

dr hab. inż. Jacek Kudrys
AGH w Krakowie

**Recenzja rozprawy doktorskiej mgr. inż. Kacpra Kotulaka na temat:
"Multiinstrumentalna diagnostyka różnoskalowych nieregularności jonosferycznych"**

Rozprawa doktorska mgr. inż. Kacpra Kotulaka dotyczy opracowania metodyki tworzenia map ROTI (Rate of TEC Index) z wykorzystaniem wielosystemowych pomiarów GNSS i oceny ich przydatności do obserwacji zaburzeń jonosferycznych. W pracy Autor stara się potwierdzić, tezę że tego rodzaju mapy, stanowiąc wydajne i wiarygodne narzędzie, mogą być uzupełnieniem innych technik badania jonosfery, dając wraz z nimi możliwość pełniejszego wglądu w stan jonosfery. W ramach prowadzonych badań, na ich początkowym etapie Doktorant ocenia dostępność danych GNSS z uwzględnieniem różnych systemów nawigacji satelitarnej, a także zgodność wyników opracowania w zależności od zastosowanych systemów nawigacji satelitarnej. Analizuje zmienność indeksu ROTI w okresie doby, roku i 11-sto letniego cyklu aktywności słonecznej, porównując szeregi czasowe ROTI z innymi wskaźnikami powszechnie stosowanymi w badaniach jonosfery. Przeprowadza podobne analizy i porównania zmian ROTI w okresach występowania burz geomagnetycznych, a także ocenia możliwości wykorzystania map ROTI wraz z innymi rodzajami pomiarów takimi jak mapy Δ TEC, satelity Swarm czy system LOFAR.

Praca zawarta jest na 117 stronach i zawiera Spis treści, Wprowadzenie, 6 numerowanych rozdziałów, Podsumowanie oraz Bibliografię - 105 pozycji i 10 źródeł internetowych związanych z tematyką pracy, a także Streszczenie w języku polskim i angielskim.

We Wprowadzeniu Autor przedstawia motywację dla podjętych działań badawczych i skrótowo omawia treść całej rozprawy. W tym miejscu nie podaje jednak wprost celu pracy oraz tezy badawczej, które sformułowane są w raczej rzadko spotykany sposób - na końcu pracy - w Streszczeniu.

W Rozdziale 1 Doktorant, na podstawie literatury podaje informacje na temat budowy i struktury jonosfery, jej wpływu na sygnały radiowe oraz zjawisk w niej występujących, a także omawia stosowane w badaniach jonosfery indeksy aktywności geomagnetycznej.

Rozdział 2, zatytułowany "Monitorowanie stanu jonosfery", to omówienie sposobów monitorowania jonosfery, spośród których Autor wyróżnia metody radarowe, jonosondy, globalne systemy nawigacji satelitarnej, misje satelitarne, radiointerferometr LOFAR. Ponadto, opisuje działalność Międzynarodowej Służby GNSS (IGS) i wchodzącej w jej skład jonosferycznej grupy roboczej, której jest członkiem. W rozdziale tym Doktorant wprowadza

pojęcia ROT (Rate of TEC) oraz ROTI (ROT index), które w dalszej części pracy szczegółowo omawia w kontekście ich wykorzystania do monitorowania nieregularności w jonosferze.

Rozdział 3 stanowi opis algorytmu wyznaczania parametrów ROT i ROTI i tworzenia map tych parametrów z wykorzystaniem czterech systemów nawigacji satelitarnej. Autor analizuje tutaj dostępność obserwacji z poszczególnych systemów GNSS, a także liczbę obserwacji na podstawie których można tworzyć mapy ROTI. Przedstawia przykładowe mapy ROTI wykonane z zastosowaniem wielu systemów GNSS stwierdzając, że uwzględnienie większej ich liczby w opracowaniu pozwala na wyraźniejszą prezentację występowania nieregularności w jonosferze. Doktorant ocenia także zgodność wyznaczeń ROTI z poszczególnych systemów odnosząc je do wyznaczeń z systemu GPS. Współczynnik korelacji pomiędzy wartościami ROTI wyznaczonymi z różnych systemów zawiera się w zakresie 0.6776 - 0.7753 co według Autora świadczy o zgodności opracowań. Należy podkreślić, że badania Doktoranta przy tworzeniu map ROTI zostały wykorzystane do opracowania europejskich regionalnych map ROTI czasu rzeczywistego tworzonych na podstawie obserwacji multi-GNSS pochodzących ze stacji permanentnych sieci EPN (EUREF Permanent Network). Mimo ograniczeń w liczbie równocześnie dostępnych strumieni danych, odpowiedni wybór stacji EPN oraz wykorzystanie wielu systemów GNSS pozwala na wyraźne zobrazowanie stanu jonosfery - lepsze niż w przypadku jednego systemu i większej liczby stacji.

W rozdziale 4 "Długookresowa analiza nieregularności jonosferycznych opisanych przez ROTI" Autor stara się zweryfikować przydatność ROTI do badań owalu zorzowego. Do tego celu wykorzystuje dane obserwacyjne z lat 2013, 2015 i 2017 obejmujące okresy wzrostu aktywności słonecznej, jej spadku oraz okres niskiej aktywności. Do opisanie zmienności sezonowych, obliczone zostały średnie godzinne wartości ROTI w ciągu doby, w trzymiesięcznych okresach, z punktami centralnymi 21 marca, 22 czerwca, 23 września, 21 grudnia. Obliczenia wykonano na podstawie danych ze stacji permanentnych GNSS rozmieszczonych wzdłuż południków 15° i 260°. Uzyskane wyniki Autor porównał z modelem IRI (International Reference Ionosphere) zauważając zgodność opracowań w zależności zarówno od pory dnia jak i pory roku a także w zależności od aktywności Słońca. Oprócz średnich sezonowych Autor przeanalizował także średniodobowe wartości ROTI oddzielnie dla średnich wartości dziennych i nocnych i porównał je z wartościami indeksów K_p oraz $F_{10,7}$. Dienne wartości ROTI na obu analizowanych długościach wykazują wysoką korelację z indeksem aktywności geomagnetycznej K_p pomiędzy szerokościami magnetycznymi 50°N a 65°N. W nocy zakres szerokości gdzie korelacja ta przekracza wartość 0.6 rozciąga się niżej do ok 45°N. Z kolei pomiędzy indeksem aktywności słonecznej $F_{10,7}$, a szeregami ROTI, według wyników analiz Autora, nie ma istotnej korelacji.

Rozdział 5 poświęcony jest analizie nieregularności jonosferycznych opisanych indeksem ROTI w czasie burz geomagnetycznych. Do zilustrowania zachowania indeksu ROTI w czasie zaburzeń geomagnetycznych Autor wybrał cztery zróżnicowane pod względem intensywności przykłady: burze z 20 listopada 2003 r., 17 marca 2015 r., 8 września 2017 r. oraz 24 kwietnia 2023 r. W tym przypadku mapy ROTI porównał z całkowitą intensywnością

międzyplanetarnego pola magnetycznego IMF i jego składową w kierunku prostopadłym do płaszczyzny ekliptyki Bz. Z badań Autora wynika, że zależność pomiędzy IMF a okołozorзовymi nieregularnościami nie jest silna, ale jest zauważalna (wsp. korelacji ok. 0.5). Natomiast w przypadku burz jonosferycznych widać odchylenie składowej Bz IMF w kierunku południowym wraz z ekspansją zaburzeń jonosfery w kierunku równika widoczną na mapach ROTI. Autor ponownie zauważa, że dane obserwacyjne pozyskane tylko z jednego systemu - GPS w 2003 roku - powodują znaczne ograniczenie w kompletności map. Na dalszym etapie swoich badań Autor porównuje nieregularności widoczne na mapach ROTI w trakcie burz, z indeksami aktywności geomagnetycznej: indeks polarny północny PCN, elektrodżetu zorzowego AE oraz indeks SYM-H charakteryzujący symetryczne południkowo zaburzenie ziemskiego pola magnetycznego. W tych porównaniach poziom korelacji osiąga wartości 0.6 - 0.7. Z kolei korelacja krzyżowa tych parametrów z ROTI pokazuje, że wskaźniki PCN i AE reagują praktycznie równocześnie ze zmianą nieregularności jonosferycznych, natomiast nasilenie indeksu SYM-H jest przesunięte względem ROTI o kilkadziesiąt minut. Porównanie map ROTI z obserwacjami z satelitów Swarm było kolejnym etapem analiz przeprowadzonych w warunkach burz magnetycznych. W tym przypadku wartości indeksu ROTI były porównywane z parametrem RODI - indeksem zmienności gęstości elektronów wyznaczonym wzdłuż trasy przelotu satelitów. Uzyskany niski współczynnik korelacji dla niektórych analizowanych zdarzeń może, według Doktoranta, świadczyć o występowaniu nieregularności w gęstości elektronów na innych wysokościach niż poruszające się satelity.

W rozdziale 6 Autor omawia możliwości wykorzystania radioteleskopu LOFAR do monitorowania jonosfery. Podkreśla tutaj, że dane uzyskane z LOFAR i mapy ROTI GNSS uzupełniają się ponieważ pozwalają na wykrycie struktur o innych wielkościach, a połączenie tych dwóch rodzajów obserwacji pozwala na bardziej kompleksowy wgląd w nieregularności w jonosferze.

Jak wynika ze Streszczenia celem rozprawy było "opracowanie produktu jonosferycznego - map ROTI (Rate Of TEC Index), opartych o multikonstelacyjne obserwacje GNSS (Global Navigation Satellite Systems) sporządzanych w czasie rzeczywistym". Autor starał się zweryfikować tezę badawczą mówiącą, że "indeksy ROT i ROTI otrzymane z multikonstelacyjnych obserwacji GNSS stanowią wydajne i wiarygodne narzędzie do monitorowania zaburzeń jonosferycznych, komplementarne z innymi technikami", co według recenzenta zrealizował z powodzeniem.

Praca napisana jest przejrzysto i mimo skomplikowanej tematyki poprawnie językowo. W kilku miejscach Autor nie ustrzegł się jednak błędów stylistycznych i kolokwializmów np. str. 20 - "bardzo różnorako", str. 32 - "delikatnie różną prędkością" (podobnie na str. 38), str. 42 - "wciąż nadal", są one jednak nieliczne i nie wpływają na ogólną ocenę pracy. Z błędów redakcyjnych popełnionych przez Doktoranta należy wymienić brak odniesienia w treści pracy do rysunków 1.1, 1.5, 2.6 i 3.6, brak opisów osi na rys. 3.1, 5.6, błędne opisy rysunków 3.3c, 3.3d, brak źródeł wzorów 2.1, 2.8 - 2.12. Sporadycznie pojawiają się także tzw. "literówki" jak np. na str 114 w opisie celu pracy. Istotniejsze błędy merytoryczne zauważone przez recenzenta to: str. 12 - błędna definicja parametru TEC, str. 13 - błędny wzór 1.1 (brak

różniczki ds), str. 37 - nieprawidłowa informacja dotycząca kodu P i nieprawidłowe wyjaśnienie powodów wprowadzania sekundy przestępnej.

W trakcie pracy nad rozprawą, nasunęło się recenzentowi kilka pytań, na które chciałby uzyskać odpowiedź:

- w jaki sposób wykrywa się i usuwa cycle slips?
- dlaczego skala barwna map ROTI przedstawionych w pracy kończy się na wartości 1
- proszę wyjaśnić stwierdzenie "obserwacje zaburzeń pola magnetycznego w strefie okołorównikowej stanowią miarę aktywności w skali globalnej" (str. 84)

Podsumowując, należy stwierdzić, że w przedstawionej do recenzji pracy doktorskiej, Doktorant wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia badań naukowych, a praca zawiera oryginalne aspekty poznawcze i użytkowe w zakresie wykorzystania multi-GNSS w badaniach jonosfery. Mimo wyszczególnionych uwag, wątpliwości nie budzi wykazana w pracy ogólna wiedza teoretyczna Autora w dyscyplinie Geodezja i Kartografia.

Tym samym stwierdzam, że recenzowana przez mnie rozprawa doktorska mgr. inż. Kacpra Kotulaka, przygotowana pod opieką promotora prof. dr. hab. inż. Andrzeja Krankowskiego, spełnia warunki stawiane rozprawie doktorskiej i wnioskuję o dopuszczenie jej do publicznej obrony.