserwacji z ponad 200 stacji sieci EPN. Zastosowanie 30° kąta odcięcia horyzontu pozwoliło zminimalizować błędy funkcji mapującej SLM. Do opracowania regularnej siatki grid z wartościami pionowego TEC zastosowana została interpolacja funkcjami sklejanymi [B.4]. Ostateczne 2-minutowe mapy jonosfery UWM-TEC obejmują region Europy (od -10°W do 38°E oraz od 36°N do 64°N) z rozdzielczością przestrzenną 0.2° w obu kierunkach. Jak zostało to wykazane w pracy [B.4] dokładność tak opracowanych map jest lepsza niż 1 TECU.

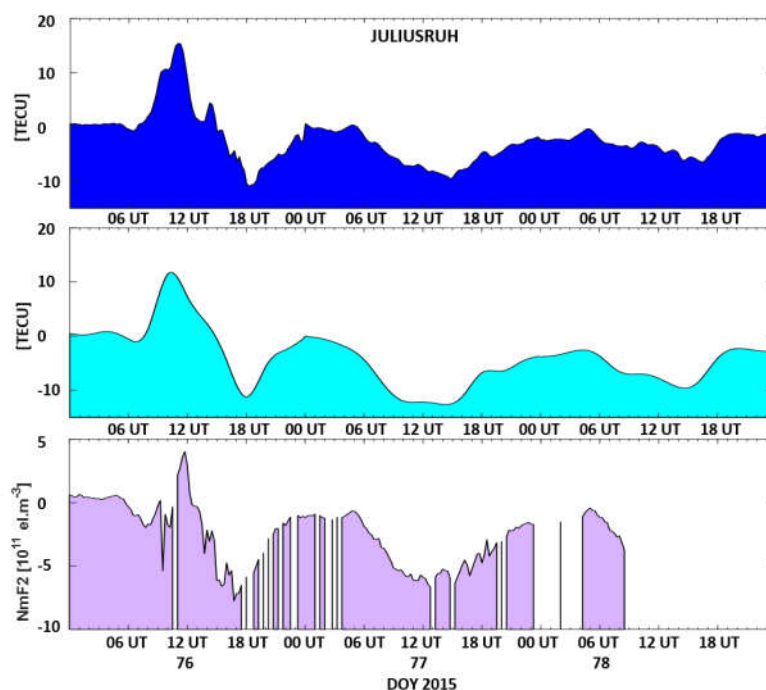
Analiza odpowiedzi jonosfery na trzy największe zaburzenia została przeprowadzona, dla każdego z nich, poprzez porównanie nowego regionalnego modelu jonosfery z powszechnie stosowanymi mapami IGS. Porównania te wykonano w odniesieniu do obserwacji szczytowej gęstości elektronów NmF2 uzyskanych z europejskiej sieci jonosond. W tym celu wykorzystane zostały dane krytycznej częstotliwości (f_oF2), jako najbardziej podstawowego ze wszystkich parametrów charakteryzujących stan i zmiany jonosfery. W omawianych badaniach wykorzystano 15 minutowe dane f_oF2 z dwóch europejskich jonosond Juliusruh i Rome, których wybór podyktowany był dostępnością danych w badanych okresach oraz ich lokalizacją o zbliżonej długości geograficznej.

W pierwszym kroku porównano mapy jonosfery z nowego regionalnego modelu oraz IGSG w okresach zaburzonych w stosunku do wybranych okresów spokojnych. W celu jednoznacznego zobrazowania różnicy między omawianymi modelami w odpowiedzi jonosfery na rozpatrywane zaburzenia, analizom czasowym poddano opracowane profile UWM-TEC i IGS-TEC. Zostały one zestawione z profilami różnic maksymalnej gęstości elektronów warstwy F2 mierzonej przez wybrane jonosondy. Dla każdej z analizowanych burz wyraźnie widoczna była bardzo dobra kompatybilność zmian TEC i NmF2. Zarówno pozytywne jak i negatywne zakłócenia obserwowane przez mapy UWM-TEC oraz IGS-TEC

Anna Krypiak-Gregorczyk

wykazywały dużą zgodność z różnicami NmF2. Jednakże pomimo ogólnej zgodności prezentowanych profili z map UWM i IGS-TEC, nowy regionalny model jonosfery prezentuje wyższy poziom szczegółowości, idealnie wpisując się w charakter zmian obserwowanych przez jonosondy. IGS-TEC odzwierciedla jedynie ogólny charakter zmian, podczas gdy model UWM-TEC o wysokiej rozdzielczości charakteryzuje się lepszą reprezentacją dynamiki zmian w jonosferze.

Rysunek 11 przedstawia przykładowe profile różnic UWM-TEC (górny panel), IGS-TEC (środkowy panel) oraz NmF2 (dolny panel) dla lokalizacji jonosondy Juliusruh podczas zaburzonego okresu 17-19 Marca 2015 roku w stosunku do dni spokojnych. Należy zauważyć, że odchylenia NmF2 obserwowane przez jonosondę Juliusruh, w dużym stopniu odzwierciedla ten sam charakter zmian jonosfery, który można zaobserwować z UWM-TEC. Około godz. 10:00 UT widoczny jest, zarówno na profilach z UWM-TEC jak i z danych z jonosondy, chwilowy spadek zawartości elektronów. Dodatnia faza burzy obserwowana jest we wszystkich profilach, jednakże jej szczyt widoczny jest w przypadku UWM-TEC i jonosondy około godziny 11:00 UT, podczas gdy na mapach IGS-TEC widziany jest godzinę wcześniej. Drugi zaś pik (około godziny 14:00 UT) widziany przez wysokorozdzielczy model oraz jonosondę nie znajduje odzwierciedlenia w mapach IGS-TEC. Ponadto, profil IGS-TEC przedstawia płynne obniżenie wartości TEC, tym samym nie odzwierciedla dynamicznej natury zmian jonosfery prezentowanej na profilach z jonosond i map UWM-TEC. Na przykład, występujący w dniu po burzy niewielkie maksimum lokalne o godzinie 6:00 UT jest całkowicie pominięte w danych IGS. W tym dniu, od około 8:00 UT do 15:00 UT, ujemna faza burzy jest wyraźnie widoczna na wszystkich profilach. Profile z jonosondy Juliusruh oraz map UWM-TEC wykrywają niewielkie zmiany nachylenia, które nie występują w IGS-TEC. Niemniej jednak wszystkie profile prezentują podobną odpowiedź jonosfery po godzinie 15:00 UT.



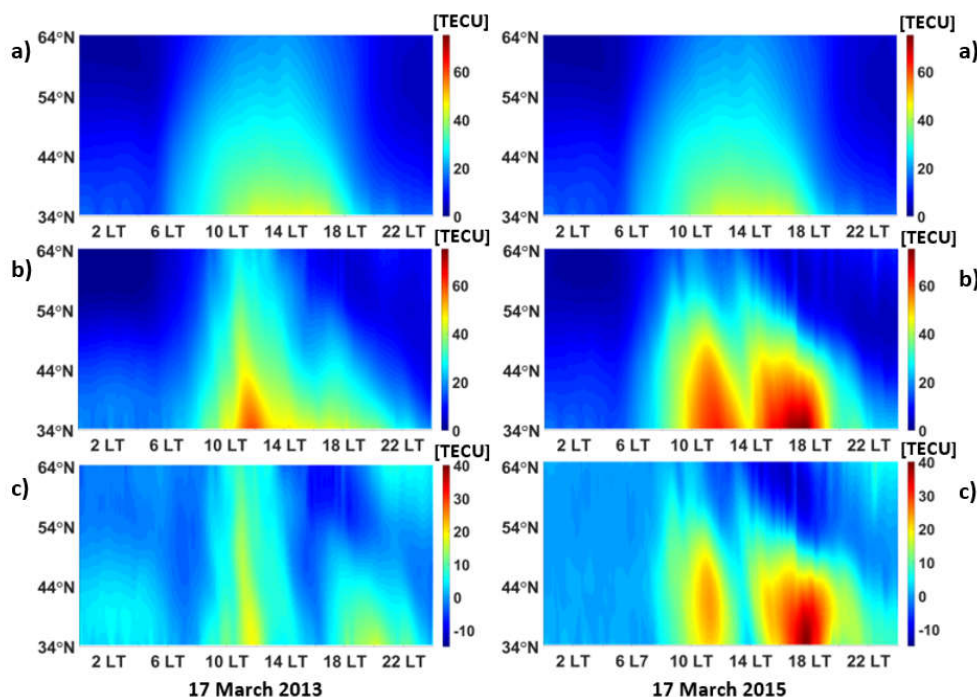
Rysunek 11 Profile różnic UWM-TEC (a), IGS-TEC (b) oraz NmF2 (c) dla lokalizacji jonosondy Juliusruh podczas zaburzonego okresu (17-19 Marzec 2015/ DOYs 76-78) w stosunku do dni spokojnych.

Źródło: [B.5]

Analizy przeprowadzone przez habilitantkę miały na celu ocenić możliwości wykorzystania nowego regionalnego modelu jonosfery do odtwarzania złożonych zachowań tej warstwy atmosfery.

Anna Krypiak-Gregorczyk

Satysfakcjonująca zgodność obserwowanych na mapach UWM-TEC zmian stanu jonosfery na szerokościach geograficznych odpowiadających lokalizacjom wybranych jonosond dała podstawę przeprowadzenia bardziej dogłębnych badań tych zmian. W tym celu dyskusji poddane zostały nowe regionalne mapy jonosfery (UWM-TEC) opracowane dla poszczególnych dni burzowych, w zestawieniu z mapami jonosfery dla okresu spokojnego. Natomiast dla podkreślenia charakteru zmian stworzone zostały również różnice dnia zaburzonego w stosunku do średniej z dni spokojnych.



Rysunek 12 Zmiany stanu jonosfery obserwowane przez model UWM-TEC: (a) spokojna jonosfera, (b) zaburzony dzień (17 marzec), (c) zmiany stanu jonosfery w dniu zaburzonym w stosunku do okresu spokojnego dla 2013 (lewy panel) i 2015 roku (prawy panel). Źródło: [B.5]

Rysunek 12 przedstawia zależność map UWM-TEC od czasu i szerokości geograficznej dla dwóch burz mających miejsce w dniu Św. Patryka w 2013 i 2015 roku. W przypadku burzy z 2013 roku, podczas tzw. zjawiska *sheath passage* nastąpił wzrost TEC na średnich szerokościach geograficznych. Jego maksimum miało miejsce o 11:00 LT (local time) dla szerokości 60° N i tuż przed południem na szerokościach 34° N. Model UWM-TEC zaobserwował drugi szczyt, który miał miejsce podczas przejścia chmury magnetycznej (MC). Widoczny był on na szerokościach poniżej 50° N około godziny 18:00 LT, a jego maksymalne wartości osiągnęły 45 TECU, a zatem około 15 TECU mniej niż podczas pierwszego szczytu. Przedstawiona mapa różnicowa w dolnym panelu potwierdza te zdarzenia. Ponadto można zauważyć, że wzrost wartości TEC w stosunku do dni spokojnych podczas pierwszego szczytu wynosił 22 TECU, a podczas drugiego szczytu 13 TECU.

Przedstawiona na rysunku 11 burza Św. Patryka z 2015 roku miała odmienny charakter od tej z 2013 roku. Mapy jonosfery w dniu 17 marca wykazują wyraźny wzrost TEC od 8:00 LT. Od 10:00 LT wartości TEC oscylują na poziomie 60 TECU. Taki wzrost TEC odpowiada *sheath passage*, jak również zauważyła Verkhoglyadova i in. (2016). Około godziny 11:00 LT zauważalny jest pierwszy pik TEC, później następuje stopniowy spadek wartości TEC. Po 14:00 LT TEC spada na wszystkich szerokościach geograficznych, a następnie osiąga maksimum o 17:00 LT. Nagły spadek TEC jest widoczny podczas przejścia MC, a wieczorem pojawiła się wyraźna ujemna faza burzy. Mapa różnicowa przedstawiona w dolnym panelu (rysunek 12b) pozwala wyraźnie wskazać dodatnią fazę burzy, z wyraźnym wskazaniem dwóch szczytów tego pozytywnego efektu. Należy podkreślić, że wzrost TEC podczas

Anna Krypiak-Gregorczyk

drugiego szczytu był dwukrotnie większy w stosunku do pierwszego, a ponadto ten szczyt odpowiada zwiększonej aktywności geomagnetycznej obserwowanej w indeksie AE.

Przeprowadzone przez habilitantkę analizy dynamiki jonosfery podczas silnych burz geomagnetycznych bardzo dobrze oddały charakter zmian zachodzących w jonosferze. W przypadku burz Św. Patryka zaobserwowany został całkowicie odmienny charakter odpowiedzi jonosfery na te zdarzenia, mimo iż burze te wystąpiły w tym samym dniu roku, a wywołane zostały na skutek koronalnych wyrzutów masy, które dotarły do Ziemi o tej samej porze dnia.

Należy podkreślić, jak podaje Astafyeva et al. (2015), że powszechnie dostępne mapy jonosfery z rozdzielczością czasową wynoszącą 1-2 godziny i małą rozdzielczością przestrzenną mogą nie wystarczyć do szczegółowej analizy chwilowych efektów burzy. W celu uzyskania dokładniejszych informacji o czasowych zmianach TEC w czasie sztormu należy użyć dokładniejszych map jonosfery. Przedstawione wyniki pokazały, że regionalny model jonosfery UWM-TEC oparty na obserwacjach fazowych dostarcza użytecznych informacji na temat reakcji jonosfery na zakłócenia geomagnetyczne. W związku z tym zastosowanie tego nowego modelu o wysokiej rozdzielczości może zapewnić pełniejszą informację na temat reakcji jonosfery na zakłócenia magnetyczne niż obecnie dostępne mapy TEC.

Osiągnięcie naukowe habilitantki powstałe w wyniku prac na analizą dynamiki jonosfery podczas burz geomagnetycznych w marcu 2012, 2013 i 2015 roku, na podstawie nowego regionalnego modelu jonosfery UWM-TEC z opracowania niezróżnicowanych obserwacji fazowych systemów GNSS oraz zastosowania interpolacji TPS, przedstawione w publikacji [B.5]:

- kompleksowe zbadanie reakcji jonosfery na 3 z największych zaburzeń 24 cyklu aktywności słonecznej;
- opracowanie regionalnych map jonosfery szczegółowo odzwierciedlających zachowanie tej warstwy atmosfery podczas największych zaburzeń geomagnetycznych.

4.4.5. ZNACZENIE PROWADZONYCH BADAŃ I OSIĄGNIĘTYCH REZULTATÓW

Przeprowadzone przez habilitantkę badania nad wyznaczaniem TEC z absolutnych pomiarów fazowych obserwacji GNSS potwierdziły postawioną na wstępie hipotezę: ***zastosowanie precyzyjnych obserwacji fazowych GNSS pozwala znacząco poprawić dokładność modelu jonosfery w porównaniu do powszechnie stosowanych metod opartych wyłącznie na wygładzanych obserwacjach kodowych, pochodzących najczęściej z systemu GPS.***

W trakcie prowadzonych przez habilitantkę badań nad opracowaniem nowego regionalnego modelu jonosfery w oparciu o wysoce dokładne niezróżnicowane dwuczęstotliwościowe obserwacje fazowe systemów GNSS opracowane zostały nowe metody estymacji TEC z precyzyjnych pomiarów fazowych GNSS (GPS, GLONASS), w szczególności metoda estymacji *carrier phase bias*, a następnie metody regionalnego modelowania jonosfery z zastosowaniem zaawansowanych metod interpolacji. Ostatecznie habilitantka opracowała wysokodokładny, regionalny model jonosfery dla obszaru Europy, o dokładności i rozdzielczości lepszej od powszechnie używanych modeli opartych wyłącznie na wygładzanych obserwacjach kodowych, pochodzących najczęściej tylko z systemu GPS. Model ten zweryfikowano w precyzyjnym pozycjonowaniu oraz zastosowano do analiz jonosfery podczas najsilniejszych burz geomagnetycznych z obecnego 24 cyklu aktywności słonecznej.

Anna Krypiak-Gregorczyk

Opracowany przez habilitantkę regionalny model jonosfery niewątpliwie może przyczynić się dalszego rozwoju badań tej warstwy atmosfery ziemskiej na średnich i wysokich szerokościach geograficznych, przyczyniając się do lepszego poznania fizyki jonosfery, genezy i klimatologii jej zaburzeń, powiązania jej stanu ze stanem magnetosfery [B.5]. Wychodząc naprzeciw tym potrzebom habilitantka stworzyła regionalny serwis stanu jonosfery, który z kilkogodzinnym opóźnieniem prezentuje stan tej warstwy atmosfery nad Europą (<http://ginpos.uwm.edu.pl/iono/>). Niewątpliwie dostarczenie naukowcom dobrego modelu jonosfery umożliwi rozszerzenie badań nad pogodą kosmiczną, której efekty mają coraz większy wpływ na infrastrukturę techniczną w kosmosie, w powietrzu i na Ziemi (Moldwin, 2008). Należy podkreślić także decydujący wpływ jonosfery na możliwość wyznaczania nieoznaczoności pomiarów fazowych. Tym samym nowy dokładny model stanu jonosfery daje możliwość poprawy jakości precyzyjnego pozycjonowania [B.1, B.3], niosąc za sobą wkład w rozwój geodezji (np. konserwacja systemów odniesienia, pomiary RTK w geodezji inżynierskiej) i nawigacji satelitarnej, czy też badań geodynamicznych i geofizycznych. Zgodnie z wynikami badań zaprezentowanymi w pracy [B.2] model regionalny charakteryzuje dokładność lepszą niż 1 TECU.

Efekty prowadzonych przez habilitantkę badań, zebrane w monotematycznym cyklu publikacji, są wynikiem doświadczeń nabytych w trakcie współpracy z zagranicznymi ośrodkami naukowymi w ramach prac grupy roboczej *Real-time Ionosphere Monitoring* (International Association of Geodesy IAG), jak również zdobywanych podczas realizacji projektów badawczych finansowanych przez Narodowe Centrum Nauki (NCN) oraz Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). W nowym modelu jonosfery wykorzystane zostało m.in. doświadczenie uzyskane w trakcie prowadzenia badań nad średnioskalowymi przemieszczającymi się zaburzeniami jonosferycznymi (MS-TID – *Medium Scale Traveling Ionospheric Disturbances*) i ich wpływie na pozycjonowanie satelitarne prowadzonymi na zlecenie ESA (PIOM-FIPP). Ponadto w ramach prac habilitantki nad serwisem HORION-PL v2.0 (realizowanym na zlecenie ESA, umożliwiającym eliminację opóźnienia jonosferycznego wyższego rzędu z obserwacji GNSS przesłanych w pliku RINEX) potwierdzono przydatność nowego regionalnego modelu jonosfery do estymacji wyrazów wyższych rzędów opóźnienia jonosferycznego, które w szczególności obarczają wyniki estymacji orbit satelitów oraz pozycjonowania absolutnego (PPP). Na podkreślenie zasługuje również fakt, że od 3 kwietnia 2017 roku habilitantka koordynuje na UWM prace w ramach projektu „A TOMographic Ionospheric Corrections testbed for Poland GNSS networks based on Wide Area Real Time Kinematic (ATOMIC-WARTK)” realizowanego na zamówienie Europejskiej Agencji Kosmicznej. Projekt ten, wykonywany przez międzynarodowe konsorcjum naukowo-przemysłowe, ma na celu sprawdzenie możliwości poprawy pozycjonowania satelitarne metodą RTK na terenie Polski w komercyjnej sieci stacji referencyjnych SmartNet (należącej do lidera projektu - firmy Leica Geosystems Polska) poprzez zastosowanie dokładnych poprawek jonosferycznych dostarczanych przez UPC i UWM.

Podsumowując, prowadzone przez habilitantkę badania wchodzące w skład cyklu publikacji powiązanych tematycznie pozostają w zgodzie z aktualnym nurtem badań w dziedzinie geodezji satelitarnej i geofizyki. Nie należy zapominać, że znajomość stanu jonosfery wykorzystywana jest również do generowania poprawek jonosferycznych wymaganych podczas opracowania geodezyjnych obserwacji satelitarnych - SAR, altimetria satelitarna, precyzyjne pozycjonowanie GNSS, DORIS, gradiometria satelitarna - w szerokim wachlarzu zastosowań geofizycznych. Badania w tej dziedzinie skupiają coraz więcej uwagi i nabierają większego znaczenia ze względu na rozwój metod modelowania jonosfery. Należy zaznaczyć, że badania nad modelowaniem górnej warstwy ziemskiej atmosfery są przeprowadzane w wiodących instytucjach naukowych na całym świecie. W toku prowadzonych przez habilitantkę badań nawiązana została współpraca na arenie krajowej z Uniwersytetem Przyrodniczym

Anna Krypiak-Gregorczyk

we Wrocławiu [B.4], a także na arenie międzynarodowej z Technical University of Munich (TUM) (Krypiak-Gregorczyk i inni, 2017d), Polytechnic University of Catalonia (UPC) (Garcia-Rigo i inni, 2016) oraz Wuhan University (WU) (Jarmołowski i inni, 2018). Dokładność nowego precyzyjnego modelu jonosfery została potwierdzona przez naukowców z tychże ośrodków, dając wyraz wspólnym prezentacjom, które były przedstawiane m.in. na corocznym Zgromadzeniu Ogólnym Europejskiej Unii Nauk o Ziemi (EGU) w 2017 i 2018 roku, jak również na Zgromadzeniach Naukowych Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (IAG) w 2013 i 2017 roku.

4.4.6. LITERATURA

1. Alizadeh M. M., Schuh H., Schmidt M. (2015) Ray tracing technique for global 3-D modeling of ionospheric electron density using GNSS measurements. *Radio Science*, 50, 539-553.
2. Arabelos D. and Tscherning C. C. (2003) Globally covering a-priori regional gravity covariance models *Adv. Geosci.* 1 143-147. DOI:10.5194/adgeo-1-143-2003.
3. Bilitza D., McKinnell L. A., Reinisch B., Fuller-Rowell T. (2011) The international reference ionosphere today and in the future. *J. Geod.* 2011, 85, 909–920.
4. Bilitza D. and Reinisch B.W. (2008) International Reference Ionosphere 2007: Improvements and new parameters. *Adv Space Res* 42: 599–609.
5. Ciralo L. (1993) Evaluation of GPS L2–L1 biases and related daily TEC profiles, In: *Workshop on Modeling of the Ionosphere for GPS Application*, Neusterlitz, September 20–30, 1993.
6. El-Fiky G. S., Kato T., and Fujii Y. (1997) Distribution of vertical crustal movement rates in the Tohoku district, Japan, predicted by least-squares collocation, *J. Geod.*, 71(7): 432–442.
7. Feltens J. (2007) Development of a new three-dimensional mathematical ionosphere model at European space agency/European space operations centre. *Space Weather*, 5, 1–17.
8. Garcia-Rigo A., Roma D., Hernandez M., Li Z., Terkildsen M., Ghoddousi-Fard R., Dettmering D., Erdogan E., Haralambous, H., Beniguel, Y., Berdermann J., Kriegel M., Krypiak-Gregorczyk A., i inni (2016) RTIM-WG: IAG’s real time ionosphere monitoring working group: current status, outcomes and first results. *Symposium of the IAG Commission 4: Positioning and Applications*, 4-7.09.2016, Wroclaw, Poland.
9. Georgiadiou J. (1994) Modeling the ionosphere for an active control networks of GPS stations, In: *LGP Series, Publications of the Delft Geodetic Computing Centre*, no. 7.
10. Grejner-Brzezinska D.A., Wielgosz P., Kashani I. , Smith D.A., Robertson D.S., Mader G.L., and Komjathy A. (2006) The impact of severe ionospheric conditions on the accuracy of RTK position estimation: performance analysis of various ionospheric modeling techniques. *Navigation* 53, 3, 203-217.
11. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Aragon-Angel A., Garcia-Rigo A., Salazar D., Escudero M. (2011) The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. *Journal of Geodesy*, 85, 887–907
12. Hernández-Pajares M., Juan J. M., Sanz J., Orus R., Garcia-Rigo A., Feltens J., Komjathy A., Schaer S., Krankowski A. (2009) The IGS VTEC Maps: A Reliable Source Of Ionospheric Information Since 1998. *Journal of Geodesy*, 3-4, 263-275.
13. Hernández-Pajares M.; Juan J.; Sanz J. (1999) New approaches in global ionospheric determination using ground gps data. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 61, 1237–1247.

Anna Krypiak-Gregorczyk

14. Hernandez-Pajares M., Roma-Dollase D., Krankowski A., Garcia-Rigo A., Orús-Perez R. (2017) Methodology and consistency of slant and vertical assessments for ionospheric electron content models. *Journal of Geodesy*, 91, 1-10, doi:10.1007/s00190-017-1032-z.
15. Hernández-Pajares M., Wielgosz P., Paziewski J., Krypiak-Gregorczyk A., Krukowska M., Stępiak K., Kaplon J., Hadas T., Sosnica 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 Sci.*, 52, 321–337, doi:10.1002/2016RS006159
16. Hu G., Abbey D. A., Castleden N., Featherstone W. E., Earls C., Ovstedal O., Weihing D. (2005) An approach for instantaneous ambiguity resolution for medium- to long-range multiple reference station networks. *GPS Solutions*, 9, 1–11.
17. Jarmołowski W. (2015) Least squares collocation with uncorrelated heterogeneous noise estimated by restricted maximum likelihood *J Geod.* 89 577-589. DOI:10.1007/s00190-015-0800-x.
18. Kashani I., Wielgosz P., Grejner-Brzezinska D. A. (2007) The impact of the ionospheric correction latency on long baseline instantaneous kinematic GPS positioning. *Surv. Rev.* 2007,39, 238–51
19. Khodabandeh A. and Teunissen P. J. G. (2015) An analytical study of PPP-RTK corrections: precision, correlation and user-impact. *J Geod.* 89(11):1109–1132.
20. Khodabandeh A. and Teunissen P. J. G. (2016) Array-aided multifrequency GNSS ionospheric sensing: Estimability and precision analysis. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 2016, 54, 5895–5913.
21. Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Sidorowicz T. (2013) Serwis monitorowania stanu jonosfery nad siecią ASG-EUPOS, Konferencja Sekcji Geodezji Satelitarnej Komitetu Badań Kosmicznych i Satelitarnych Polskiej Akademii Nauk "Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji", 24-27.09.2013, Kraków, Polska
22. Krypiak-Gregorczyk A., Wielgosz P., Borkowski A., Schmidt M., Erdogan E., Goss A. (2017d) Comparison of Ionospheric Vertical Total Electron Content modelling approaches using spline based representations, EGU General Assembly 2017, 23-28.04.2017, Vienna, Austria
23. Leick A., Rapoport L., Tatarnikov D. *GPS Satellite Surveying*, 4th ed., J. Wiley and Sons, Hoboken, NJ., USA, 2015; pp. 496-509
24. Mannucci A., Wilson B., Yuan D., Ho C., Lindqwister U., Runge T. (1998) Global mapping technique for gps-derived ionospheric total electron content measurements. *Radio Sci.* 1998, 33, 565–582.
25. Maruyama T., Ma G., Nakamura M. (2009) Observations of TEC Disturbances with GEONET —TEC Storm and SED. *Journal of the National Institute of Information and Communications Technology* 56: 1-4.
26. Nava B., Radicella S. M., Azpilicueta F. (2011) Data ingestion into NeQuick 2. *Radio Science*, 46, RS0D17, doi:10.1029/2010RS004635.
27. Orús R., Hernández-Pajares M., Juan J.M., Sanz J. (2005) Improvement of global ionospheric VTEC maps by using kriging interpolation technique. *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 67, 1598–1609. [CrossRef]
28. Paziewski J. (2016) Study on desirable ionospheric corrections accuracy for network-RTK positioning and its impact on time-to-fix and probability of successful single-epoch ambiguity resolution *Adv. Space Res.*, doi:10.1016/j.asr.2015.12.024.

Anna Krypiak-Gregorczyk

29. Rovira-Garcia A., Juan J. M., Sanz J., González-Casado G. (2015) A World-Wide Ionospheric Model for Fast Precise Point Positioning. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 53, 4596-4604, doi:10.1109/TGRS.2015.2402598.
30. Schaer S. (1999) Mapping and predicting the earth's ionosphere using the global positioning system. PhD Dissertation Astronomical Institute, University of Berne.
31. Schmidt M., Dettmering D., Moßmer M., Wang Y., Zhang J. (2011) Comparison of spherical harmonic and B spline models for the vertical total electron content. *Radio Science*, 46, 1-8.
32. Schrijver CJ, Kauristie K, Aylward AD, Denardini CM, Gibson SE, Glover A, Gopalswamy N, Grande M, Hapgood M, Heynderickx D, Jakowski N, Kalegaev VV, Lapenta G, Linker JA, Liu S, Mandrini CH, Mann IR, Nagatsuma T...Vilmer N (2015) Understanding space weather to shield society: A global road map for 2015–2025 commissioned by COSPAR and ILWS, *Advances in Space Research* 55(12): 2745-2807. doi:10.1016/j.asr.2015.03.023
33. Schunk R. W., Scherliess L., Sojka J. J., Thompson D. (2004) Global Assimilation of Ionospheric Measurements (GAIM). *Radio Science*, 39, RS1S02, doi:10.1029/2002RS002794.
34. Shagimuratov I., Baran L.W., Wielgosz P., Yakimova G.A. (2002) The structure of mid- and high-latitude ionosphere during September 1999 storm event obtained from GPS observations. *Annales Geophysicae* 2002, 20, 665–671.
35. Wielgosz P. (2011) Quality assessment of GPS rapid static positioning with weighted ionospheric parameters in generalized least squares. *GPS Solutions*, 15, 89–99. doi:10.1007/s10291-010-0168
36. Wielgosz P., Grejner-Brzezinska D.A. and Kashani I. (2003) Regional ionosphere mapping with kriging and multiquadric methods. *Journal of Global Positioning Systems*, 2, 1, 48–55.
37. Wielgosz P., Kashani I. and Grejner-Brzezinska D.A. (2005a), Analysis of Long-Range Network RTK during Severe Ionospheric Storm, *Journal of Geodesy*, Vol. 79, No. 9, pp. 524-531
38. Verkhoglyadova O.P., Tsurutani B.T., Mannucci A.J., Mlynczak M.G., Hunt L.A., Paxton L.J., Komjathy A. (2016) Solar wind driving of ionosphere-thermosphere responses in three storms near St. Patrick's Day in 2012, 2013, and 2015. *J Geophys Res Space Physics* 121:8900–8923. doi:10.1002/2016JA022883
39. Zus F., Deng Z., Heise S., Wickert J. (2017) Ionospheric mapping functions based on electron density fields. *GPS Solutions* 2017, 21, 873-885, doi:10.1007/s10291-016-0574-5.

Anna Krypiak-Gregorczyk

5. OMÓWIENIE POZOSTAŁYCH OSIĄGNIĘĆ NAUKOWO – BADAWCZYCH

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze habilitantki obejmują (podsumowanie w Tabeli 11, 12; szczegóły w Załączniku nr. 3) oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze, publikacje naukowe spoza tematyki dotyczącej cyklu publikacji powiązanych tematycznie, referaty wygłoszone na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych oraz publikowane w materiałach z konferencji międzynarodowych uwzględnionych w uznanych bazach o zasięgu międzynarodowym, dokumentacje prac badawczych oraz udział w projektach badawczych.

5.1. ORYGINALNE OSIĄGNIĘCIA NAUKOWO-BADAWCZE

Oryginalne osiągnięcia naukowo-badawcze obejmują:

- opracowanie nowej autorskiej metody analiz dokładności modeli jonosfery, tzw. *self-consistentcy analysis*;
- opracowanie serwisu monitorowania stanu jonosfery nad stacjami sieci ASG-EUPOS <http://ginpos.uwm.edu.pl/iono/PL/index.php>;
- opracowanie europejskiego serwisu monitorowania stanu jonosfery <http://ginpos.uwm.edu.pl/iono/index.php>;
- współautorstwo serwisu HORION-PL v2.0.

5.2. WYKAZ INNYCH OPUBLIKOWANYCH PRAC NAUKOWYCH SPOZA TEMATYKI DOTYCZĄCEJ CYKLU PUBLIKACJI POWIĄZANYCH TEMATYCZNIE

Podano Impact Factor z roku opublikowania, liczbę punktów wg MNiSW. Szczegółowy wkład habilitantki przedstawiono w Załączniku 3.

A. Publikacje indeksowane przez Journal Citation Reports (Lista A MNiSW)

- [P.1] Hadas T., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Hernández-Pajares M., Kaplon J., Paziewski J., Wielgosz P., Garcia-Rigo A., Kazmierski K., Sosnica 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**, 122(11), pp. 8625–8627, doi: 10.1002/2017JB014750, **IF=3.482, 35p.**
- [P.2] Hernández-Pajares M., Wielgosz P., Paziewski J., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Krukowska M., Stępiak K., Kaplon J., Hadas T., Sosnica 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 Sci.**, 52, 321–337, doi:10.1002/2016RS006159, **IF=1.418, 20p.**
- [P.3] Wielgosz P., Krukowska M., Paziewski J., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Stępiak K., Kaplon J., Sierny J., Hadas 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, p. 125802, doi:10.1088/0957-0233/24/12/125802, **IF=1.352, 35p.**
-
- [P.4] Zakharenkova I.E., Krankowski A., Shagimuratov I.I., Cherniak Yu.V., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Wielgosz P., Lagovsky A.F. (2012) *Observation of the ionospheric storm of October 11, 2008 using FORMOSAT-3/COSMIC data*. **Earth Planets and Space (EPS)**, 64(6), 505-512. 10.5047/eps.2011.06.046, **IF=1.703, 20p.**

Anna Krypiak-Gregorczyk

- [P.5] Krankowski A. Zakharenkova I., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Shagimuratov I.I., Wielgosz P. (2011) *Ionospheric Electron Density Observed by FORMOSAT-3/COSMIC over European Region*. **Journal of Geodesy**, 85(12), 949-964. doi 10.1007/s00190-011-0481-z, **IF=2.414, 35p.**
- [P.6] Krankowski A., Shagimuratov I.I., Ephishov I.I., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Yakimova G. (2009) *The occurrence of the mid-latitude ionospheric trough in GPS-TEC measurements*. **Advances in Space Research**, doi:10.1016/j.asr.2008.05.014, **IF=1.079, 20p.**

B. Materiały konferencyjne indeksowane przez bazę Web of Science

- [W.1] Wielgosz P., **Krypiak-Gregorczyk A.**, Borkowski A. (2017) Regional Ionosphere Modeling Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation, **IEEE Proceedings of the Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics) 2017**, Gdansk, Poland, 22 - 25 June 2017.
- [W.2] Krukowska M., Wielgosz P., **Krypiak-Gregorczyk A.**, (2014), *Accuracy of VRS ionospheric corrections during ionospheric disturbances*, **International Conference on Environmental Engineering (ICEE) Selected papers**, The 9th International Conference "Environmental Engineering" 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania, doi: 10.3846/enviro.2014.225.
- [W.3] **Krypiak-Gregorczyk A.**, Wielgosz P., Krukowska M. (2014) A New Ionosphere Monitoring Service over the ASG-EUPOS Network Stations, **International Conference on Environmental Engineering (ICEE) Selected papers**, The 9th International Conference "Environmental Engineering" 22–23 May 2014, Vilnius, Lithuania, doi: 10.3846/enviro.2014.224).

5.3. WSKAŹNIKI DOROBKU NAUKOWEGO

Szczegółowy wykaz osiągnięć naukowo-badawczych zawiera Załącznik nr 3.

Tabela 10 Zestawienie osiągnięć naukowo-badawczych

Wskaźnik	Wartość
Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie <i>Journal Citation Reports (JCR)</i>	
▪ po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	8
▪ przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	3
Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych tworzących monotematyczny cykl według listy <i>Journal Citation Reports (JCR)</i> , zgodnie z rokiem opublikowania	15.118
Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych po uzyskaniu stopnia naukowego doktora według listy <i>Journal Citation Reports (JCR)</i> , zgodnie z rokiem opublikowania	22.152
Sumaryczny <i>Impact Factor</i> wszystkich publikacji naukowych według listy <i>Journal Citation Reports (JCR)</i> , zgodnie z rokiem opublikowania	27.348
Liczba cytowań według bazy Web of Science	114
Liczba cytowań według bazy Web of Science, z wyłączeniem autocytowań	97
Indeks Hirscha według bazy Web of Science	6
Liczba punktów publikacji tworzących monotematyczny cykl zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	112.25
Liczba punktów publikacji po uzyskaniu stopnia naukowego doktora zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	135.25

Anna Krypiak-Gregorczyk

Liczba punktów <u>wszystkich publikacji</u> zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	148.25
Wygłoszenie referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach tematycznych	
▪ Referaty na konferencjach międzynarodowych	58
▪ Referaty na konferencjach krajowych	24
Kierowanie międzynarodowymi i krajowymi projektami badawczymi oraz udział w takich projektach	
▪ Kierowanie	1
▪ Udział jako wykonawca	6
Międzynarodowe i krajowe nagrody za działalność naukową	4

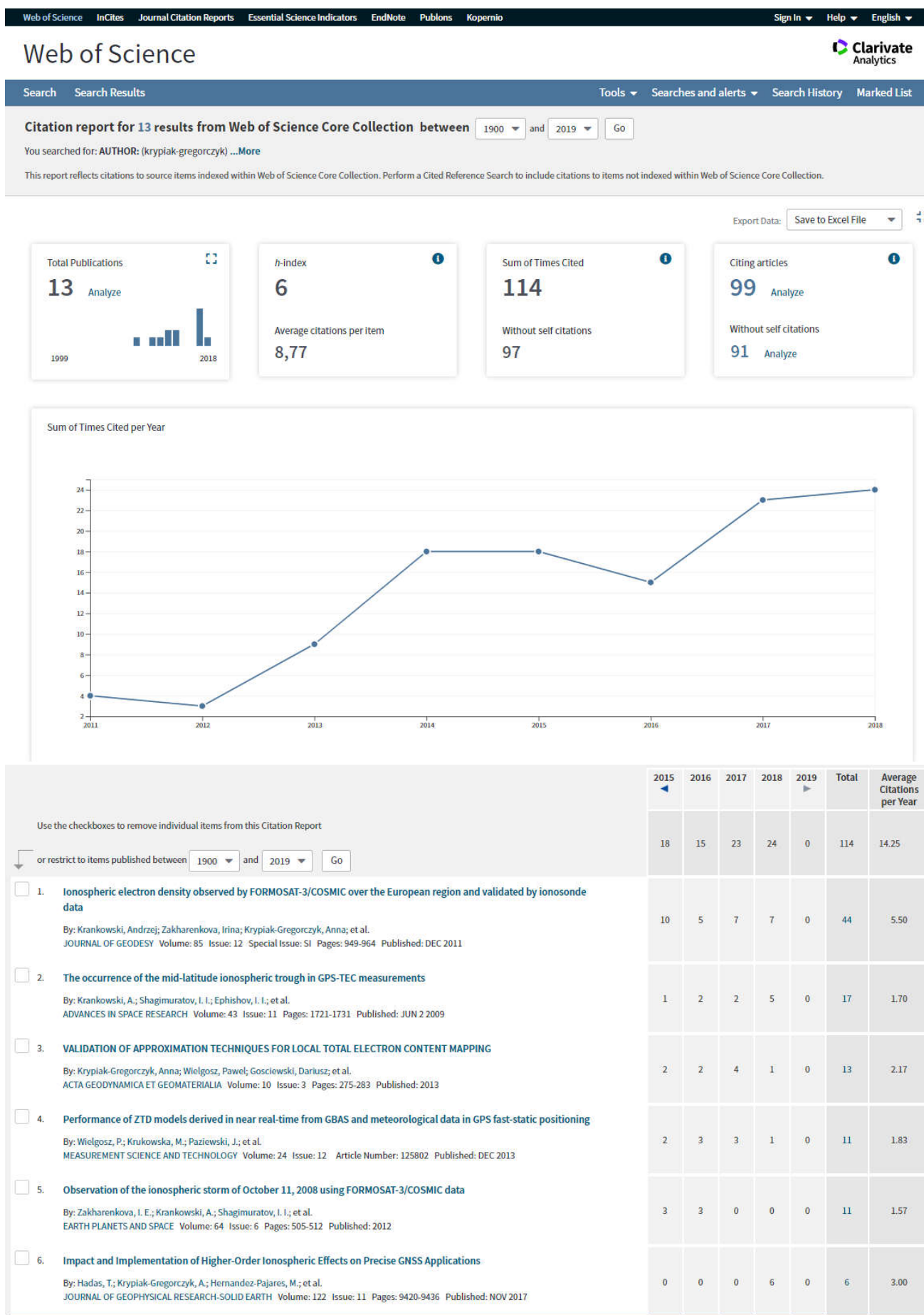
Tabela 11 prezentuje zestawienie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy krajowej i międzynarodowej, uzyskanego po otrzymaniu stopnia doktora. Szczegółowy opis dorobku zawiera załącznik 3.

Tabela 11 Zestawienie dorobku dydaktycznego i popularyzatorskiego oraz współpracy krajowej i międzynarodowej

Wskaźnik	Wartość
Udział w komitetach organizacyjnych i naukowych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	4
Prowadzenie sesji podczas międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	1
Otrzymane nagrody i wyróżnienia inne niż naukowe	1
Udział w konsorcjach i sieciach badawczych	5
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych	3
Współpraca z ośrodkami zagranicznymi	3
Udział w zespołach eksperckich i konkursowych	4
Promotor prac dyplomowych	3
Recenzowanie publikacji w czasopiśmie międzynarodowych i krajowych:	
▪ Czasopisma z listy JCR (posiadające Impact Factor)	14
▪ Materiały konferencyjne (WoS)	1
▪ łącznie	15

Anna Krypiak-Gregorczyk

5.4. RAPORT Z WEB OF SCIENCE (STAN NA 23.11.2018 R.)



Anna Krypiak-Gregorczyk

<input type="checkbox"/>	7.	A New Ionosphere Monitoring Service over the ASG-EUPOS Network Stations By: Krypiak-Gregorczyk, Anna; Wielgosz, Pawel; Krukowska, Marta Conference: 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE) Location: Vilnius, LITHUANIA Date: MAY 22-23, 2014 Sponsor(s): Vilnius Gediminas Tech Univ; Lithuanian Acad Sci; Acad Sustainable Dev; Federat European Heating & Air Conditioning Assoc; Int Federat Surveyors; Baltic Road Assoc; Int Associ Publ Transport; Int Acad Ecolog & Life Protect Sci; Lithuanian Water Suppliers Assoc; European Spatial Planning Observat Network 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING (9TH ICEE) - SELECTED PAPERS Published: 2014	0	0	2	1	0	4	0.80
<input type="checkbox"/>	8.	A new TEC interpolation method based on the least squares collocation for high accuracy regional ionospheric maps By: Krypiak-Gregorczyk, Anna; Wielgosz, Pawel; Jarmolowski, Wojciech MEASUREMENT SCIENCE AND TECHNOLOGY Volume: 28 Issue: 4 Pages: 1-13 Article Number: 045801 Published: APR 2017	0	0	2	1	0	3	1.50
<input type="checkbox"/>	9.	Ionosphere Model for European Region Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation By: Krypiak-Gregorczyk, Anna; Wielgosz, Pawel; Borkowski, Andrzej REMOTE SENSING Volume: 9 Issue: 12 Article Number: UNSP 1221 Published: DEC 2017	0	0	0	2	0	2	1.00
<input type="checkbox"/>	10.	Carrier phase bias estimation of geometry-free linear combination of GNSS signals for ionospheric TEC modeling By: Krypiak-Gregorczyk, Anna; Wielgosz, Pawel GPS SOLUTIONS Volume: 22 Issue: 2 Article Number: UNSP 45 Published: APR 2018	0	0	1	0	0	1	1.00
<input type="checkbox"/> Select Page Save to Excel File									
Sort by: Times Cited Date More			◀ 1 of 2 ▶						
Sort by: Times Cited Date More			◀ 2 of 2 ▶						
Use the checkboxes to remove individual items from this Citation Report									
or restrict to items published between 1900 and 2019 Go									
<input type="checkbox"/>	11.	Direct MSTID mitigation in precise GPS processing By: Hernandez-Pajares, Manuel; Wielgosz, Pawel; Paziewski, Jacek; et al. RADIO SCIENCE Volume: 52 Issue: 3 Pages: 321-337 Published: MAR 2017	0	0	1	0	0	1	0.50
<input type="checkbox"/>	12.	Regional Ionosphere Modeling Based on Multi-GNSS Data and TPS Interpolation By: Wielgosz, Pawel; Krypiak-Gregorczyk, Anna; Borkowski, Andrzej Conference: Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics) Location: Gdansk Univ Technol, POLAND Date: JUN 22-25, 2017 Sponsor(s): IEEE; Astri Polska; ErgoHestia S A; Leica Geosystems; Satlab Geosolut; Assoc Polish Engineers Great Britain; Assoc Polish Surveyors; Gdansk Univ Technol, Johannes Hevelius Sci Circle 2017 BALTIC GEODETIC CONGRESS (BGC GEOMATICS) Pages: 287-291 Published: 2017	0	0	1	0	0	1	0.50
<input type="checkbox"/>	13.	Accuracy of VRS ionospheric corrections during ionospheric disturbances By: Krukowska, Marta; Wielgosz, Pawel; Krypiak-Gregorczyk, Anna Conference: 9th International Conference on Environmental Engineering (ICEE) Location: Vilnius, LITHUANIA Date: MAY 22-23, 2014 Sponsor(s): Vilnius Gediminas Tech Univ; Lithuanian Acad Sci; Acad Sustainable Dev; Federat European Heating & Air Conditioning Assoc; Int Federat Surveyors; Baltic Road Assoc; Int Associ Publ Transport; Int Acad Ecolog & Life Protect Sci; Lithuanian Water Suppliers Assoc; European Spatial Planning Observat Network 9TH INTERNATIONAL CONFERENCE ENVIRONMENTAL ENGINEERING (9TH ICEE) - SELECTED PAPERS Published: 2014	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/> Select Page Save to Excel File									
Sort by: Times Cited Date More			◀ 2 of 2 ▶						

Anna Krypiak-Gregorczyk

/podpis/