

AUTOREFERAT

DR INŻ. RAFAŁ SIERADZKI

INSTYTUT GEODEZJI

WYDZIAŁ GEODEZJI, INŻYNIERII PRZESTRZENNEJ I BUDOWNICTWA

UNIwersytet WARMIŃSKO-MAZURSKI

W OLSZTYNIE

OLSZTYN 2019

Spis treści

1.	Imię i Nazwisko	3
2.	Posiadane dyplomy, stopnie naukowe	3
3.	Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych	3
4.	Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)	4
4.1.	Tytuł osiągnięcia naukowego	4
4.2.	Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe	4
4.3.	Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich możliwego wykorzystania	6
4.3.1.	Wprowadzenie i uzasadnienie badań.....	6
4.3.2.	Monitorowanie owalu zorzowego z użyciem parametru ROTI.....	9
4.3.3.	Badania nad wpływem jonosfery na pozycjonowanie GNSS.....	17
4.3.4.	Detekcja zaburzeń jonosferycznych z wykorzystaniem względnych wartości STEC.....	23
4.3.5.	Podsumowanie	31
4.3.6.	Literatura.....	33
5.	Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych	36
5.1.	Publikacje z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego indeksowane przez JCR.....	37
5.2.	Inne opublikowane materiały	37
5.3.	Podsumowanie dorobku i osiągnięć naukowych, popularyzatorskich, organizacyjnych i dydaktycznych	38
5.4.	Raport z Web of Science (stan na 10.02.2019)	40

1. Imię i Nazwisko

Rafał Sieradzki

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe

1. **Tytuł zawodowy magister inżynier** w zakresie geodezji i kartografii nadany przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie dn. 22.07.2003 r.

Praca magisterska nt.: *„Badanie powtarzalności wyznaczeń współrzędnych i długości wektorów w rejonie Morza Śródziemnego oraz Arktyki”*

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

2. **Stopień naukowy doktora nauk technicznych** w dyscyplinie geodezja i kartografia w zakresie geodezji satelitarnej nadany dn. 9.02.2010 r. przez Radę Wydziału Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie.

Tytuł rozprawy doktorskiej: *„Analiza zależności między sezonowymi zmianami jonosfery a zmianami wyznaczanych pozycji permanentnych stacji GNSS”*

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

Recenzenci rozprawy doktorskiej:

1. dr hab. Hanna Rothkaehl, prof. nadzw. (Centrum Badań Kosmicznych Polskiej Akademii Nauk)
2. prof. dr hab. Andrzej Drożyner (Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu)

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych

2009-2010 – asystent na Wydziale Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie

2010-2019 – adiunkt na Wydział Geodezji i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie (obecnie Wydział Geodezji, Inżynierii Przestrzennej i Budownictwa).

4. Wskazanie osiągnięcia wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2016 r. poz. 882 ze zm. w Dz. U. z 2016 r. poz. 1311)

4.1. Tytuł osiągnięcia naukowego

Podstawę rozprawy habilitacyjnej stanowi cykl powiązanych tematycznie publikacji naukowych pt.: **„*Monitorowanie warunków jonosferycznych dla potrzeb badań pogody kosmicznej oraz precyzyjnego pozycjonowania GNSS*”**

4.2. Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe

Prace stanowiące osiągnięcie naukowe zostały przedstawiony w tabeli 1. Oprócz informacji o tytułach i autorach poszczególnych publikacji zawiera ona także liczbę punktów czasopism wg MNiSW, ich *Impact Factor* oraz procentowy udział habilitanta (szczegółowy opis wkładu habilitanta w przygotowanie poszczególnych prac zawiera załącznik nr 3).

Tabela 1 Spis publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe.

Ozn. publ.	Publikacja	Liczba punktów czasop.	Impact Factor czasop.	Udział wnioskodawcy
1.B1	Sieradzki R , Cherniak I, Krankowski A., 2013, Near-real time monitoring of the TEC fluctuations over the northern hemisphere using GNSS permanent networks, <i>Advances in Space Research</i> , Vol. 52(3), 391-402, DOI 10.1016/j.asr.2013.03.036	20	1.238	80%
1.B2	Sieradzki R , 2015, An analysis of selected aspects of irregularities oval monitoring using GNSS observations, <i>Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics</i> , Vol. 129, 87-98, DOI 10.1016/j.jastp.2015.04.017	20	1.463	100%
1.B3	Sieradzki R , Paziewski J, 2015, MSTIDs impact on GNSS observations and its mitigation in rapid static positioning at medium baselines, <i>Annals of Geophysics</i> , Vol. 58(6), A0661, DOI 10.4401/ag-6891	20	0.679	60%
1.B4	Sieradzki R , Paziewski J, 2016, Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitude, <i>GPS Solutions</i> , Vol. 20(3), 553-563, DOI 10.1007/s10291-015-0466-0	35	4.061	50%
1.B5	Banville S, Sieradzki R , Hoque M, Wezka K, Hadas T, 2017, On the estimation of higher-order ionospheric effects in precise point positioning, <i>GPS Solutions</i> , Vol. 21(4), 1817-1828, DOI 10.1007/s10291-017-0655-0	35	4.727	40%
1.B6	Sieradzki R , Paziewski J, 2018, On the Feasibility of Interhemispheric Patch Detection Using Ground-Based GNSS Measurements, <i>Remote Sensing</i> , Vol. 20(3), 2044, DOI 10.3390/rs10122044	35	3.406	80%
1.B7	Sieradzki R , Paziewski J, 2019, GNSS-based analysis of high latitude ionospheric response on a sequence of geomagnetic storms performed with ROTI and a new relative STEC indicator, <i>Journal of Space Weather and Space Climate</i> , Vol. 9, DOI 10.1051/swsc/2019001	30	2.333	80%

* numeracja publikacji zgodna z załącznikiem 3

** kolejność przygotowania i wysłania prac do recenzji: **1.B1**, **1.B2**, **1.B4**, **1.B3**, **1.B5**, **1.B7**, **1.B6**; różnice w chronologii wynikają z okresu recenzji oraz publikacji

4.3. Omówienie celu naukowego i osiągniętych wyników wraz z przedstawieniem ich możliwego wykorzystania

4.3.1. Wprowadzenie i uzasadnienie badań

W ostatnich latach obserwacje globalnych systemów nawigacji satelitarnych (GNSS) stały się jedną z kluczowych technik pomiarowych wykorzystywanym w geodezji satelitarnej. Ich zastosowanie w szerokim spektrum nauk o Ziemi obejmuje między innymi precyzyjne pozycjonowanie satelitarne oraz badania jonosfery (Odiijk 2000; Jakowski i in. 2011; Hernandez-Pajares i in. 2011; Paziewski 2015). W przypadku naziemnych pomiarów satelitarnych parametrem jonosferycznym jest całkowita zawartość elektronów wzdłuż propagacji sygnału od satelity i do odbiornika k – STEC (*slant total electron content*). Zmienna ta może być rozpatrywana z jednej strony jako czynnik degradujący wyznaczaną pozycję, ale z drugiej jako wiarygodne źródło informacji o górnych warstwach atmosfery.

Podstawą badań wykonywanych z użyciem obserwacji GNSS jest układ fazowych ($L_{k,1}^i$, $L_{k,2}^i$) oraz kodowych ($P_{k,1}^i$, $P_{k,2}^i$) pomiarów dwuczęstotliwościowych:

$$\begin{cases} L_{k,1}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i - I_{k,1}^i + \lambda_1 B_{k,1}^i \\ L_{k,2}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i - I_{k,2}^i + \lambda_2 B_{k,2}^i \\ P_{k,1}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i + I_{k,1}^i + c(b_{k,1} + b_1^i) \\ P_{k,2}^i = \rho_k^i + c(\Delta t_k - \Delta t^i) + T_k^i + I_{k,2}^i + c(b_{k,2} + b_2^i) \end{cases} \quad (1)$$

gdzie: ρ_k^i jest odległością geometryczną, Δt_k oraz Δt^i są poprawkami do zegara odbiornika oraz satelity, T_k^i oraz I_k^i oznaczają opóźnienia troposferyczne i jonosferyczne a λ_1 and λ_2 są długościami fal. Wyrazy $B_{k,1}^i$ oraz $B_{k,2}^i$ reprezentują sumę nieoznaczoności oraz opóźnień sprzętowych dla pomiarów fazy, natomiast b_1^i , b_2^i oraz $b_{k,1}$, $b_{k,2}$ oznaczają opóźnienia sprzętowe obserwacji kodowych.

Ze względu na dyspersyjną naturę jonosfery badania tej warstwy oparte o obserwacje GNSS są zwykle realizowane z wykorzystaniem kombinacji liniowych pozbawionych czynnika geometrii (ang. *geometry-free*) $L_{k,4}^i$ oraz $P_{k,4}^i$:

$$\begin{cases} L_{k,4}^i = L_{k,1}^i - L_{k,2}^i = I_{k,4}^i + \lambda_1 B_{k,1}^i - \lambda_2 B_{k,2}^i \\ P_{k,4}^i = P_{k,1}^i - P_{k,2}^i = -I_{k,4}^i + c(DCB^i + DCB_k) \end{cases} \quad (2)$$

Podejście to eliminuje wszystkie czynniki niezależne od częstotliwości takie jak: odległość geometryczna, opóźnienie troposferyczne czy niedokładności zegarów odbiornika i satelity. W rezultacie prawa strona równań zawiera opóźnienie jonosferyczne ($I_{k,4}^i$) oraz różnicę stałych wyrazów $\lambda_1 B_{k,1}^i$ i $\lambda_2 B_{k,2}^i$ dla obserwacji fazowych lub błędów instrumentalnych (DCB^i i DCB_k) dla pseudoodległości.

Równanie (2) jest podstawą większości analiz jonosferycznych wykonywanych z użyciem obserwacji GNSS. Obejmują one zarówno tworzenie globalnych i regionalnych

map VTEC (*verical total electron content*) oraz monitorowania różnego rodzaju zaburzeń (Jakowski i in. 2011; Wautelet i Warnant 2011; Park i in. 2013; Ryu i in. 2014; Li i in. 2015; Ren i in. 2016). Obszarem szczególnie interesującym dla drugiego z wymienionych zastosowań są wysokie szerokości geomagnetyczne, charakteryzujące się ekstremalnie skomplikowaną i dynamiczną strukturą jonosfery. Występujące tam warunki są głównie wynikiem kształtu ziemskiego pola magnetycznego umożliwiającego transfer energii wiatru słonecznego do połączonego układu jonosfery oraz magnetosfery. Drugim czynnikiem odpowiedzialnym za generowanie zaburzeń jonosferycznych jest system obiegu plazmy zasilany przez jej rezerwuar na średnich szerokościach. Ze względu na sprzężenie jonosfery z pogodą kosmiczną zaburzenia występujące na wysokich szerokościach są obiektem interdyscyplinarnych badań prowadzonych z użyciem szerokiego spektrum instrumentów. Głównym ich motywem jest dostarczenie informacji o procesach odpowiedzialnych za ich generowanie, a w rezultacie lepsze rozpoznanie zjawisk zachodzących z obszarach okołobiegunowych. Analizy te obejmują między innymi sezonowość nieregularności oraz zależność ich występowania od polaryzacji międzyplanetarnego pola magnetycznego - IMF (*Interplanetary Magnetic Field*) (Bowline i in. 1996; Li i in. 2010; Carlson 2012; Noja i in. 2013; Spicher i in. 2017). Szczególny nacisk takich badań jest również położony na okresy charakteryzujące się dynamiczną aktywnością słoneczną, która z kolei prowadzi do intensyfikacji występowania struktur jonosferycznych (Kitamura i in. 2012; Horvath i Lovell, 2014; Durgonics i in. 2017).

Badania jonosfery okołobiegunowej oparte o pomiary GNSS obejmują głównie wykrywanie scyntytacji sygnałów satelitarnych oraz występowanie zaburzeń średnioskalowych. Ze względu małą liczbą odbiorników wysokoczęstotliwościowych pierwszy rodzaj analiz jest ograniczony do wybranych regionów (Jayachandran i in. 2009). Znacznie korzystniejsza sytuacja jest w drugim przypadku, wykonywanym zwykle z użyciem danych obserwacyjnych o interwale 30 sekundowym. Do tego celu mogą być wykorzystane praktycznie wszystkie permanentne stacje GNSS, co z kolei umożliwia określenie czasowo-przestrzennej charakterystyki zaburzeń średnioskalowych. Trzeba zaznaczyć, że zarówno indeksy scyntyacyjne jak i fluktuacyjne dostarczają bardzo ograniczonej informacji o strukturach wielkoskalowych, która związana jest tylko z ich niestabilnością (Sojka i in. 1998; Hosokawa i in. 2016).

Jonosfera oraz zaburzenia w niej występujące są jednocześnie jednym z głównych czynników degradujących rozwiązanie nieoznaczoności, a w rezultacie dokładność wyznaczonej pozycji. Zagadnienie to wciąż pozostaje nie w pełni rozwiązane w odniesieniu do szybkiego pozycjonowania (do kilkunastu epok pomiarowych). Wyznaczanie współrzędnych w takim przypadku jest zwykle realizowane z wykorzystaniem podwójnie zróżnicowanych obserwacji oraz modelu geometrycznego wspartego przez wagowanie pseudoobserwacji parametrów atmosferycznych (Teunissen 1997; Odijk 2000; Paziewski i Wielgosz 2014). Metoda ta umożliwia precyzyjne pozycjonowanie dla baz dochodzących do kilkudziesięciu kilometrów, jednak jej skuteczność w dalszym ciągu zależy od warunków jonosferycznych. Pozycjonowanie

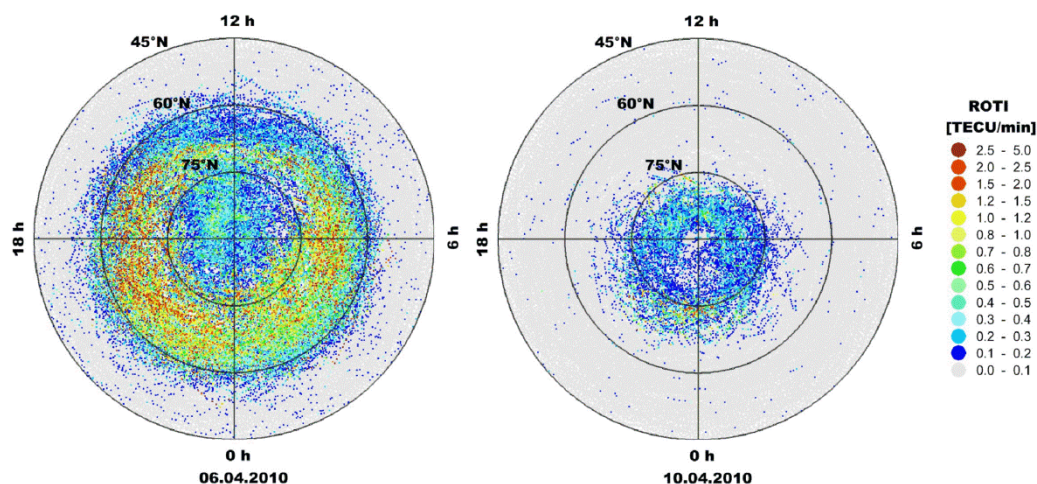
na wysokich szerokościach należy traktować, jako ekstremalnie trudne. Jest to związane zarówno z dynamicznymi zmianami STEC w kolejnych epokach, dochodzącymi do kilku jednostek TEC (TECU), jak i częstym występowaniem uślizgów fazy (*cycle-slip*) (Prikryl i in. 2014). Innym, ciągle analizowanym zagadnieniem jest wpływ wyrazów wyższego rzędu refrakcji jonosferycznej na wyznaczaną pozycję. W większości algorytmów efekt ten jest pomijany w równaniu (1) oraz przy tworzeniu kombinacji liniowych (2). Tym niemniej stanowi on jeden z głównych czynników uniemożliwiających uzyskanie milimetrowej dokładności wyznaczanych współrzędnych i jest obecnie obiektem intensywnych badań dotyczących precyzyjnego pozycjonowania absolutnego – PPP (*Precise Positioning Point*). Podejście to jest znacznie bardziej czułe na pomijany wpływ jonosfery i wymaga jego odpowiedniego modelowania (Fritsche i in. 2005; Garcia-Fernandez i in. 2013).

Zgodnie z powyższym wprowadzeniem wpływ jonosfery na obserwacje GNSS, skutkujący możliwością jej monitorowania oraz degradacją pozycjonowania, jest wciąż otwartym problemem naukowym. Z tego względu tematyka ta była głównym obiektem badań prowadzonych przez habilitanta. **Głównym ich celem było opracowanie oraz walidacja ewaluacja algorytmów umożliwiających wykrywanie różnoskalowych zaburzeń jonosferycznych z wykorzystaniem obserwacji GNSS. Szczególny nacisk został położony na uzyskanie wysokiej rozdzielczości czasowej, co jest niezwykle istotne z punktu widzenia monitorowania dynamicznej pogody kosmicznej. Drugim zamierzeniem habilitanta było zaproponowanie rozwiązania, umożliwiającego skuteczną redukcję wpływu zaburzeń jonosferycznych na pozycjonowanie GNSS.**

Szczegółowy opis przeprowadzonych eksperymentów oraz ich wyników został podzielony na trzy sekcje odpowiadające głównym zagadnieniom badawczym. Pierwsza z nich (4.3.2) przedstawia progres w monitorowaniu owalu zorzowego od określenia możliwości opisu tego zjawiska z wykorzystaniem obserwacji GNSS do algorytmu umożliwiającego śledzenie jego zmian z wysoką rozdzielczością czasową. Druga sekcja (4.3.3) jest poświęcona wpływowi jonosfery na pozycjonowanie GNSS. Jej główna część demonstruje algorytm pozwalający na traktowanie parametru jonosferycznego jako stałego dla całej sesji oraz walidację jego skuteczności dla różnych poziomów aktywności jonosferycznej. Sekcja ta przedstawia również konkluzje wynikające z badań nad wpływem wyrazów wyższych rzędów refrakcji jonosferycznej. Ostatnia część (4.3.4) przybliży potencjał względnych wartości STEC. Główny nacisk tych badań został położony na detekcję wielkoskalowych struktur polarnych oraz ich wstępne porównanie na obu półkulach.

Odpowiada on czasowej zmianie opóźnienia jonosferycznego obciążonego tylko przez szum obserwacji fazowych. Drugi z wymienionych parametrów jest jednym z najczęściej wykorzystywanych wskaźników do opisu fluktuacji TEC będących wynikiem występowania nieregularności jonosferycznych.

Analiza przedstawiona w pracy **1.B1** obejmowała przetworzenie danych z okresu 1-20 kwietnia 2010 r. Wszystkie obliczenia zostały wykonane z wykorzystaniem programu napisanego w języku Fortran przez habilitanta (oprogramowanie to stanowiło podstawę większości opisywanych poniżej badań i jest ciągle rozwijane). Uzyskane wyniki potwierdziły możliwość wykorzystania danych GNSS do monitorowania owalu zorzowego wokół północnego bieguna geomagnetycznego. Dla obszarów z dużą liczbą stacji, takich jak Grenlandia, badania te mogą być wykonywane z wysoką rozdzielczością przestrzenną i czasową. Z drugiej strony pełne zobrazowanie warunków jonosferycznych jest ograniczane przez nieregularny rozkład odbiorników (Rys.1). Zastępując długość geomagnetyczną przez lokalny czas magnetyczny – MLT (*magnetic local time*) możliwe jest generowanie dobowych map fluktuacji TEC charakteryzujących się jednolitym przestrzennym pokryciem. Przykład takich 24-godzinnych produktów opartych o parametr ROTI przedstawia rysunek 2. Dla dwuwymiarowego przedstawienia zaburzeń wykorzystano model pojedynczej warstwy o wysokości 350 km (podejście to było adaptowane we wszystkich kolejnych pracach).

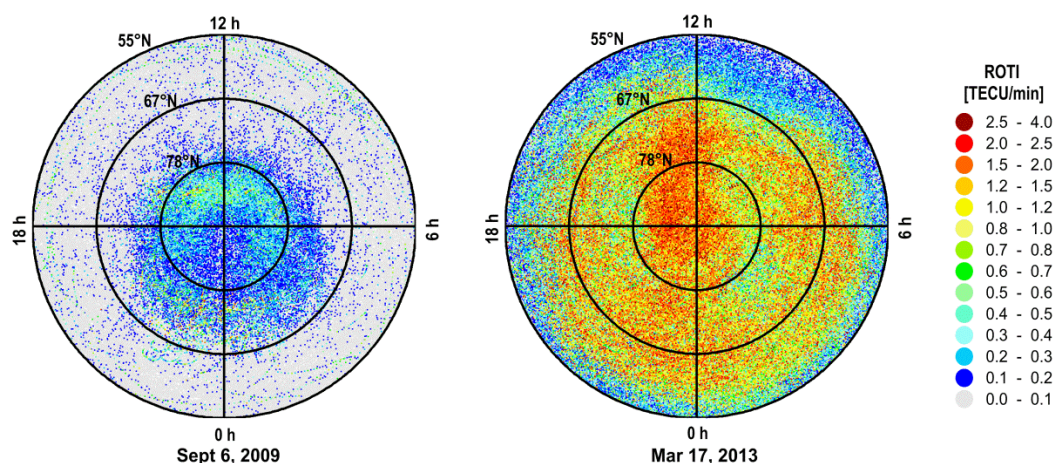


Rys.2 Mapy fluktuacji TEC dla 6 oraz 10 kwietnia 2010 (źródło **1.B1**).

Wyniki dla pierwszego dnia (6 kwietnia 2010 r.) demonstrują rozwój owalu zorzowego w okresie zaburzonym. W tym przypadku zewnętrzne granice owalu są obserwowane na 60° oraz 68° szerokości geomagnetycznej odpowiednio po stronie nocnej oraz dziennej. Wartości uzyskane dla drugiego dnia obrazują bardzo niską aktywność jonosfery podczas spokojnych warunków geomagnetycznych. Porównanie wartości ROTI dla obu dni w przejrzysty sposób demonstruje zależność stanu jonosfery od pogody kosmicznej.

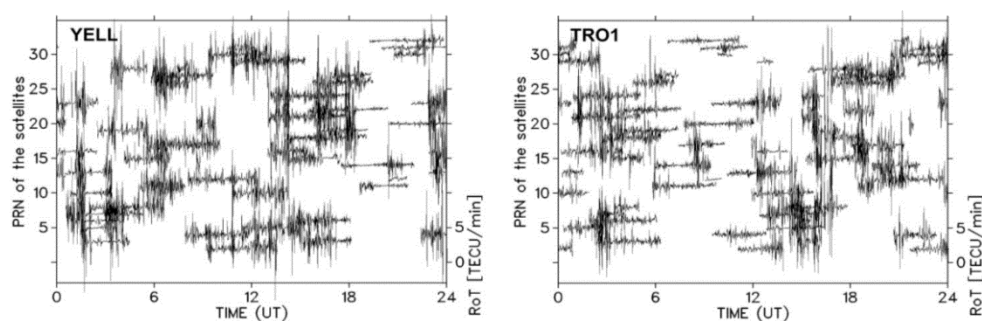
Powyższe wyniki zostały potwierdzone w pracy **1.B4** prezentującej analizę fluktuacji TEC dla 6 września 2009 r. oraz 17 marca 2013 r. Pierwszy z tych dni odpowiada

spokojnej jonosferze w okresie minimum aktywności słonecznej. Drugi natomiast demonstruje odpowiedź jonosfery na koronalny wyrzut masy – CME (*coronal mass ejection*), który dotarł do Ziemi o godzinie ~6:00 UT i wywołał umiarkowaną burzę geomagnetyczną, charakteryzującą się indeksem DST (*disturbance storm time*) na poziomie -132 nT. Porównując oba zaburzone dni (Rys.1 i Rys.2) wyraźnie widać silniejsze fluktuacje TEC w drugim przypadku. Wyniki na rysunku 2 ukazują jeszcze jedno zjawisko polarnej jonosfery, tj. przemieszczenie się wzdłuż osi północ-południe łąt polarnych (*polar patches*). Analizując mapy otrzymane dla warunków spokojnych można zaobserwować nieznacznie silniejsze fluktuacje dla 6 września 2009 r., co związane jest z odmienną orientacją IMF.



Rys.3 Mapy fluktuacji TEC dla 6 września 2009 oraz 17 marca 2013 (źródło **1.B4**).

Zgodnie z powyższymi przykładami dobowe mapy fluktuacji TEC pozwalają na analizy owalu zorzowego, w szczególności dostarczają informacji o jego położeniu oraz zmienności jonosfery w jego obszarze. Niewątpliwą wadą takiego produktu jest utrata informacji o krótkookresowych zmianach warunków jonosferycznych. Istotność tego zagadnienia potwierdzają czasowe zmiany parametru ROT dla dwóch stacji: YELL oraz TRO1 (Rys.4)



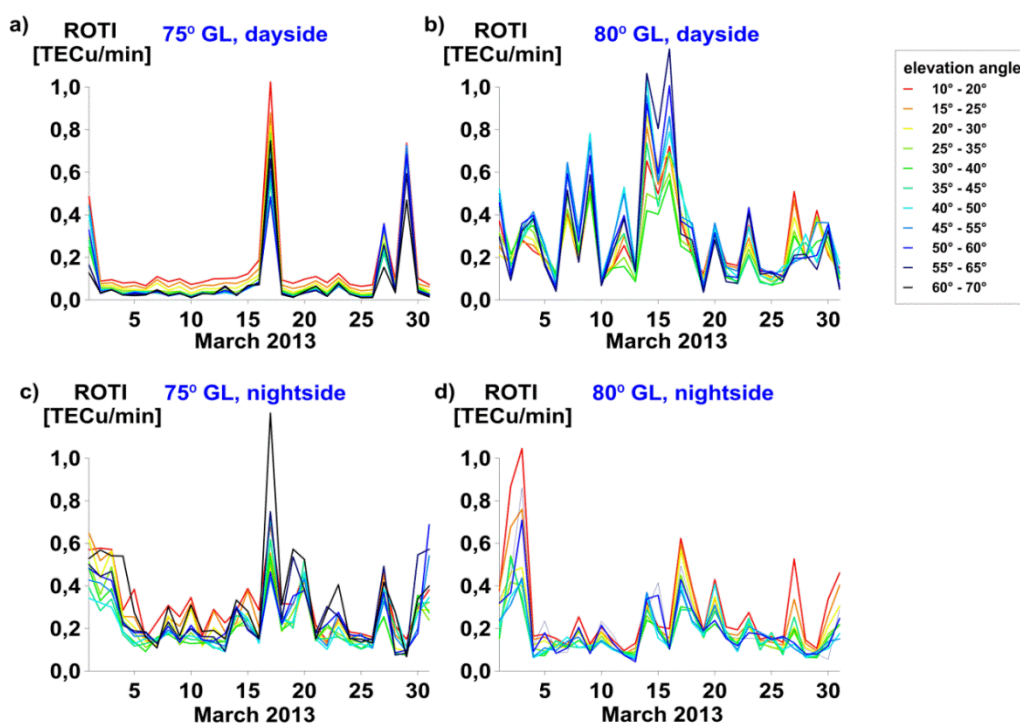
Rys.4 Szeregi czasowe ROT dla satelitów GPS w dniu 6 kwietnia 2010 (źródło **1.B1**).

Jak można zaobserwować fluktuacje TEC w dniu 6 kwietnia 2010 r. były bardzo zmienne. Dla wybranych okresów, tj. 19:00-23:00 UT (YELL) oraz 7:00-12:00 UT (TRO1)

jonosfera była względnie spokojna, podczas gdy w pozostałych godzinach obserwowany jest silny, ale nieregularny wpływ zaburzeń.

Wyniki na rysunku 4 potwierdzają, że szczegółowe analizy owalu zorzowego powinny być wykonywane z wysoką rozdzielczością czasową. Metodologia umożliwiająca takie badania było celem kolejnych prac. W pracy **1.B2** habilitant skupił się na dwóch aspektach, które powinny być wzięte pod uwagę w celu otrzymania wiarygodnej informacji o krótkookresowych zmianach fluktuacji TEC. Pierwszym z nich jest zależność wartości ROTI od kąta elewacji sygnału satelitarnego, która jest szczególnie ważna dla obszarów z małą liczbą obserwacji. Drugim aspektem jest skala zmian fluktuacji TEC w dziedzinach MLT oraz UT. Wiedza ta jest warunkiem wstępnym do odpowiedniej interpolacji wartości ROTI w obszarach pozbawionych danych pomiarowych. Do badania tych zagadnień wykorzystano dane GNSS z ~180 stacji zarejestrowane w marcu 2013.

Podsumowanie pierwszej części wyników przedstawia rysunek 5. Jako wskaźnika użyto mediany wartości ROTI w 10° przedziałach kąta elewacji (10° - 20° , 15° - 25° , ...). Analiza została wykonana dla 75° and 80° szerokości geomagnetycznej w dwóch okresach. Pierwszy z nich, 10:00-12:00 UT, obrazował warunki po stronie dziennej (MLT $12h \pm 1.5h$), drugi natomiast, 22:00-24:00 UT, odpowiadał analizom dla strony nocnej (MLT $0h \pm 1.5h$).



Rys.5 Zależność wartości ROTI od kąta elewacji wyznaczona dla dwóch szerokości geomagnetycznych dziennej oraz nocnej jonosfery (źródło **1.B2**).

Wyniki przedstawione na rysunku 5a demonstrują analizowaną zależność dla spokojnej jonosfery. Wraz z obniżaniem kąta elewacji można obserwować wzrost wartości ROTI,

szczególnie poniżej 30° . Wyjątki od tej reguły odpowiadają dniom zaburzonym. Ze względu na dynamikę jonosfery charakteryzują się one indywidualnym wzorem zależności. Profile otrzymane dla 80° po stronie dziennej nie pokazują żadnego wzrostu dla nisko-elewacyjnych obserwacji (Rys.5b). Z drugiej strony ujawniają one maximum (40° - 50°) charakteryzujące się wzrostem fluktuacji o około 50%. Występowanie tego efektu może być wyjaśnione przechodzeniem tak zorientowanych sygnałów przez najbardziej zaburzoną część owalu. Po stronie nocnej (Rys.5c oraz 5d) poziom fluktuacji jest zbliżony dla obu szerokości, jednakże różnice w rezultatach dla różnych kątów są nawet większe i osiągają do 150%. Największe przeszacowanie nisko-elewacyjnych danych występuje dla 80° szerokości w okresach zaburzonych. Wyniki ujawniają również drugie maksimum dla największych wartości kątów. Podsumowując tą część można wnioskować, że wartości ROTI w obszarze zorzowym zależą od elewacji, przy czym powiązanie to nie jest jednolite w poszczególnych sektorach. W rezultacie zmieniający się rozkład obserwacji może odpowiadać za różnice w wyznaczanych poziomie fluktuacji TEC. Zastosowanie maski elewacji na poziomie 30° powinno uwolnić wyniki od wpływu najgorzej zorientowanych pomiarów.

Porównanie zmian obserwowanych w dziedzinach UT oraz MLT zostało oparte o dane ze stacji rozlokowanych na Grenlandii. Taki wybór zapewnił dużą ilość danych w 6-godzinnym sektorze MLT. W rezultacie możliwe było wyznaczenie średniego poziomu fluktuacji TEC dla trzech sąsiednich 2-godzinnych stref MLT jak również dla trzech 2-godzinnych okresów. Ze względu na rotację rozkładu obserwacji wyniki dla strony dziennej oraz nocnej są przesunięte o 12 godzin. Szczegóły wybranych danych oraz różnice uzyskanych wyników dla określonych sektorów/okresów przedstawiają tabele 1 oraz 2.

Zgodnie z wynikami przedstawionymi w tabeli 2 poziom fluktuacji TEC podlega większym zmianom w dziedzinie UT. Najbardziej intensywne zmiany są obserwowane na 80° szerokości po stronie dziennej. Uśredniona wartość zmian pomiędzy godziną 11:00 oraz 13:00 UT wynosi 0.22 TECU/min i jest porównywalna z absolutnym poziomem fluktuacji TEC po stronie nocnej. Warto zauważyć, że wartości 0.22 TECU/min and 0.13 TECU/min wyrażają gwałtowny wzrost oraz spadek zmienności jonosfery. Konsekwencją tych zmian jest także wysoka dynamika w dziedzinie MLT na poziomie 0.15 TECU/min. Wyniki dla 75° po stronie dziennej są zniekształcone przez kilka dni zaburzonych. Po ich eliminacji zmiany dla spokojnej jonosfery są na poziomie 0.005 TECU/min. W przypadku strony nocnej różnice pomiędzy sektorami MLT są praktycznie takie same dla obu analizowanych szerokości i wynoszą odpowiednio 0.04 TECU/min oraz 0.06 TECU/min. Zmiany w dziedzinie UT dla 75° są najwyższymi obserwowanymi po tej stronie i są 2-3 krotnie wyższe niż te dla magnetycznego czasu lokalnego.

Tab.1 Sektory MLT oraz okresy UT użyte do określenia poziomu fluktuacji TEC (źródło **1.B2**).

Dziedzina MLT				
	I sektor MLT	II sektor MLT	III sektor MLT	okres UT
strona dzienna	10h±1	12h±1	14h±1	13h±1
strona nocna	22h±1	0h±1	2h±1	1h±1

Dziedzina UT				
	I okres UT	II okres UT	III okres UT	sektor MLT
strona dzienna	11h±1	13h±1	15h±1	12h±1
strona nocna	23h±1	1h±1	3h±1	0h±1

Tab.2 Uśrednione wartości absolutne różnic parametru ROTI (źródło **1.B2**).

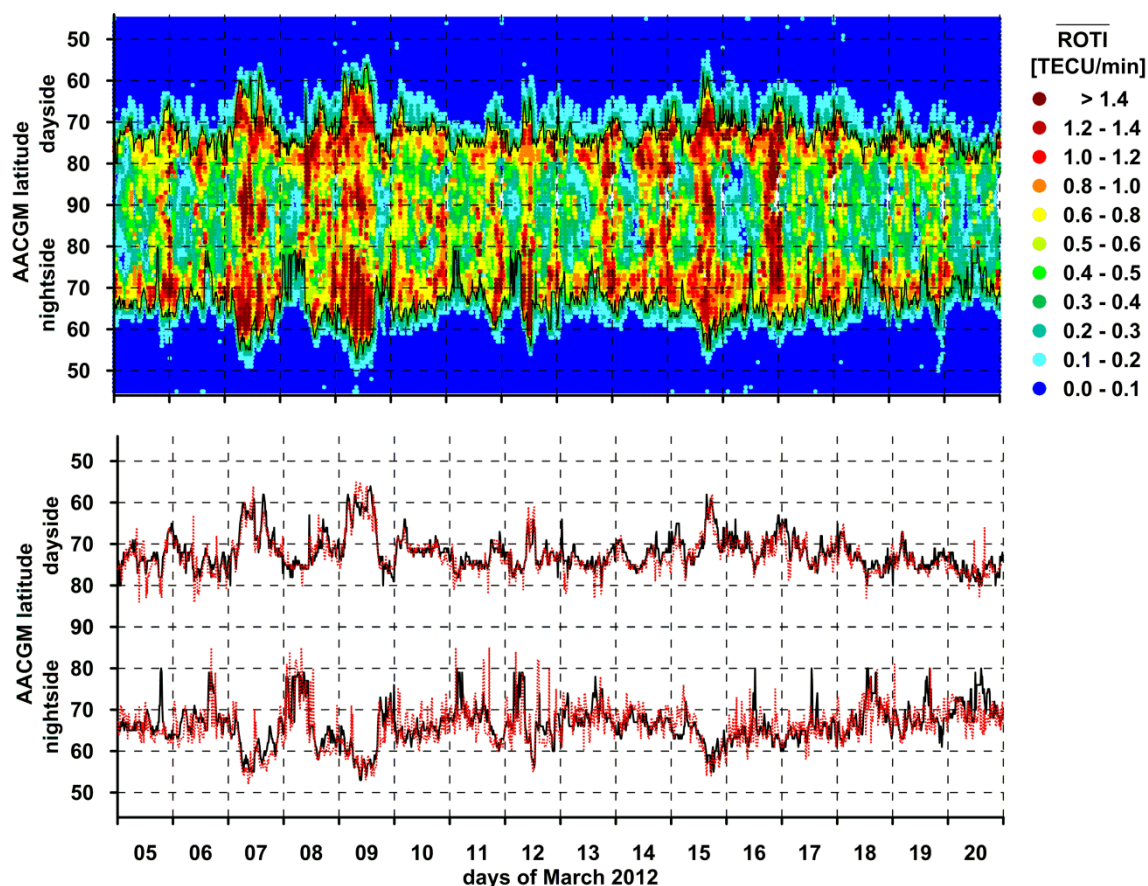
MLT	strona dzienna		strona nocna	
	10h-12h	12h-14h	22h-0h	0h-2h
75°	0.02	0.02	0.04	0.06
80°	0.05	0.15	0.03	0.06

UT	strona dzienna		strona nocna	
	11h-13h	13h-15h	23h-1h	1h-3h
75°	0.04	0.03	0.10	0.10
80°	0.22	0.13	0.06	0.06

Rozpatrując powyższe wyniki trzeba zaznaczyć, że większość analizowanych dni była spokojna. Szczegółowe badania przedstawione w pracy **1.B2** dowiodły jednak, że czasowa dynamika zmian fluktuacji TEC w okresach zaburzonych jest bardzo wysoka, podczas gdy warunki w sąsiednich sektorach MLT są zbliżone. Fakt ten pozwala aproksymować zmienność jonosfery dla obszarów owalu pozbawionych danych pomiarowych przy założeniu znajomości przybliżonego kształtu tego zjawiska. W pracy **1.B7** zaadoptowano do tego celu model opracowany przez Holzwortha i Menga (1975), dostępny pod adresem: https://ccmc.gsfc.nasa.gov/pub/modelweb/ionospheric/auroral_oval/feldstein_holzworth. Wstępnym krokiem rozwiązania było znalezienie owalu najlepiej odzwierciedlającego dane rzeczywiste z wykorzystaniem jego zewnętrznej granicy. Jako wskaźnika tego parametru w danych pomiarowych przyjęto najniższą szerokość z uśrednioną wartością ROTI > 0.3 TECU/min. Znając najlepiej wpasowany model możliwa była konwersja obserwacji w dziedzinie MLT do osi północ-południe. Ostatnim krokiem było określenie średnich wartości ROTI w 15-minutowych interwałach dla dwustopniowych pasów szerokości geomagnetycznej. W pracy tej wykorzystano wysokościowo skorygowane współrzędne geomagnetyczne (AACGM) wyznaczone zgodnie z metodologią zaproponowaną przez Shepherdę (2014).

Rysunek 6 przedstawia wyniki dla okresu 5-20 marca 2012 r. obejmującego cztery burze geomagnetyczne, odpowiednio w dniach 7, 8-9, 11-12 oraz 15 marca. Pierwszym wyraźnie zobrazowanym efektem jest dobrze znana asymetria owalu. W okresach

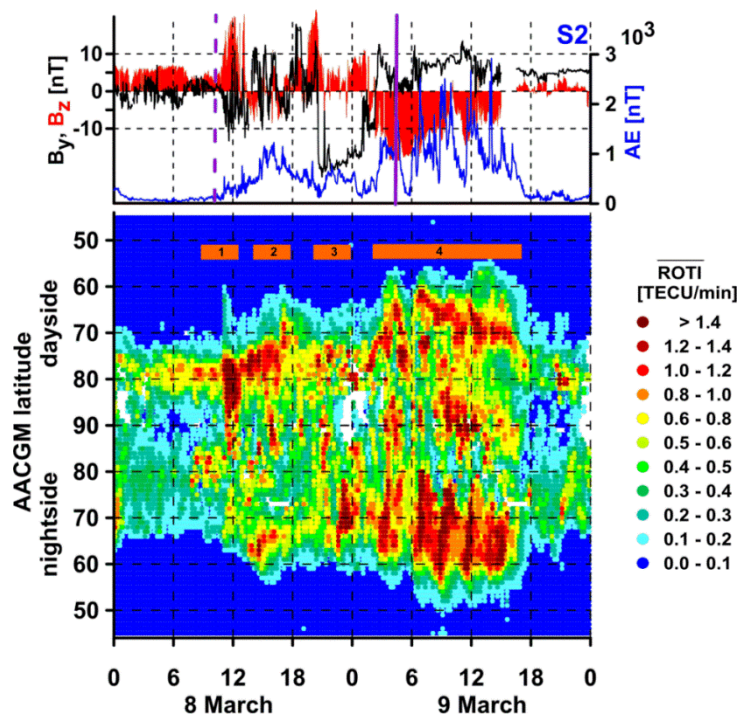
niskiej aktywności geomagnetycznej zewnętrzna granica analizowanego zjawiska jest obserwowana na 75° and 67° szerokości odpowiednio po stronie dziennej oraz nocnej. Wszystkie zaburzone dni charakteryzowały się rozszerzeniem owalu na średnie szerokości oraz wzrostem fluktuacji TEC. Uzyskane wyniki zasugerowały również, że tak przetworzony parametr ROTI może być wykorzystany, jako wskaźnik dynamicznych zmian zewnętrznej granicy owalu. Do walidacji tego parametru zostały wykorzystane dane gęstości prądu w jonosferze pozyskane z projektu AMPERE (*Active Magnetosphere and Planetary Electrodynamics Response Experiment* - <http://ampere.jhuapl.edu/>).



Rys.6 Uśrednione wartości ROTI w okresie 5-20 marca 2012 r. (górny panel). Czarna linia odpowiada zewnętrznej granicy owalu przy założeniu średniego ROTI > 0.3 TECU/min. Dolny panel przedstawia porównanie tej granicy dla danych GNSS (czarna linia) oraz pozyskanych z projektu AMPERE (czerwona linia) (źródło **1.B7**).

Zestawienie wyników dla obu technik potwierdzające ich dobrą zgodność przedstawia dolny panel rysunku 6. Współczynniki korelacji dla szeregów czasowych po stronie dziennej oraz nocnej równają się odpowiednio 0.83 oraz 0.64. Niższa wartość w drugim przypadku jest wynikiem większych zmian zewnętrznej granicy owalu dla danych AMPERE oraz gorszej zgodności podczas okresów dodatniej polaryzacji IMF Bz. Wpływ drugiego z wymienionych czynników związany jest z niskim poziomem fluktuacji TEC, który z kolei utrudnia dokładne określenie zewnętrznej granicy. Określenie wewnętrznego skraju jest ograniczane przez małe i średnie zaburzenia jonosferyczne towarzyszące łatom polarnym.

Rysunek 7 przedstawia szczegóły zmian owalu oraz fluktuacji TEC dla wybranej burzy (8-9 marca). Zdarzenie to było poprzedzone kilkugodzinnym okresem dodatniej polaryzacji IMF Bz, w którym umiarkowana aktywność jonosferyczna jest obserwowana tylko po stronie dziennej (76° - 79°). Gwałtowny wzrost wartości ROTI do poziomu 1.7 TECU/min (#1) w kolejnych godzinach związany był z obecnością łuku transpolarnego. Występowanie tego zaburzenia potwierdziły dane scyntylacyjne oraz zdjęcia obszarów zorzowych (Prirył i in. 2015). Następnie można obserwować powolną ekspansję owalu po stronie dziennej skorelowaną ze wzrostem indeksu AE (#2). W przypadku tym odpowiedź strony nocnej była raczej niespotykana, tj. silne fluktuacje TEC obejmowały wąskie pasmo szerokości. Efekt ten był prawdopodobnie wynikiem drugiego łuku jonosferycznego w obszarze owalu.



Rys.7 Uśrednione wartości ROTI po obu stronach jonosfery w okresie 8-9 marca 2012 r. Górny panel przedstawia zmiany indeksów geomagnetycznych (źródło 1.B7).

Podwyższone wartości ROTI w okresie (#3) obserwowane są na całym obszarze okołobiegunowym, co sugeruje, że ich źródłem były łąty polarne. Wyniki dla dnia 9 marca demonstrują silną zależność fluktuacji TEC od intensywności słonecznego promieniowania korpuskularnego, przedstawionego z użyciem indeksu AE, podczas południowo zorientowanego IMF (#4). W rezultacie parametr ROTI po stronie nocnej przekraczał nawet 2 TECU/min. W okresie tym aktywność jonosfery po stronie dziennej była słabsza i znacznie mniej dynamiczna.

Wyniki uzyskane z użyciem zaproponowanego algorytmu są w pełni zgodne z obecną wiedzą o owalu zorzowym i potwierdzają jego zależność od pogody kosmicznej. Zgodnie z nimi zachowanie się owalu oraz wzrost intensywności zaburzeń jonosferycznych pozostaje w ścisłej relacji z orientacją IMF oraz promieniowaniem niesionym przez

wiatr słoneczny. W odróżnieniu od wcześniejszych analiz przedstawiona metodologia umożliwia monitorowanie krótkookresowych zmian tego zjawiska, co stanowi istotny krok naprzód. Pomimo że rezultaty przedstawione w pracy **1.B7** wymagają dalszej walidacji, pozwalają one rozpatrywać obserwacje GNSS jako obiecujące wsparcie dla innych technik wykorzystywanych w analizach owalu zorzowego.

4.3.3. Badania nad wpływem jonosfery na pozycjonowanie GNSS (publikacje **1.B3**, **1.B4**, **1.B5**)

W ostatnim latach względne pozycjonowanie stało się głównym zastosowaniem obserwacji GNSS. W konsekwencji jednym z kluczowych celów badań stały się algorytmy przystosowane do szybkiego wyznaczania pozycji. Niestety ich efektywność jest znacząco pogarszana przez zaburzenia jonosferyczne. Wpływ ten nie może być wyeliminowany poprzez tworzenie obserwacji różnicowych, a jedynie łagodzony dzięki odpowiedniemu modelowi funkcjonalnemu. Jako najbardziej skuteczny algorytm uważany jest model tzw. wagowanej jonosfery oparty na geometrii układu (*geometry-based ionosphere weighted model*). Tym niemniej jego skuteczność również zależy od warunków jonosferycznych.

Aby spróbować rozwiązać ten problem zaproponowałem podejście bazujące w teorii na poprawkach wykorzystujących równanie ROT (3). Na tej podstawie we współpracy opracowano algorytm, oznaczony w publikacjach **1.B3** oraz **1.B4** jako RTC, pozwalający na eliminację fluktuacji w górnych warstwach atmosfery w kolejnych sekwencjach pomiarów. Zgodnie z równaniem ROT odpowiada zmianie opóźnienia jonosferycznego pomiędzy dwoma epokami $(\Delta I_{k,4}^i)_{t_1-t_2}$ przy założeniu braku uślizgów fazy. W rezultacie możliwe jest także wyznaczenie czasowej zmiany wpływu jonosfery odpowiadającej bazowym sygnałom na pierwszej i drugiej częstotliwości:

$$(\Delta I_{k,1}^i)_{t_1-t_2} = \frac{f_2^2}{f_2^2 - f_1^2} (\Delta I_{k,4}^i)_{t_1-t_2} \quad (4)$$

$$(\Delta I_{k,2}^i)_{t_1-t_2} = \frac{f_1^2}{f_2^2 - f_1^2} (\Delta I_{k,4}^i)_{t_1-t_2} \quad (5)$$

Zastosowanie poprawek do obserwacji pomierzonych w czasie t_2 zrównuje opóźnienia jonosferyczne w obydwu epokach. Powtarzając ten krok dla wszystkich obserwacji w sesji otrzymujemy szereg danych pomiarowych obarczonych stałym wpływem jonosfery. Tą samą właściwość posiadają automatycznie obserwacje zróżnicowane, co pozwala na estymację tego parametru dla całej sesji. Trzeba zaznaczyć, że algorytm nie eliminuje całości opóźnienia, a jedynie jego czasowe fluktuacje. Skuteczność takiej modyfikacji jest ściśle związana z wielkością opóźnienia jonosferycznego na epokę referencyjną, przy czym warto zauważyć, że może być ona inna dla każdego satelity. Pozwala to na bardziej efektywną redukcję opóźnienia oraz poprawę wyznaczania nieoznaczoności. Uwzględniając fakt, że większość masywnych struktur jonosferycznych

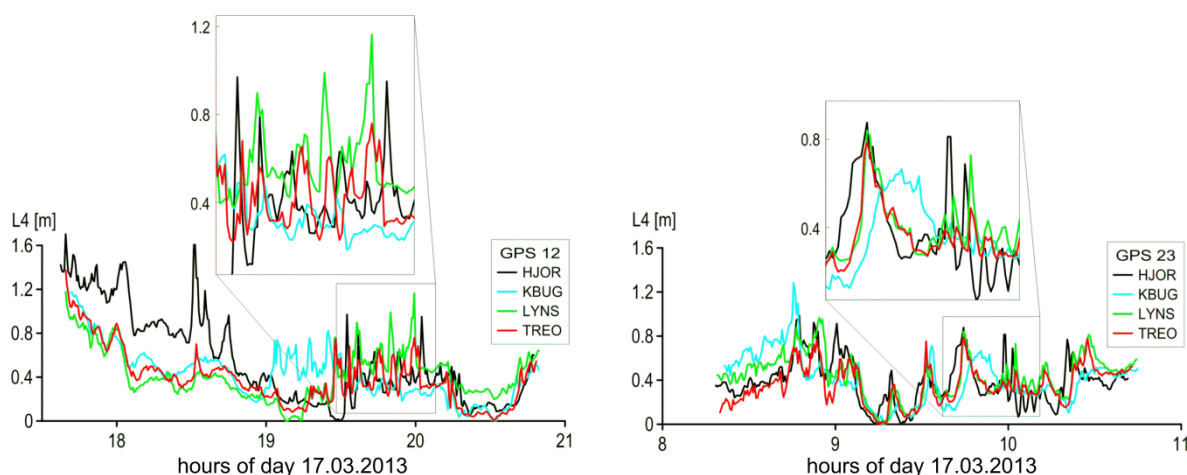
charakteryzuje się wzrostem TEC, jako epokę referencyjną przyjęto tą z minimalną wartością $L_{k,4}^i$, co może być to utożsamiane z poziomem spokojnej jonosfery.

Pierwsze testy opisanego powyżej algorytmu zostały przeprowadzone dla wysokich szerokości geomagnetycznych (**1.B4**, praca została opublikowana około roku po akceptacji) i obejmowały one dwa dni różniące się aktywnością jonosfery. W eksperymencie zostały wykorzystane obserwacje GPS z czterech permanentnych stacji położonych na Grenlandii (Rys.8). KBUG, TREO oraz HJOR służyły jako stacje referencyjne, a LYNS symulowała pozycję wyznaczaną. Porównując wyniki fluktuacji TEC (Rys.3) z lokalizacją sieci testowej, można przyjąć, że pierwszy z analizowanych dni (6 września 2009 r.) był spokojny, natomiast drugi (17 marca 2013 r.) cechował się występowaniem silnych zaburzeń jonosferycznych.



Rys.8 Sieć testowa (źródło **1.B4**).

Aby zobrazować dynamikę jonosfery w okresie zaburzonym, rysunek 9 przedstawia wypoziomowane szeregi czasowe kombinacji $L_{k,4}^i$ dla wybranych satelitów. Jak można zaobserwować znaczące różnice pomiędzy opóźnieniami jonosferycznymi dla poszczególnych stacji występują dla całych przedstawionych okresów. Obserwowane rozbieżności można podzielić na dwojaki rodzaj. Pierwsza ich typ może być identyfikowany jako systematyczne przesunięcie szeregów, czego przykładem mogą być dane dla stacji HJOR pomiędzy 17:40-18:40 UT. Drugi natomiast związany jest z występowaniem mniejszych zaburzeń wyraźnie widocznych w powiększonej skali. W przedstawionym przykładzie oba efekty osiągają nawet do 0.5m, co praktycznie uniemożliwia poprawne wyznaczenie nieoznaczoności. Warto zaznaczyć, że prezentowane rozbieżności odnoszą się do oryginalnych obserwacji, a ich różnicowanie spowoduje wzrost wartości parametru jonosferycznego.



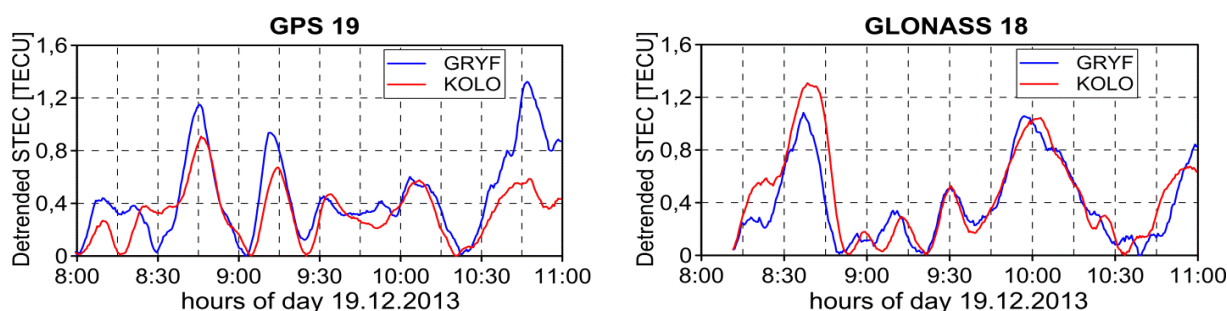
Rys.9 Porównanie szeregów kombinacji $L_{k,4}^i$ dla wybranych satelitów, 17.03.2013 (źródło **1.B4**).

Testy szybkiego pozycjonowania zostały przeprowadzone w 10-minutowych sesjach i obejmowały dwukrotne wyznaczenie pozycji, tj. z wykorzystaniem standardowego podejścia wagowanej jonosfery oraz ze wsparciem tego modelu poprawkami RTC. W przypadku niskiej aktywności jonosfery oba algorytmy dostarczyły praktycznie te same wyniki z procentowym wskaźnikiem rozwiązanych nieoznaczoności ASR (*ambiguity succes rate*) na poziomie 93%. Wysoka aktywność jonosfery w okresie burzy geomagnetycznej spowodowała dramatyczny spadek poprawnie wyznaczonych nieoznaczoności do około 6%. Wskaźnik ten dobitnie pokazuje możliwy wpływ okołobiegunowych zaburzeń jonosferycznych na pozycjonowanie GNSS. Zastosowanie poprawek RTC skutkowało ponad 10-krotnym wzrostem współczynnika ASR do około 59%. Precyzja wyznaczanych współrzędnych poziomych była na zbliżonym poziomie dla obu wariantów pozycjonowania. W przypadku składowej wysokościowej zaobserwowano $\sim 1\text{cm}$ przesunięcie oraz gorszą precyzję dla poprawek RTC. Trzeba jednak zauważyć, że wskaźniki te były wyznaczane tylko dla sesji z rozwiązanymi nieoznaczonościami.

Obiecujące wyniki pozycjonowania GNSS wspartego przez poprawki RTC skłoniły do testów algorytmu dla średnich szerokości (**1.B3**). Obszar jest charakteryzowany przez występowaniem znacznie słabszych nieregularności, z których najczęstszymi są średnio-skalowe wędrujące zaburzenia jonosferyczne - MSTID (*medium scale traveling ionospheric disturbances*; Otsuka i in. 2013, Oinats i in. 2015). Pomimo niskiego stopnia wzrostu koncentracji elektronów, nieregularności te mogą także wpłynąć na wyniki względnego pozycjonowania (Hernández Pajares i in. 2006, Lejeune i in. 2012).

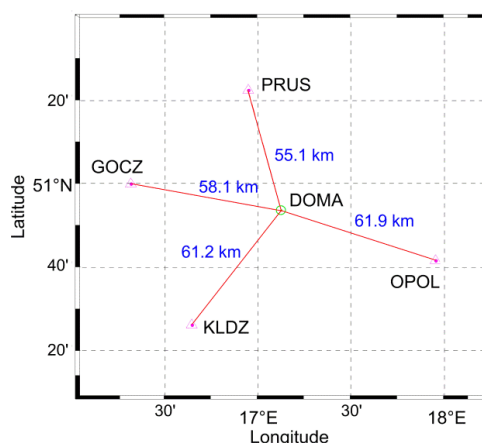
Wstępnym krokiem badań przedstawionych w pracy **1.B3** było zobrazowanie aktywności jonosferycznej na średnich szerokościach w oparciu o dane sieci TPI NETpro. Ze względu na niską amplitudę zaburzeń cel ten został zrealizowany z wykorzystaniem względnych wartości STEC. Zostały one pozyskane z szeregów czasowych kombinacji $L_{k,4}^i$ poprzez eliminację długookresowego trendu (parametr ten

oraz jego zastosowanie są szczegółowo opisane w punkcie 4.3.4.) Rysunek 10 przedstawia struktury MSTID w wybranych szeregach danych (GPS 19 oraz Glonass 18) dla dwóch sąsiednich stacji GRYF oraz KOLO. Wzrost koncentracji elektronów wzdłuż propagacji sygnału jest w tym przypadku wyskalowany w jednostkach TECU (1 TECU w odniesieniu do kombinacji $L_{k,4}^i$ odpowiada w przybliżeniu 0.1m). Porównanie rysunków 9 oraz 10 obrazuje różnicę w strukturach jonosferycznych obserwowanych na wysokich oraz średnich szerokościach. W tym drugim przypadku wzrost STEC jest około 10 razy mniejszy oraz nie tak dynamiczny. Ponadto struktury obserwowane na rysunku 10 są zbliżone dla obu stacji. Efekt ten jest niezwykle istotny dla pozycjonowania GNSS, ponieważ wspólna część opóźnienia jonosferycznego jest eliminowana na etapie tworzenia obserwacji różnicowych.



Rys.10 Porównanie względnych zmian STEC dla stacji GRYF oraz KOLO (źródło **1.B3**).

Testy pozycjonowania zostały wykonane z wykorzystaniem sieci składającej się z 5 stacji przedstawionej na rysunku 11 (4 z nich: DOMA, GOCZ, PRUS, OPOL należą do sieci TPI NETpro a ostatnia KLDZ jest częścią systemu ASG-EUPOS). W eksperymencie wyznaczone były współrzędne stacji centralnej - DOMA, natomiast pozostałe odbiorniki były stacjami referencyjnymi.



Rys.11 Sieć testowa (źródło **1.B3**).

Punktem początkowym badań była analiza wpływu MSTID na podwójnie zróżnicowane opóźnienia jonosferyczne. Potwierdziła ona wzrost tego parametru do około 0.3 m dla podwyższonej aktywności jonosfery, podczas gdy dla warunków spokojnych był on

zwykle poniżej 0.1 m. Jak można było oczekiwać najwyższe wartości były obserwowane dla pomiarów charakteryzujących się niską elewacją. Testy pozycjonowania zostały przeprowadzone w 5-minutowych interwałach i obejmowały trzy dni (19-21 grudnia 2013). Każda sesja została opracowana dwukrotnie wykorzystując standardowy model wagowanej jonosfery (IW) oraz jego modyfikację wspartą poprawkami RTC. Zestawienie wyników pozycjonowania przedstawia tabela 3. Zaproponowany algorytm poprawił precyzję współrzędnych poziomych zmniejszając ich odchylenie standardowe o 0.2-0.3 cm. W przypadku wysokości poprawki RTC spowodowały wzrost precyzji blisko o połowę oraz redukcję średniej odchyłki od wartości prawdziwej o 0.5 cm.

Tab. 3 Statystyka pozycjonowania dla poszczególnych dni (źródło **1.B3**).

dzień	strategia	N [cm]		E [cm]		U [cm]	
		dN	σ N	dE	σ E	dU	σ U
19.12.2013	IW	0.1	1.0	-0.1	0.7	2.9	4.2
	RTC	0.1	0.7	0.0	0.4	2.3	2.4
20.12.2013	IW	0.0	0.9	0.0	0.7	3.2	4.5
	RTC	0.0	0.7	0.1	0.4	2.8	3.0
21.12.2013	IW	0.0	0.9	0.0	0.6	2.9	3.0
	RTC	0.0	0.7	-0.1	0.4	2.4	1.1

Znacznie bardziej interesujące były wyniki współczynnika ASR. Aby uwypuklić różnice w tej dziedzinie dla obu algorytmów, dni testowe zostały podzielone na trzy okresy: 0:00-7:00UT, 7:00-15:00UT oraz 15:00-24:00UT. Dwa z nich (pierwszy i ostatni) odpowiadały niezaburzonej jonosferze, natomiast środkowy był obciążony występowaniem struktur MSTID. Dla jonosfery spokojnej osiągi obydwu algorytmów były na tym samym, wysokim poziomie. Wyniki uzyskane dla okresów zaburzonych wyraźnie pokazują różnice w rozwiązywaniu nieoznaczoności. ASR dla modelu standardowego wahało się pomiędzy 56% a 65%, co potwierdza niską niezawodność takiego podejścia w okresach występowania MSTID. Zastosowanie algorytmu RTC podniosło współczynnik ASR do 90%.

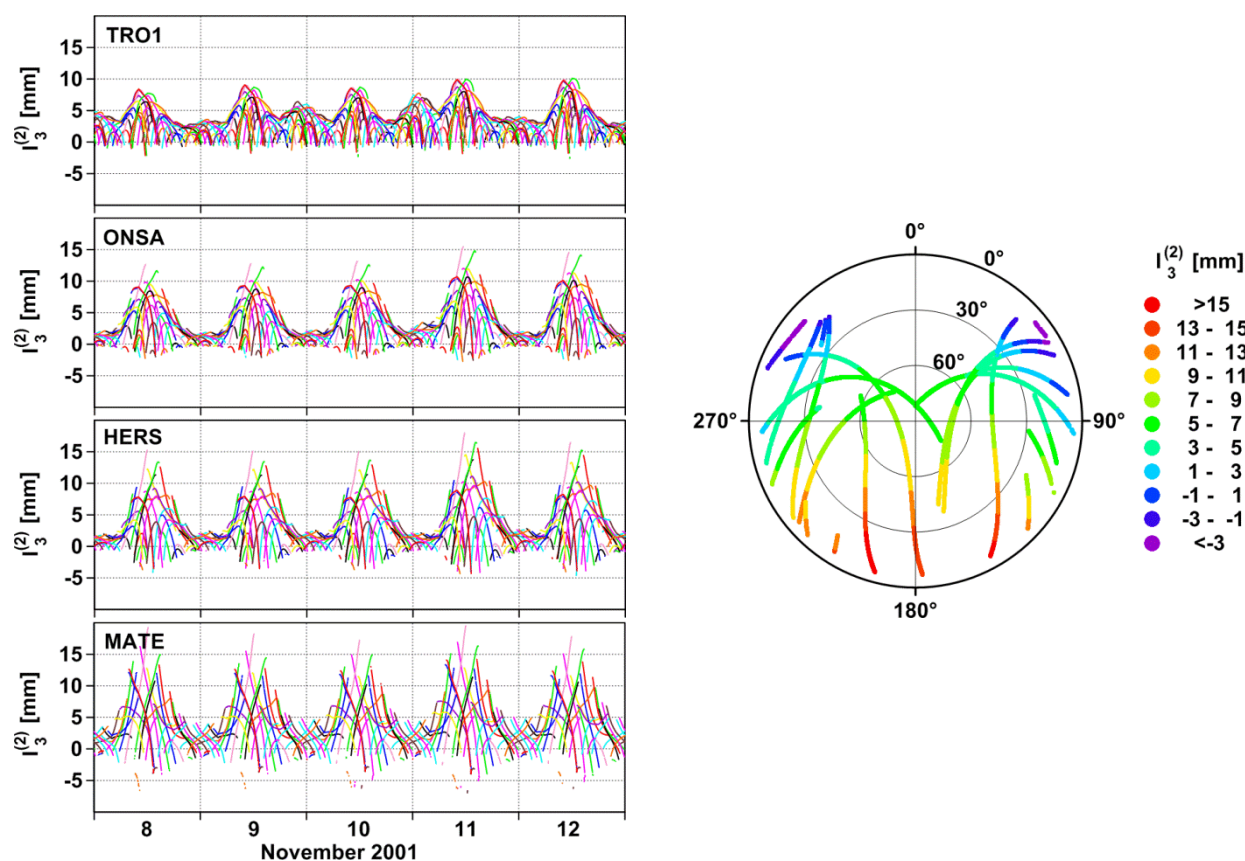
Tab. 4 Wskaźnik rozwiązanych nieoznaczoności w poszczególnych okresach (źródło **1.B3**).

dzień	strategia	ASR [%]		
		00-07 UTC	07-15 UTC	15-24 UTC
19.12.2013	IW	97	56	99
	RTC	97	88	98
20.12.2013	IW	99	65	100
	RTC	99	89	100
21.12.2013	IW	100	57	99
	RTC	98	90	100

Ostatnia praca w tym temacie dotyczyła wpływu wyrazów wyższego rzędu refrakcji jonosferycznej na pozycjonowanie GNSS (**1.B5**) i była wynikiem aktywności habilitanta

w grupie roboczej *Ionosphere and Troposphere Impact on GNSS Positioning* pracującej pod auspicjami Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (IAG). Aby oszacować ten wpływ jonosfery na rozwiązanie PPP wyselekcjonowano 4 europejskie stacje: MATE, HERS, ONSA oraz TRO1. Ich szerokości, skutkujące różnym poziomem koncentracji elektronów w jonosferze, mieściły się w przedziale od 40° do 70°. Badania obejmowały okres 8-12 listopada 2001 odpowiadający wysokiej aktywności słonecznej. Wybór ten zapewnił możliwie najwyższe wartości wyrazów wyższych rzędów.

Wstępna część pracy polegała na analizie wyrazów jonosferycznych drugiego i trzeciego rzędu dla wszystkich obserwacji wybranych stacji. Krok ten został wykonany z wykorzystaniem oprogramowania RINEX_HO (Marques i in. 2011) dostępnego pod adresem https://www.ngs.noaa.gov/gps-toolbox/RINEX_HO.html. Przykładowe jego wyniki dla wyrazów drugiego rzędu, odniesionych do kombinacji liniowej *ionosphere-free* ($L_{k,3}^i$), zostały przedstawione na rysunku 12. Wartości te mogą być zarówno dodatnie jak i ujemne, co związane jest z ich zależnością od kąta zawartego między liniami pola magnetycznego oraz kierunkiem propagacji sygnału GNSS.



Rys.12 Zmiany wyrazów drugiego rzędu refrakcji jonosferycznej odniesione do kombinacji ionosphere-free oraz przykład ich zależności od orientacji sygnału (prawy panel). W drugim przypadku wykorzystano dane ze stacji MATE, 9:00-15:00, 8 listopada 2001 r. (źródło **1.B5**).

Bazując na rozkładzie przedstawionym na prawym panelu (Rys.12) można oczekiwać, że wyniki pozycjonowania z uwzględnieniem wyrazu drugiego rzędu będą

charakteryzowały się dodatnim przesunięciem dla szerokości oraz ujemnym dla wysokości. Zakładając symetryczną dystrybucję satelitów w odniesieniu do osi N-S, estymowana długość nie powinna się zmienić. Jak pokazano w pracy odpowiednie wyrazy trzeciego rzędu były około rząd wielkości mniejsze, a podczas godzin nocnych nie przekraczały kilku dziesiątych milimetra. Te ostatnie wartości są poniżej poziomu szumu obserwacji fazowych i prawdopodobnie mogą być pomijane nawet w przypadku pozycjonowania o najwyższej dokładności. Dla godzin dziennych wyrazy trzeciego rzędu mieszczą się w przedziale od 0.5 do 3.5 mm odpowiednio dla pomiarów o wysokiej i niskiej elewacji.

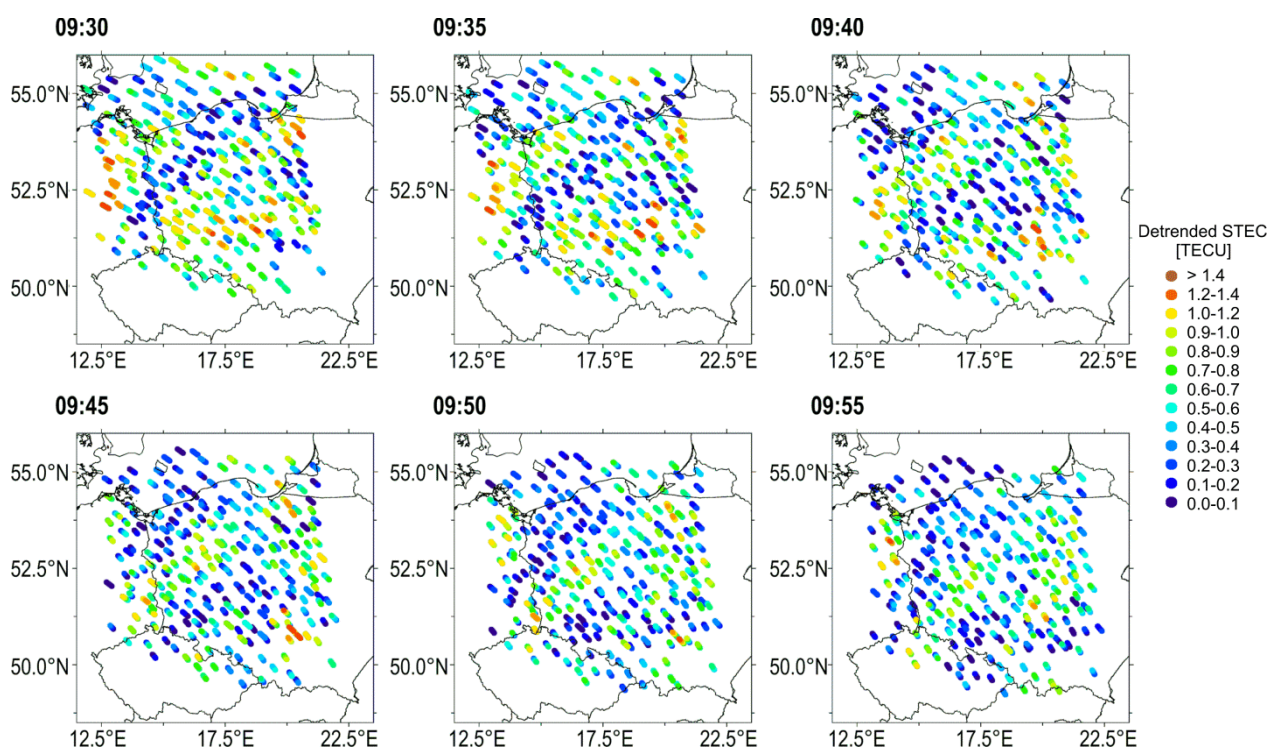
Testy pozycjonowania zostały wykonane z wykorzystaniem najnowszej wersji oprogramowania PPP, opracowanego w kanadyjskiej agencji NRCan (*National Resources Canada*), umożliwiającego rozwiązanie nieoznaczoności. Poza standardową metodologią PPP przeprowadzone badania obejmowały także alternatywne podejście z jednoczesną estymacją wyrazów pierwszego i drugiego rzędu refrakcji jonosferycznej. Otrzymane wyniki potwierdziły, że ściśle modelowanie wyższych rzędów refrakcji poprawia rozwiązanie PPP. Różnice dochodziły do 3 mm dla szerokości oraz około 1.5 mm dla składowej wysokościowej, a ich kierunki były zgodne z teoretycznymi rozważaniami. Trzeba przy tym zaznaczyć, że efekt ten był obserwowany tylko w godzinach dziennych charakteryzujących się wysoką koncentracją elektronów. Jednoczesne estymowanie współrzędnych oraz parametrów jonosferycznych, bez uwzględnienia opóźnień sprzętowych (DCB), skutkowało systematycznymi przesunięciami w otrzymywanych wynikach. W analizowanym przypadku przewyższały one wpływ wyrazów wyższego rzędu. Efekt ten może zostać wyeliminowany przez dodatkowe warunki nałożone na parametry jonosferyczne z wykorzystaniem globalnych map jonosfery.

4.3.4. Detekcja zaburzeń jonosferycznych z wykorzystaniem względnych wartości STEC (publikacje 1.B3, 1.B6, 1.B7)

Przedstawiony powyżej parametr ROTI jest uznanym wskaźnikiem wysokiej aktywności jonosferycznej, ale ma on też swoje ograniczenia. Po pierwsze jest on mało efektywny dla detekcji struktur charakteryzujących się niskim gradientem takich jak MSTID. Po drugie określa jedynie średni poziom zmienności jonosfery, a w konsekwencji nie może być użyty do oszacowania wzrostu koncentracji elektronów dla poszczególnych struktur. Ze względu na wymienione ograniczenia habilitant zaproponował by do detekcji zaburzeń wykorzystać względne wartości STEC. Parametr ten dostarcza informacji o wzroście koncentracji elektronów na daną epokę w odniesieniu do przyjętego poziomu referencyjnego. Jego wyznaczanie może być utożsamiane jako usunięcie długookresowego trendu związanego z dobowymi zmianami jonosfery oraz wpływem kąta elewacji.

Wstępny algorytm umożliwiający wyznaczenie względnych wartości STEC został przedstawiony w badaniach nad strukturami MSTID (1.B3). W tym przypadku określenie długookresowego trendu w szeregach $L_{k,4}^i$ zostało wykonane przy użyciu iteracyjnego wpasowania wielomianu trzeciego stopnia w następujących krokach. Na początku, szukane współczynniki były określane dla łuku danych o elewacji większej niż 30° . W kolejnych iteracjach tylko punkty poniżej funkcji otrzymanej w poprzednim kroku były wykorzystywane. Ostatecznie finalny wielomian był odejmowany, aby usunąć wolnozmienny trend. Zaproponowany algorytm pozwolił na identyfikację struktur MSTID przy małych zniekształceniach wprowadzanych do szeregów $L_{k,4}^i$. Podejście to jest tożsame z filtrowaniem górnoprzepustowym, ale pozwala na określenie poziomu referencyjnego. Trzeba zaznaczyć, że struktury w otrzymanych szeregach czasowych są wciąż zależne od kąta elewacji i odpowiadają zmianom warunków jonosferycznych w kierunku skośnym.

W pracy 1.B3 względne wartości STEC zostały wykorzystane do detekcji struktur MSTID nad obszarem Polski. Cel ten zrealizowano z użyciem danych pochodzących z sieci TPI NETpro. Przykładowe wyniki dla okresu 09:30-10:00 UT, 19 grudnia 2013 r., podzielonego na 5 minutowe sesje, są przedstawione na rysunku 13. W przypadku tym wykorzystano dane dwóch satelitów (GPS 18 oraz Glonass 19) charakteryzujących się najwyższym kątem elewacji. Podejście takie zawęża monitorowany obszar, ale pozwala na bardziej dokładne zobrazowanie zaburzeń.



Rys.13 Występowanie zaburzeń jonosferycznych nad obszarem Polski opracowane z wykorzystaniem danych satelitów: GPS 18 oraz Glonass 19 (źródło 1.B3).

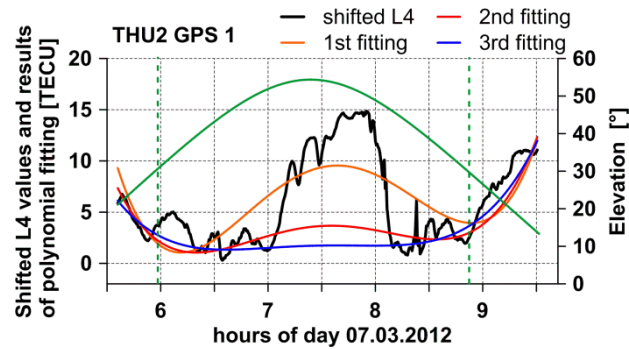
Rysunek 13 demonstruje ruch nieregularności w kierunku południowo-wschodnim, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami statystycznymi dotyczącymi występowania MSTID (Hernández-Pajares i in. 2012, Otsuka i in. 2013). Dwa takie zaburzenia można obserwować nad zachodnią i południową Polską. Nad pozostałym obszarem trudno jest rozpoznać MSTID, co prawdopodobnie związane jest z kierunkiem przemieszczania się struktur. W analizowanym przypadku maksymalne wzmocnienie STEC nieznacznie przekraczało 1 TECU. Pomimo bardzo małej amplitudy ruch zaburzeń jest wyraźnie identyfikowalny.

Praca **1.B7** (napisana przed **1.B6**) przedstawia wstępne badania nad zastosowaniem względnych wartości STEC do monitorowania łat polarnych (*polar patches*). Poza analizą występowania tych struktur w okresie 4 burz geomagnetycznych, zawiera ona także porównanie nowego parametru z indeksem ROTI oraz jego walidację. Ze względu na charakterystykę analizowanych struktur algorytm wyznaczania względnych wartości STEC został częściowo zmodyfikowany. Proces odbywał zgodnie z trzystopniową procedurą:

1. Wypoziomowanie szeregów czasowych $L_{k,4}^i$ tak aby ustawić ich minimalne wartości na 0.2 TECU.
2. Wstępne wpasowanie wielomianu 4 stopnia.
3. Jeśli maksymalna różnica pomiędzy wartościami szeregu a wielomianem jest mniejsza niż 5 TECU, wstępne wyniki są traktowane jako ostateczne. W przeciwnym przypadku, współczynniki wielomianu 4 stopnia są estymowane w dwustopniowym iteracyjnym wpasowaniu z pominięciem epok dla których wspomniana różnica jest większa niż 3 TECU. Etap ten jest realizowany z wagami równymi $1/L_{k,4}^i$.

Pierwszy z kroków związany jest z wpasowaniem iteracyjnym i umożliwia szybsze dopasowanie wielomianu do wolnozmienniej składowej szeregu poprzez zastosowanie odpowiednich wag. Jeśli zmiany STEC są na niskim poziomie, przyjmuje się, że wstępny wielomian odpowiada szukanemu poziomowi referencyjnemu. W przeciwnym przypadku jest on znajdowany z użyciem dwustopniowego wpasowania iteracyjnego. Zmiana stopnia wielomianu związana jest z niższą maską elewacji (10°), która z kolei musi być zastosowana dla obszarów polarnych w celu stabilizacji całego procesu. W przypadku ostatecznych wyników zastosowano maskę 30° .

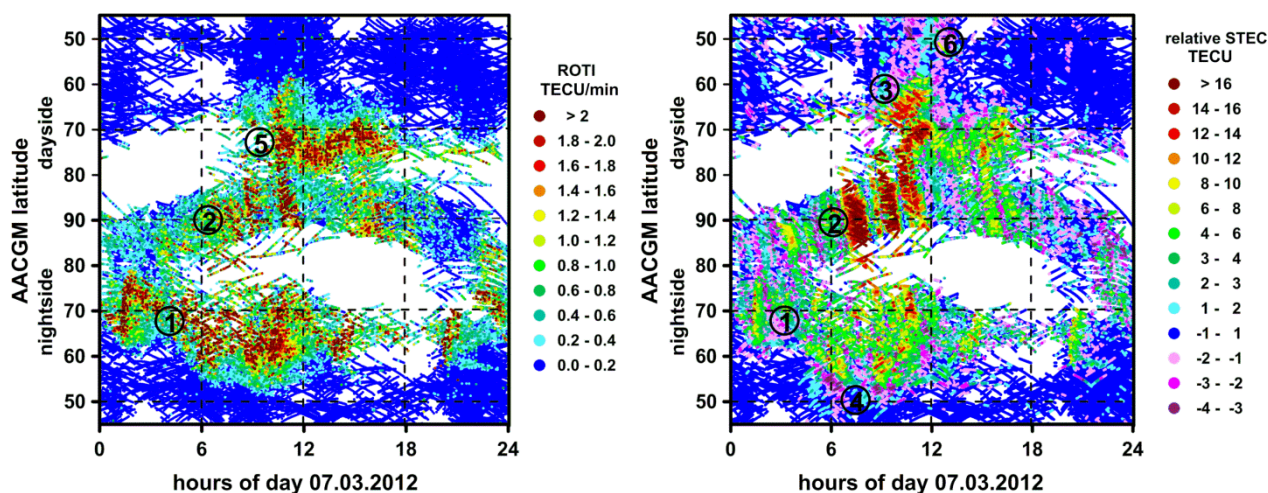
Rysunek 14 przedstawia funkcjonowanie algorytmu dla danych satelity GPS 1 zarejestrowanych przez stację THU2. Pokazuje on wyniki wpasowania uzyskane dla ekstremalnej struktury jonosferycznej o okresie ponad 1 godziny. Zgodnie z wynikami ostateczny wielomian stanowi dobrą aproksymację poziomu referencyjnego. Ujemne wartości, będące naturalną konsekwencją podejścia, zwykle w takich warunkach nie przekraczają 2 TECU. Ze względu na kulisty kształt łat polarnych wartości STEC nie mogą być konwertowane do kierunku pionowego.



Rys.14 Estymacja referencyjnego poziomu STEC z wykorzystaniem iteracyjnego wpasowania wielomianu (źródło **1.B7**).

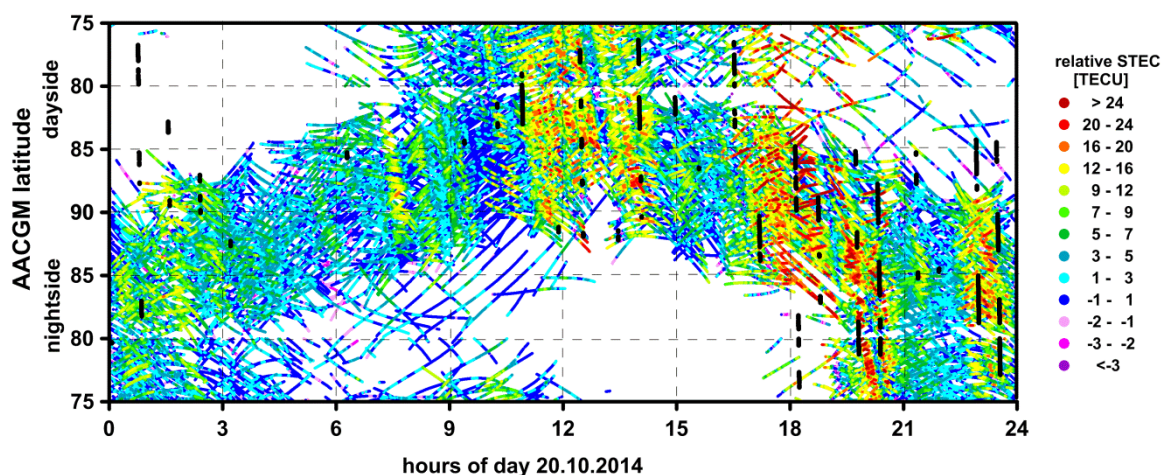
Pierwszym celem pracy **1.B7** było porównanie parametru ROTI oraz względnych wartości STEC jako źródła informacji o zaburzeniach. Różnica pomiędzy nimi jest czytelnie przedstawiona na rysunku 15 pokazującym aktywność jonosferyczną w dniu 7 marca 2012 r. Podstawą tego rysunku są obserwacje spełniające warunki: $0h \pm 3h$ i $12h \pm 3h$ MLT poniżej 80° szerokości AACGM oraz wszystkie obserwacje powyżej tego limitu. Rozróżnienie to spowodowane jest małym rozmiarem sektorów w pobliżu bieguna i zwiększa ilość dostępnych tam danych pomiarowych. Dla obserwacji powyżej 80° szerokości AACGM zostały one zrzutowane na oś północ-południe.

Zgodnie z wynikami pokazanymi na lewym panelu mapy ROTI ukazują dynamiczne zmiany owalu zorzowego podczas burzy geomagnetycznej. Drugim wyraźnie widocznym efektem jest wzrost fluktuacji TEC związany z propagacją łat polarnych. Jednakże w tym przypadku wyniki są niejednoznaczne, tj. pomiędzy 8:00 a 12:00 UT dobrze korelują z względnymi wartościami STEC, ale dla największej struktury zgodność ta jest raczej słaba. Wyniki nowego parametru dla osi północ-południe są ściśle zorientowane na detekcję łat polarnych. Jak można zaobserwować przemieszczenie się tych struktur o różnym wzmocnieniu występowało praktycznie przez cały dzień. Sugeruje to, że transport plazmy ze strony dziennej do nocnej jest w sprzyjających warunkach ciągły. Wyniki względnych wartości STEC ujawniają także inne struktury takie jak burzowe wzmocnienie gęstości plazmy - SED (*storm enhanced density*), występujące około 65° szerokości, oraz rów jonosferyczny, oznaczony jako ujemne wartości STEC przy zewnętrznej granicy owalu. Ponadto, nowy parametr pozwolił na detekcję przemieszczania się wielkoskalowych wędrujących struktur jonosferycznych - LSTID (*large scale traveling ionospheric disturbances*) opóźnionych w stosunku do początku aktywności jonosferycznej o około 2h. Skala zmian obserwowana dla tego ostatniego zjawiska jest raczej niska (± 2 TECU), ale było ono obserwowane także dla pozostałych burz w badanym okresie.



Rys.15 Zmiany parametru ROTI oraz względnych wartości STEC obserwowane po obu stronach jonosfery w dniu 7 marca 2012 r. 1 – owal zorzowy 2 – łaty polarne, 3 – burzowe wzmocnienie gęstości, 4 – rów jonosferyczny, 5 – lej polarny, 6 – wielkoskalowe wędrujące zaburzenia jonosferyczne (źródło 1.B7)

Względne wartości STEC zostały także porównane z wynikami projektu Polar Cap Products (PCP), pozyskującego informację jonosferyczną z instrumentów zainstalowanych na satelitach SWARM (<https://www.mn.uio.no/fysikk/english/research/projects/swarm/>). Do realizacji tego celu wybrano okres 18-27 października 2014 r. charakteryzujący się wysoką częstotliwością występowania łat polarnych. Rysunek 16 przedstawia przykład łącznych wyników względnych wartości STEC oraz projektu PCP dla dnia 20 października 2014. Został on wygenerowany tak samo jak rysunek 15, z tą różnicą, że na dane GNSS nałożono te z satelitów SWARM o stosunku gęstości w danym punkcie do gęstości tła (poziomu referencyjnego) wyższym niż 2.



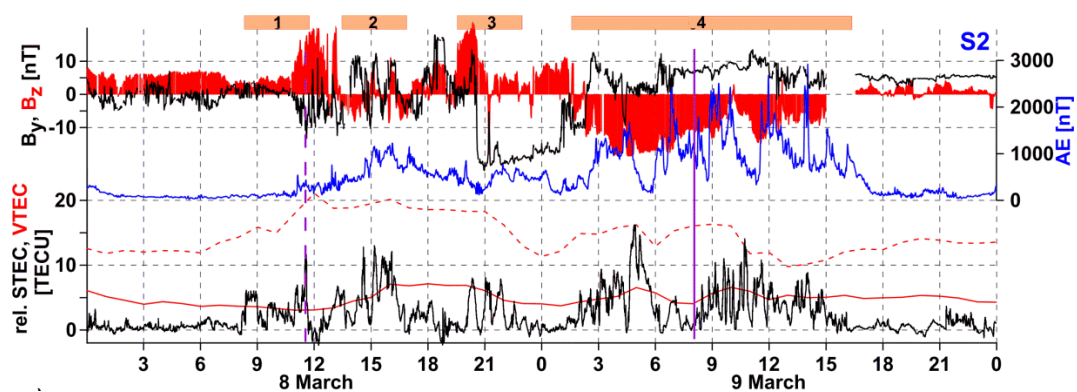
Rys. 16 Zmiany względnych wartości STEC obserwowane po obu stronach jonosfery w dniu 20 października 2014 r. Czarny kolor odpowiada strukturom w danych SWARM (źródło 1.B7).

Wyniki potwierdziły dobrą korelację pomiędzy obiema technikami, tj. struktury polarne rozpoznane z wykorzystaniem danych misji SWARM odpowiadały wysokim wartościom

względny STEC. Analizując poszczególne interwały zgodność ta jest na wysokim poziomie z jednym wyjątkiem, tj. godzin 7:00-9:00 UT. W tym przypadku łuki obserwacji SWARM były poniżej 82° szerokości, a w rezultacie nie mogły dostarczyć informacji o polarnej jonosferze. Drugim zaobserwowanym efektem było nieregularnie występujące przesunięcie czasowe dla wyników obu technik. Powody tego mogą być dwojakiego rodzaju: wysoka różnica pomiędzy prędkością satelitów SWARM (7.5 km/s) a zmianą pozycji punktu jonosferycznego w obserwacjach GNSS (zwykle poniżej 100 m/s) oraz zrzutowanie obserwacji na oś północ-południe magnetycznego czasu lokalnego.

Ostatnia część pracy **1.B7** przedstawiła szczegółową analizę łąt polarnych dla różnych warunków geomagnetycznych. Rysunek 17 przedstawia występowanie tych struktur dla drugiej burzy (8-9 marca 2012 r.). Pokazuje on odpowiednio: zmiany indeksów geomagnetycznych, względne wartości STEC, wartości $0.5VTEC$ wyznaczone dla bieguna oraz $VTEC$ dla dziennej strony jonosfery (12h MLT, 70° szerokości AACGM). Pierwszy parametr $VTEC$ definiuje minimalny wzrost koncentracji elektronów dla łąt polarnych, a drugi odpowiada w przybliżeniu gęstości plazmy przy zewnętrznej granicy owalu. Oba te parametry zostały pozyskane z globalnych map jonosferycznych generowanych przez Europejskie Centrum Operacji Kosmicznych (ESOC).

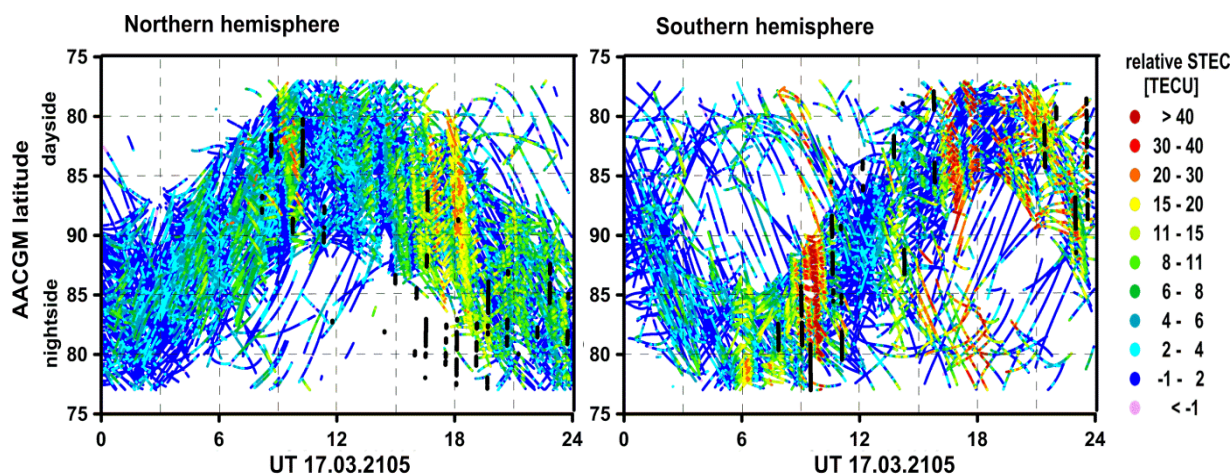
Analizując względne wartości STEC można zauważyć ekstremalnie spokojną jonosferę w okresie poprzedzającym burzę (0:00-8:00 UT, 8 marca 2012 r.). Efekt ten odpowiadał północnej polaryzacji IMF oraz niskim wartościom $VTEC$ po stronie dziennej (~ 12 TECU). Pierwsze łąty polarne (#1) zaobserwowano w praktycznie tych samych warunkach geomagnetycznych, tj. $IMF > 0$. Osiągały one około 6 TECU wzmocnienia, a ich występowanie dobrze koresponduje ze wzrostem $VTEC$. Ostatni wzrost wartości STEC w okresie #1 związany jest z łukiem jonosferycznym, którego obecność potwierdziły badania przedstawione w pracy Prikryl i in. (2015). Następne struktury (#2) pojawiły się po reorientacji IMF Bz, co reprezentuje typowy scenariusz ich występowania. Znacznie ciekawsza jest kolejna sekwencja (#3) obserwowana dla północnej polaryzacji. Porównując te warunki ze spokojnym okresem poprzedzającym burzę, widoczny jest wyraźny wzrost $VTEC$ po stronie dziennej. Sugeruje to, że plazma po stronie dziennej może uczestniczyć w formowaniu się łąt polarnych także w takich warunkach. Druga część rysunku 17 (9 marca 2012 r.) ukazuje aktywność jonosfery podczas głównej fazy burzy. Wyniki te potwierdziły, że zmiana orientacji IMF Bz zapoczątkowała długi okres występowania łąt polarnych (#4). Otrzymane wartości STEC wydają się być modulowane przez zmiany indeksu AE, tj. słabsze struktury albo ich brak jest poprzedzany spadkiem tego wskaźnika odpowiednio o godzinach $\sim 5:30$ UT oraz $\sim 11:00$ UT. Efekt ten związany jest z zależnością zasięgu owalu zorzowego od indeksu AE (Xiong i in. 2014), który jednocześnie steruje ilością plazmy dostającej się do obszarów polarnych.



Rys.17 Występowanie łat polarnych w okresie burzy geomagnetycznej 8-9 marca 2012 r. (czarna linia). Ciągła czerwona linia odpowiada 0.5 VTEC dla bieguna geomagnetycznego, przerywana reprezentuje VTEC po stronie dziennej. Panel górny przedstawia zmiany indeksów geomagnetycznych (źródło **1.B7**).

Napisana jako ostatnia praca **1.B6** stanowi kontynuację badań nad zastosowaniem względnych wartości STEC do detekcji łat polarnych. W tym przypadku główny nacisk analiz położony był na porównanie struktur okołobiegunowych dla obu półkul ziemskich. Zaprezentowany w pracy eksperyment bazował na danych GNSS z około 180 oraz 60 stacji rozlokowanych odpowiednio na północnej oraz południowej części globu. Analizy obejmowały okres tzw. burzy Św. Patryka 17-19 marca 2015 r. Wydarzenie to było pierwszą ekstremalnie silną burzą w 24 cyklu aktywności słonecznej.

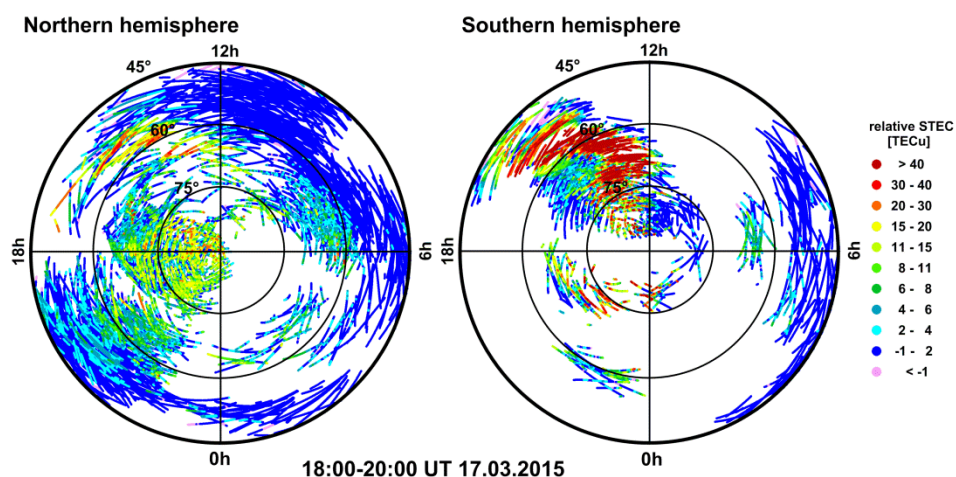
Pierwszym punktem badań przedstawionych w tej pracy był wpływ niejednorodnego rozmieszczenia stacji permanentnych na detekcję łat polarnych. Rysunek 18 ukazuje rozkład względnych wartości STEC oraz pomiarów SWARM, jako funkcji UT oraz szerokości AACGM zrzutowanej na oś północ-południe. Analiza tych danych ujawnia, że detekcja struktur polarnych możliwa jest głównie dzięki odbiornikom rozmieszczonym na Grenlandii oraz w pobliżu Gór Transarktycznych. Dostarczają one większości pomiarów widocznych na rysunku 18 jako obracające się pasma. Strefa dla półkuli północnej jest szersza ze względu lepszą dystrybucję stacji w kierunku południków. Sytuacja na południowej części Ziemi jest nieznacznie gorsza ze względu na większą odległością wspomnianych gór od bieguna południowego. Porównanie ciągłości obserwowanych struktur potwierdza korzystniejsze warunki pomiarowe dla półkuli północnej. Praktycznie wszystkie zaburzenia tam występujące mogą być śledzone w 10° pasmach szerokości, włączając w to nawet te słabe charakteryzujące się wzrostem STEC na poziomie kilku TECU. Ciągła obserwacja struktur nie zawsze jest możliwa dla bieguna południowego. Różnica pod tym względem wydaje się być związana z odmiennym rozkładem stacji dla obu półkul, w szczególności z praktycznie liniowym ich rozmieszczeniem w Górach Transarktycznych. Detekcja struktur w takich warunkach jest efektywna tylko dla równoległej orientacji sieci odbiorników oraz propagacji plazmy. Dla usytuowania prostopadłego wszystkie stacje jednocześnie obserwują daną strukturę, co utrudnia monitorowanie jej przemieszczania.



Rys.18 Względne wartości STEC obserwowane na obu obszarach okołobiegunowych w dniu 17 marca 2015. Czarny kolor odpowiada strukturom rozpoznany w danych satelitów SWARM (źródło **1.B6**).

Interesujących danych dostarczyło także dodatkowe porównanie technik GNSS oraz SWARM. Zgodnie z rysunkiem 18 wyniki są tylko częściowo zgodne. Głównym powodem rozbieżności są orientacja orbit SWARM oraz sondowanie przez obie techniki różnych obszarów jonosfery. Drugi z wymienionych czynników wskazuje, że dostarczana informacja jonosferyczna może być niekompletna. W odniesieniu do obserwacji GNSS najgorszy scenariusz występował w okresach, dla których większość danych przypada na 6h lub 18h MLT i jest to związane z ich orientacją w kierunku równika. Jak pokazały badania wadę tą można częściowo wyeliminować poprzez zastosowanie niższej maski elewacji.

Największe struktury polarne dla tej burzy występowały dla dwóch okresów charakteryzujących się południową polaryzacją IMF Bz, tj. $\sim 6:00-10:00$ UT and $\sim 16:00-24:00$ UT. W pierwszym z nich zaburzenia dla północnej półkuli osiągały do 30 TECU, przy czym wartości te były w większości obserwowane dla niskich elewacji. W przypadku bieguna południowego struktury jonosferyczne przekraczały nawet 60 TECU. Dysproporcja ta była także obserwowana dla danych SWARM. Występowanie struktur w pierwszym okresie było związane z wysokim poziomem plazmy po stronie dziennej oraz rozszerzeniem owalu zorzowego. Z drugiej strony nie wyjaśnia to znaczących różnic w wartościach STEC. Wyniki uzyskane dla okresu pomiędzy 16:00 a 24:00 UT potwierdzają tę dysproporcję dla obu półkul. W tym przypadku maksymalne wartości STEC dla południowego obszaru były prawie 3-krotnie wyższe. Drugi okres, jednakże, charakteryzował się najlepszym pokryciem dziennej strony jonosfery przez dane GNSS, a jego analiza umożliwiła wyjaśnienie różnic w wartościach STEC. Zgodnie z rysunkiem 19 strumień plazmy, będący źródłem łąt polarnych, na północnej półkuli rzadko osiągał 20 TECU, natomiast na południowej przekraczał nawet 40 TECU. Uwzględniając także szerokość strumienia w drugim przypadku można założyć, że dysproporcja w obserwowanych strukturach polarnych jest pochodną ilości plazmy pochodzącej ze średnich szerokości.



Rys.19 Mapy względnych wartości STEC w funkcji szerokości geomagnetycznej oraz MLT, 18:00–20:00 UT, 17 marca 2015 r. (źródło B6).

Podsumowując, dane GNSS umożliwiają jednoczesne monitorowanie struktur polarnych na obu półkulach i stanowią interesującą alternatywę dla innych metod pomiarowych. Ponadto, względne wartości STEC pozwalają na detekcję zaburzeń charakteryzujących się wzrostem koncentracji na poziomie kilku TECU. Trzeba zaznaczyć jednak, że ich skuteczność może być ograniczana przez rozmieszczenie stacji permanentnych.

4.3.5. Podsumowanie

Wspólnym mianownikiem powyższego cyklu publikacji jest wpływ jonosfery na obserwacje GNSS. Oddziaływanie to pozwala traktować każdy naziemny odbiornik jako czuły sensor górnych warstw atmosfery, ale jednocześnie jest jednym z kluczowych czynników decydujących o jakości pozycjonowania. Oba te zagadnienia, ściśle związane z występowaniem zaburzeń jonosferycznych, były przewodnim motywem prac habilitanta. Tematyka ta dobrze wpisuje się w bieżące kierunki wykorzystania obserwacji GNSS w geodezji satelitarnej oraz innych naukach o Ziemi. Zaproponowane w cyklu habilitacyjnym algorytmy oraz rozwiązania stanowią autorski wkład habilitanta w podejmowanej dziedzinie. Do najważniejszych osiągnięć naukowych trzeba zaliczyć:

- Opracowanie i walidacja metodologii monitorowania owalu zorzowego z wysoką rozdzielczością czasową
- Opracowanie algorytmu wyznaczania względnych wartości STEC oraz jego zastosowanie do badania struktur polarnych
- Zaproponowanie koncepcji oraz współprace modyfikacji standardowego modelu pozycjonowania GNSS, umożliwiającego eliminację fluktuacji jonosfery

Pierwsze dwa osiągnięcia rozszerzają możliwości oferowane przez obserwacje GNSS w zakresie monitorowania jonosfery. Kluczową zaletą obu rozwiązań jest poprawa rozdzielczości czasowej, która pozwala na śledzenie dynamicznych warunków panujących na wysokich szerokościach. Opracowana metodologia powinna stanowić

istotne wsparcie dla badań interakcji zachodzącej w sprzężonym układzie magnetosfery oraz jonosfery modulowanym przez pogodę kosmiczną. Jej dołączenie do szerokiego spektrum innych algorytmów oraz technik pomiarowych umożliwi bardziej dogłębne zrozumienie zachodzących tam procesów. Ze względu na permanentny tryb pracy odbiorników GNSS, zaproponowane rozwiązania mogą być również podstawą serwisów monitorujących wpływ pogody kosmicznej na jonosferę. Warto przy tym zauważyć, że warunki panujące w przestrzeni okołoziemskiej mogą w ekstremalnych przypadkach negatywnie wpływać różnego rodzaju infrastrukturę. Fakt ten czyni takie badania istotnymi także z punktu widzenia naszego codziennego życia.

Ostatnie z osiągnięć dotyczy modyfikacji standardowego modelu wyznaczania współrzędnych, która pozwala na eliminację czasowej zmienności jonosfery. Zaproponowany algorytm został przetestowany w odniesieniu do szybkiego, względnego pozycjonowania, znajdującego szerokie zastosowanie zarówno w badaniach naukowych jak i codziennych pracach geodezyjnych. Przedstawione wyniki potwierdziły wysoką skuteczność rozwiązania w okresach zaburzonych oraz brak jakiegokolwiek niepożądanego efektu dla spokojnej jonosfery. Poprawa w wyznaczaniu nieoznaczoności była obserwowana dla różnych struktur, co potwierdza elastyczność modyfikacji i możliwość wykorzystania jej w praktycznie każdych warunkach. Warto również zaznaczyć, że algorytm może być stosowany dla wielosystemowych obserwacji GNSS, jak również innych metod pozycjonowania włączając w to szeroko obecnie wykorzystywane rozwiązanie PPP. Opracowana modyfikacja może zostać zaimplementowana w komercyjnych programach oraz automatycznych systemach. W tym drugim przypadku możliwa jest jego adaptacja także dla pomiarów czasu rzeczywistego.

4.3.6. Literatura

- Bowline MD, Sojka JJ, Schunk RW. 1996. Relationship of theoretical patch climatology to polar cap patch observations. *RadioSci* 31: 635–644. DOI:10.1029/96RS00236.
- Carlson HC. 2012. Sharpening our thinking about polar cap ionospheric patch morphology, research, and mitigation techniques. *Radio Sci* 47: RS0L21. DOI: 10.1029/2011RS004946
- Durgonics T, Komjathy A, Verkhoglyadova O, Shume EB, Benzoni HH, Mannucci AJ, Butala MD, Høeg P, Langley RB. 2017. Multiinstrument observations of a geomagnetic storm and its effects on the Arctic ionosphere: A case study of the 19 February 2014 storm. *Radio Sci* 52: 146–165, DOI:10.1002/2016RS006106
- Fritsche M, R Dietrich, C Knöfel, A Rülke, S Vey, M Rothacher and P Steigenberger. 2005. Impact of higher-order ionospheric terms on GPS estimates. *Geophys. Res. Lett.* 32: L23311 doi:10.1029/2005GL024342.
- Garcia-Fernandez M, S D Desai, M D Butala and A Komjathy. 2013. Evaluation of different approaches to modeling the second-order ionospheric delay on GPS measurements. *J. Geophys. Res. Space Physics* 118: 7864–7873 doi:10.1002/2013JA019356.
- Jakowski N, Mayer C, Hoque MM, Wilken V. 2011. Total electron content models and their use in ionosphere monitoring. *Radio Sci* 46: RS0D18. DOI:10.1029/2010RS004620
- Hernández-Pajares, M., J.M. Juan and J. Sanz. 2006. Real time MSTIDs modeling and application to improve the precise GPS and GALILEO navigation, Proc. the ION GNSS Meeting, Fort Worth, TX, 1358-1368
- Hernández-Pajares M, Miguel J, Sanz J, Aragón-Àngel À, Garcia-Rigo A, Salazar D, Escudero M. 2011. The ionosphere: effects, GPS modeling and the benefits for space geodetic techniques. *J Geod* 85(12): 887–907. DOI:10.1007/s00190-011-0508-5
- Hernández-Pajares M, Juan JM, Sanz J and Aragon-Angel A. 2012. Propagation of medium scale travelling ionospheric disturbances at different latitudes and solar cycle conditions, *Radio Sci.*, 47, RS0K05; <http://dx.doi.org/10.1029/2011RS004951>.
- Horvath I, Lovell BC. 2014. Large plasma density enhancements occurring in the northern polar region during the 6 April 2000 superstorm. *J Geophys Res Space Phys* 119: 4805–4818. DOI:10.1002/2014JA019917
- Hosokawa K, Taguchi S, Ogawa Y. 2016. Edge of polar cap patches. *J Geophys Res Space Phys* 121, 3410–3420, DOI:10.1002/2015JA021960.
- Jayachandran PT, Langley RB, MacDougall JW, Mushini SC, Pokhotelov D, et al. 2009. The Canadian high arctic ionospheric network (CHAIN). *Radio Sci* 44: RS0A03. DOI:10.1029/2008RS004046

- Kitamura N, Nishimura Y, Chandler MO, Moore TE, Terada N, Ono T, Shinbori A, Kumamoto A. 2012. Storm-time electron density enhancement in the cleft ion fountain. *J Geophys Res* 117: A11212. DOI:10.1029/2012JA017900
- Lejeune, S., G. Wautelet and R. Warnant. 2012. Ionospheric effects on relative positioning within a dense GPS network, *GPS Solut.*, 16 (1), 105-116; doi.org/10.1007/s10291-011-0212-1
- Li G, Ning B, Ren Z, Hu L. 2010. Statistics of GPS ionospheric scintillation and irregularities over polar regions at solar minimum. *GPS Solut* 14. DOI:10.1007/s10291-009-0156-x.
- Li Z, Yuan Y, Wang N, Hernandez-Pajares M, Huo X. 2015. SHPTS: towards a new method for generating precise global ionospheric TEC map based on spherical harmonic and generalized trigonometric series functions. *J Geod* 89. DOI:10.1007/s00190-014-0778-9
- Marques HA, Monico JFG, Aquino M. 2011. RINEX_HO: second- and third-order ionospheric corrections for RINEX observation files. *GPS Solut* 15: 305. doi:10.1007/s10291-011-0220-1
- Noja M, Stolle C, Park J, Lühr H. 2013. Long-term analysis of ionospheric polar patches based on CHAMP TEC data. *Radio Sci* 48(3): 289–301. DOI:10.1002/rds.20033
- Odijk D. 2000. Stochastic modelling of the ionosphere for fast GPS ambiguity resolution. *Proc. Geodesy beyond 2000 - The challenges of the first decade*, IAG General Assembly, Birmingham, UK, July 19-30, vol. 121 pp. 387-392 doi: 10.1007/978-3-642-59742-8_63
- Oinats, A.V., V.I. Kurkin and N. Nishitani. 2015. Statistical study of medium-scale traveling ionospheric disturbances using SuperDARN Hokkaido ground backscatter data for 2011, *Earth, Planets Space*, 67, 22; http://dx.doi.org/10.1186/s40623-015-0192-4
- Otsuka, Y., K. Suzuki, S. Nakagawa, M. Nishioka, K. Shiokawa and T. Tsugawa. 2013. GPS observations of medium-scale traveling ionospheric disturbances over Europe. *Annales Geophysicae* 31: 163-172 http://dx.doi.org/10.5194/angeo-31-163-2013.
- Park J, Helmboldt J, Grejner-Brzezinska DA, von Frese RBR, Wilson TL. 2013. Ionospheric observations of underground nuclear explosions (UNE) using GPS and the Very Large Array. *Radio Sci* 48. DOI:10.1002/rds.20053
- Paziewski J and Wielgosz P. 2014. Assessment of GPS + Galileo and multi-frequency Galileo single-epoch precise positioning with network corrections. *GPS Solut* 18(4): 571–579 doi: 10.1007/s10291-013-0355-3
- Paziewski J. 2015. Precise GNSS single epoch positioning with multiple receiver configuration for medium-length baselines: methodology and performance analysis. *Meas Sci Technol* 26(3): 035002 DOI:10.1088/0957-0233/26/3/035002
- Pi X, Mannucci AJ, Lindqwister UJ, Ho CM. 1997. Monitoring of global ionospheric irregularities using the worldwide GPS network. *Geophys Res Lett* 24. DOI:10.1029/97GL02273.
- Prikryl P, Jayachandran PT, Mushini SC, Richardson IG. 2014 High-latitude GPS phase scintillation and cycle slips during high-speed solar wind streams and interplanetary coronal

- mass ejections : a superposed epoch analysis. *Earth Planets Space* 66. DOI:10.1186/1880-5981-66-62
- Prikryl P, Ghoddousi-Fard R, Thomas EG, Ruohoniemi JM, Shepherd SG et al. 2015. GPS phase scintillation at high latitudes during geomagnetic storms of 7–17 March 2012 – Part 1: The North American sector. *Ann Geophys* 33: 637-656. DOI:10.5194/angeo-33-637-2015.
- Ren X, Zhang X, Xie W, Zhang K, Yuan Y, Li X. 2016. Global ionospheric modelling using multi-GNSS: BeiDou, Galileo, GLONASS and GPS. *Sci Rep* 6: 33499. DOI:10.1038/srep33499
- Ryu K, Parrot M, Kim SG, Jeong KS, Chae JS, Pulinets S, Oyama K-I. 2014. Suspected seismo-ionospheric coupling observed by satellite measurements and GPS TEC related to the M7.9 Wenchuan earthquake of 12 May 2008. *J Geophys Res Space Phys* 119: 10305–10323. DOI:10.1002/2014JA020613
- Shepherd SG. 2014. Altitude-adjusted corrected geomagnetic coordinates: Definition and functional approximations *J Geophys Res Space Phys* 119: 7501–7521. DOI:10.1002/2014JA020264.
- Sojka JJ, Subramaniam MV, Zhu L, Schunk RW. 1998. Gradient-drift instability growth rates from global scale modeling of the polar ionosphere. *Radio Sci* 33(6): 1915–1928
- Spicher A, Clausen LBN, Miloch WJ, Lofstad V, Jin Y, Moen JI. 2017, Interhemispheric study of polar cap patch occurrence based on Swarm in situ data. *J Geophys Res Space Phys* 122: 3837–3851, DOI:10.1002/2016JA023750
- Teunissen PJG. 1997. The geometry-free GPS ambiguity search space with a weighted ionosphere. *J Geod* 71(6): 370-383, doi: 10.1007/s001900050105

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo – badawczych

Pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze habilitanta obejmują publikacje naukowe spoza cyklu habilitacyjnego oraz prace zaprezentowane na krajowych i międzynarodowych konferencjach. Pomijając badania jonosfery były one skupione wokół dwóch zagadnień:

- Badania nad zastosowaniem wysokoczęstotliwościowych obserwacji GNSS do monitorowania przemieszczeń **(2.A4, 2.E2, 2.E3)**

W ramach prowadzonych badań habilitant zaproponował alternatywną metodę wyznaczania dynamicznych zmian położenia anteny GNSS. W odróżnieniu od klasycznego podejścia zakłada ona wstępne odfiltrowanie podwójnie zróżnicowanych obserwacji fazowych, które eliminuje wszystkie stałe oraz wolnozmiennie czynniki. Pozostała krótkookresowa składowa jest wynikiem zmian odległości geometrycznej pomiędzy satelitą a ruchomym odbiornikiem i może być wyznaczana analogicznie jak w klasycznym pozycjonowaniu. W podejściu tym tracona jest informacja o pozycji absolutnej, ale ma ono też niewątpliwe zalety. Pierwszą z nich jest prostszy proces obliczeniowy dzięki redukcji liczby parametrów. Drugą natomiast jest redukcja efektu wielotorowości w obserwacjach fazowych oraz szczytkowego wpływ atmosfery, będąca wynikiem zastosowanej filtracji. Przeprowadzone testy porównawcze dowiodły, że wyniki zaproponowanego rozwiązania są zgodne z klasycznymi metodami GNSS.

- Analizy szumu pomiarowego obserwacji kodowych oraz fazowych **(2.A3, 2.A5)**

Badania te obejmowały porównanie szumu pomiarowego obecnego w wielosystemowych obserwacjach GNSS. Dowiodły one różnic, w jakości danych dla poszczególnych systemów satelitarnych, szczególnie wyraźnych w przypadku obserwacji kodowych. Wyniki tych analiz były wstępną przesłanką dla dalszych badań. W szczególności były one wykorzystywane do odpowiedniego wagowania obserwacji w pozycjonowaniu wielosystemowym oraz rozwoju algorytmów bazujących na surowych obserwacjach GNSS.

Niewątpliwym osiągnięciem habilitanta jest również rozwój autorskiego oprogramowania do opracowania obserwacji satelitarnych GNSS. Program ten stanowi główne narzędzie pracy habilitanta i był podstawą większości wykonanych przez niego analiz, zarówno tych związanych z monitorowaniem jonosfery jak i pozostałych prac nie ujętych w cyklu habilitacyjnym. Ze względu na zainteresowania habilitanta główna funkcjonalność programu to generowanie map fluktuacji TEC oraz względnych wartości STEC w oparciu o wielosystemowe dane GNSS. Produkty te mogą być tworzone w trybie automatycznym.

5.1. Publikacje z listy A Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego indeksowane przez JCR

Prace opublikowane po uzyskaniu stopnia naukowego doktora. Szczegółowy wkład wnioskodawcy przedstawiono w załączniku 3.

[2.A1] Zakharenkova I, Krankowski A, Bilitza D, Cherniak I, Shagimuratov II, **Sieradzki R.** 2013. Comparative study of foF2 measurements with IRI-2007 model predictions during extended solar minimum, *Advance in Space Research*, 51, DOI 10.1016/j.asr.2011.11.015, (Impact Factor 1.238)

[2.A2] Paziewski J, **Sieradzki R**, Wielgosz P. 2015. Selected properties of GPS and Galileo-IOV receiver intersystem biases in multi-GNSS data processing, *Measurement Science and Technology*, 26(9), 095008, DOI 10.1088/0957-0233/26/9/095008, (Impact Factor 1.433)

[2.A3] Paziewski J, **Sieradzki R.** 2017. Integrated GPS+BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: signal analysis, methodology and performance assessment, *Advances in Space Research*, 60, DOI 10.1016/j.asr.2017.04.016 (Impact Factor 1.401)

[2.A4] Paziewski J, **Sieradzki R**, Baryła R. 2018. Multi-GNSS high-rate RTK, PPP and novel direct phase observation processing method: application to precise dynamic displacements detection, *Measurement Science and Technology*, 29, DOI 10.1088/1361-6501/aa9ec2 (Impact Factor 1.585)

[2.A5] Paziewski J, **Sieradzki R**, Wielgosz P. 2018. On the Applicability of Galileo FOC Satellites with Incorrect Highly Eccentric Orbits: An Evaluation of Instantaneous Medium-Range Positioning. *Remote Sensing* 10(2) 208, DOI 10.3390/rs10020208 (Impact Factor 3.406)

5.2. Inne opublikowane materiały

[2.E1] Małyszko L, Kowalska E, Paziewski J, Rutkiewicz A, **Sieradzki R.** 2016. Monitoring of structural vibration using GNSS and accelerometer data - preliminary tests, *Lightweight Structures in Civil Engineering - LSCE 2016 Contemporary Problems*. Olsztyn, 37-42. Chapter in monography.

[2.E2] Paziewski J, **Sieradzki R**, Baryła R. 2017. High-rate GNSS positioning for precise detection of dynamic displacements and deformations: methodology and case study results, In: "Environmental Engineering" 10th International Conference Vilnius Gediminas Technical University Lithuania, 27-28 April 2017 DOI 10.3846/enviro.2017.224

[2.E3] Małyszko L, Paziewski J, **Sieradzki R**, Kowalska E, Rutkiewicz A. 2017. Detecting Cantilever Beam Vibration with Accelerometers and GNSS. *Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, Gdansk, 2017, pp. 148-152. DOI 10.1109/BGC.Geomatics.2017.10

[2.E4] **Sieradzki R**, Paziewski J. 2018. GNSS-Based Detection of Polar Patches with Relative STEC Values - The Impact of Elevation Cut-off Angle. *Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, Olsztyn 2018, DOI 10.1109/BGC-Geomatics.2018.00046

[2.E5] Paziewski J, **Sieradzki R.** 2018. Mitigation of the Ionospheric Disturbances in GNSS Relative Positioning: A Case Study in Southern High Latitudes. *Baltic Geodetic Congress (BGC Geomatics)*, Olsztyn, 2018, DOI 10.1109/BGC-Geomatics.2018.00058

5.3. Podsumowanie dorobku i osiągnięć naukowych, popularyzatorskich, organizacyjnych i dydaktycznych

Poniżej przedstawiono wybrane wskaźniki dotyczące osiągnięć naukowych, popularyzatorskich, organizacyjnych i dydaktycznych. Szczegółowy wykaz osiągnięć przedstawia załącznik nr 3.

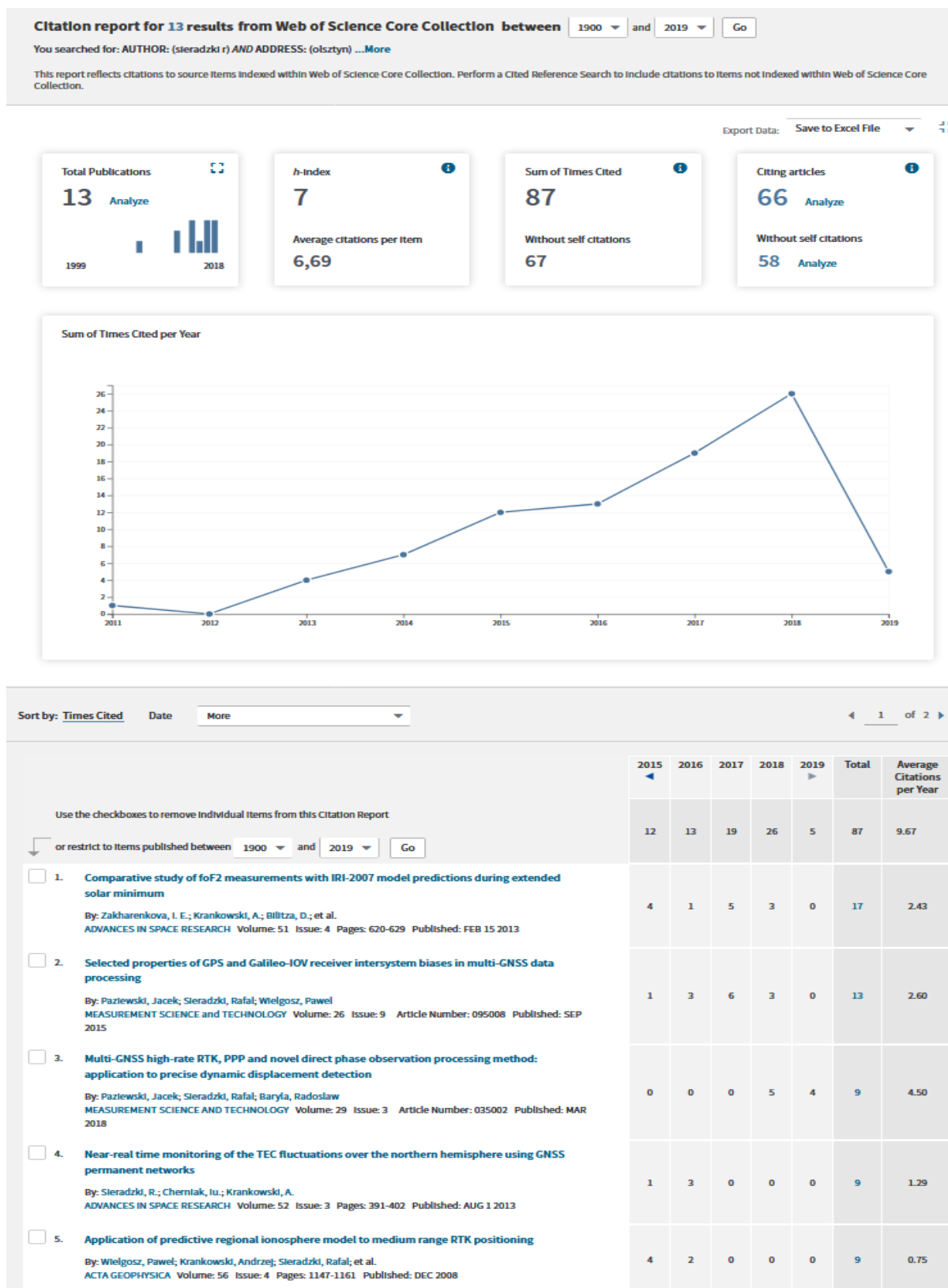
Tab.5 Zestawienie wskaźników dotyczących prac naukowo-badawczych.

Wskaźnik	Wartość
Autorstwo lub współautorstwo publikacji naukowych w czasopismach znajdujących się w bazie <i>Journal Citation Reports</i> (JCR):	
• po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	12
• przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	1
Autorstwo lub współautorstwo innych publikacji naukowych:	
Rozdziały w monografii (po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)	1
Publikacje naukowe w czasopismach nieposiadających współczynnika wpływu <i>Impact Factor</i>	
• po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	0
• przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	2
Publikacje w materiałach z konferencji międzynarodowych uwzględnionych w uznanych bazach publikacji (WoS, Scopus) (po uzyskaniu stopnia naukowego doktora)	3
Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych tworzących cykl według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	17.907
Sumaryczny <i>Impact Factor</i> publikacji naukowych <u>po uzyskaniu stopnia naukowego doktora</u> według listy <i>Journal Citation Reports</i> (JCR), zgodnie z rokiem opublikowania	26.970
Liczba cytowań według bazy Web of Science	87
Indeks Hirscha według bazy Web of Science	7
Liczba punktów publikacji tworzących cykl zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	131.5
Liczba punktów publikacji <u>po uzyskaniu stopnia naukowego doktora</u> zgodnie z rokiem opublikowania (udział wnioskodawcy)	191
Liczba referatów na międzynarodowych i krajowych konferencjach naukowych (prezentowane osobiście/współautorstwo)	
• po uzyskaniu stopnia naukowego doktora	24/43
• przed uzyskaniem stopnia naukowego doktora	2/14

Tab. 6 Zestawienie wybranych pozostałych wskaźników

Wskaźnik	Wartość
Udział w krajowych i międzynarodowych projektach badawczych	3
Udział w komitetach organizacyjnych międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych	2
Członkostwo w międzynarodowych i krajowych organizacjach oraz towarzystwach naukowych i branżowych	5
Nagrody za działalność naukową	1
Recenzowanie publikacji w czasopiśmie międzynarodowych i krajowych:	
• Czasopisma z listy JCR (posiadające <i>Impact Factor</i>)	22
• Czasopisma spoza listy JCR	5
• łącznie	Σ 27
Zagraniczne staże naukowe	2
Promotorstwo prac dyplomowych magisterskich i inżynierskich	10

5.4. Raport z Web of Science (stan na 10.02.2019)



<input type="checkbox"/>	6. Study on reliable GNSS positioning with intense TEC fluctuations at high latitudes By: Sieradzki, Rafal; Paziewski, Jacek GPS SOLUTIONS Volume: 20 Issue: 3 Pages: 553-563 Published: JUL 2016	1	2	2	3	0	8	2.00
<input type="checkbox"/>	7. MSTIDs impact on GNSS observations and its mitigation in rapid static positioning at medium baselines By: Sieradzki, Rafal; Paziewski, Jacek ANNALS OF GEOPHYSICS Volume: 58 Issue: 6 Article Number: A0661 Published: 2015	0	1	4	2	0	7	1.40
<input type="checkbox"/>	8. Integrated GPS plus BDS instantaneous medium baseline RTK positioning: Signal analysis, methodology and performance assessment By: Paziewski, Jacek; Sieradzki, Rafal ADVANCES IN SPACE RESEARCH Volume: 60 Issue: 12 Pages: 2561-2573 Published: DEC 15 2017	0	0	1	5	0	6	2.00
<input type="checkbox"/>	9. An analysis of selected aspects of irregularities oval monitoring using GNSS observations By: Sieradzki, R. JOURNAL OF ATMOSPHERIC AND SOLAR-TERRESTRIAL PHYSICS Volume: 129 Pages: 87-98 Published: JUL 2015	1	1	0	2	0	4	0.80
<input type="checkbox"/>	10. On the Applicability of Galileo FOC Satellites with Incorrect Highly Eccentric Orbits: An Evaluation of Instantaneous Medium-Range Positioning By: Paziewski, Jacek; Sieradzki, Rafal; Wielgosz, Pawel REMOTE SENSING Volume: 10 Issue: 2 Article Number: 208 Published: FEB 2018	0	0	0	2	1	3	1.50
<input type="checkbox"/>	11. On the estimation of higher-order ionospheric effects in precise point positioning By: Barville, Simon; Sieradzki, Rafal; Hoque, Mainul; et al. GPS SOLUTIONS Volume: 21 Issue: 4 Pages: 1817-1828 Published: OCT 2017	0	0	1	1	0	2	0.67
<input type="checkbox"/>	12. On the Feasibility of Interhemispheric Patch Detection Using Ground-Based GNSS Measurements By: Sieradzki, Rafal; Paziewski, Jacek REMOTE SENSING Volume: 10 Issue: 12 Article Number: 2044 Published: DEC 2018	0	0	0	0	0	0	0.00
<input type="checkbox"/>	13. Detecting Cantilever Beam Vibration with Accelerometers and GNSS By: Malyszko, Leszek; Paziewski, Jacek; Sieradzki, Rafa; et al. 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: 148-152 Published: 2017	0	0	0	0	0	0	0.00

Rafał Sieradzki