

dr hab. inż. Jacek Rapiński, prof. UWM  
Przewodniczący Rady Naukowej Dyscypliny  
Inżynieria lądowa, geodezja i transport

## Recenzja

rozprawy doktorskiej mgr inż. Kacpra Kotulaka  
pt. „*Multiinstrumentalna diagnostyka różnoskalowych nieregularności jonosferycznych*”  
powstałej pod opieką prof. dr hab. inż. Andrzeja Krankowskiego

### Podstawa formalna wykonania recenzji

Podstawą formalną wykonania recenzji jest uchwała nr 9 Rady Naukowej Dyscypliny inżynieria lądowa, geodezja i transport Uniwersytetu Warmińsko-Mazurskiego w Olsztynie z dnia 4 lipca 2023 roku.

### Charakterystyka pracy

Rozprawę doktorską stanowi praca pisemna w formie monografii naukowej z 2023 r. pt. *Multiinstrumentalna diagnostyka różnoskalowych nieregularności jonosferycznych*. Rozprawa składa się z sześciu rozdziałów, wprowadzenia oraz podsumowania. Zawiera również spis treści, wykaz literatury wykorzystanej w rozprawie oraz streszczenia w języku polskim i angielskim. Praca zawiera łącznie 117 stron. Spis literatury obejmuje 105 pozycji.

W rozprawie podjęto problem badawczy dotyczący opracowania map fluktuacji gęstości jonosfery (ROTI, ang. *Rate of TEC Index*) za pomocą wielokonstelacyjnych obserwacji GNSS wraz z oceną otrzymywanych map.

W rozdziale 1 pt. „*Budowa i znaczenie jonosfery*” Doktorant opisał strukturę jonosfery, procesy w niej zachodzące oraz jej wpływ na propagację fal radiowych, także w obliczu nieregularności w gęstości elektronów (plazmy). Autor opisał zjawisko jonizacji, które polega na powstawaniu jonów

i swobodnych elektronów w jonosferze na skutek promieniowania słonecznego. Podkreślił silną zależność powstawania jonów w zależności od pory dnia i roku, oraz w cyklu jedenastoletnim. Doktorant opisał również budowę jonosfery ze względu na rozkład gęstości elektronów w zależności od wysokości oraz scharakteryzował powstawanie elektronów w poszczególnych jej warstwach (D, E, F1 i F2). W rozdziale tym Autor przedstawił również wpływ jonosfery na pomiary radiowe. W dalszej części Doktorant opisał rozkład gęstości plazmy w zależności od szerokości geograficznej.

W rozdziale 2 pt. „*Monitorowanie stanu jonosfery*” Autor opisał współczesne techniki i metody wykorzystywane do monitorowania jonosfery. Doktorant przybliżył klasyczne pomiary z wykorzystaniem radarów i jonosond, pomiary *in situ* na pokładzie satelitów Swarm, czy pomiary za pomocą naziemnych radioteleskopów LOFAR. Najwięcej miejsca w rozdziale 2 Autor poświęcił technice Globalnych Systemów Nawigacji Satelitarnej, która jest główną techniką wykorzystywaną w rozprawie przez Doktoranta do badania stanu jonosfery. W rozdziale tym Doktorant omówił również strukturę i zadania Międzynarodowej Służby GNSS (IGS, ang. *International GNSS Service*), w tym działalność Jonosferycznej Grupy Roboczej, która jest odpowiedzialna za tworzenie produktu jonosferycznego IGS. Na końcu rozdziału Doktorant przedstawił krótko regionalne sieci stacji permanentnych w Europie (EPN) i Ameryce Północnej (UNAVCO), a także polską sieć ASG-EUPOS.

W rozdziale 3 pt. „*ROT i ROTI jako narzędzia monitorowania nieregularności w jonosferze*” Doktorant przedstawił swoją metodę wyznaczania miar fluktuacji jonosfery, czyli parametrów ROT (ang. *Rate of TEC*) i ROTI (ang. *Rate of TEC Index*). Została również przedstawiona metodyka tworzenia regionalnych map ROTI na podstawie obserwacji ze stacji GNSS należących do EPN. Ponadto, w rozdziale tym Doktorant przedstawił prace nad monitorowaniem nieregularności jonosferycznych w czasie rzeczywistym w ramach polsko-chińskiego projektu ARTEMIS, w którym bierze czynny udział.

W rozdziale 4 pt. „*Długookresowa analiza nieregularności jonosferycznych opisanych przez ROTI*” Doktorant przedstawił wyniki analiz klimatologicznych, które przeprowadził w celu sprawdzenia i oceny wiarygodności ROTI do badań owalu zorzowego. Wyniki zostały wykonane dla trzech pełnych lat (2013, 2015 i 2017), w pobliżu maksimum ostatniego (24.) pełnego cyklu słonecznego. Doktorant przeanalizował wyniki uzyskane na podstawie obserwacji ze stacji EPN znajdujących się w okolicach południka 15° oraz dla stacji GNSS z Ameryki Północnej (UNAVCO i NRCAN) znajdujących się w okolicach południka 100° długości geograficznej zachodniej. Doktorant przedstawił zmiany ROTI w ciągu doby (jako średnie wartości z trzech miesięcy), które przeanalizował także w kontekście zmian sezonowych. Ponadto Doktorant przeprowadził analizę średnich dziennych i nocnych wartości ROTI w ciągu wspomnianych wcześniej trzech lat, które porównał również z wartościami indeksu Kp (opisującym zorzową aktywność magnetyczną) oraz z wartościami indeksu F<sub>10.7</sub> (określającym natężenie strumienia promieniowania słonecznego o długości fali 10.7 cm).

W rozdziale 5 Doktorant przedstawił wyniki analizy jonosferycznych nieregularności podczas burz geomagnetycznych. Rozdział składa się z czterech podrozdziałów. W pierwszym Doktorant zbadał wpływ międzyplanetarnego pola magnetycznego na parametr ROTI. W drugim podrozdziale porównał parametr ROTI względem parametrów opisujących aktywność geomagnetyczną. W kolejnym podrozdziale Doktorant porównał mapy ROTI z pomiarami *in situ* zarejestrowanymi na pokładzie satelitów SWARM. W ostatnim podrozdziale Doktorant przeanalizował mapy różnicowe TEC ( $\Delta$ TEC) pod kątem przemieszczających się zaburzeń jonosferycznych (TID, ang. *Traveling Ionospheric Disturbances*).

W rozdziale 6 Doktorant zbadał możliwość wykorzystania do badania jonosfery radioteleskopu LOFAR. Na podstawie obserwacji ze stacji LOFAR PL612 w Bałdach Autor wyznaczył wartości indeksu  $S_4$  (który jest miarą scyntylacji dla sygnałów radiowych) podczas słabej burzy magnetycznej, a wyniki porównał z wartościami  $S_4$  wyznaczonymi na podstawie obserwacji GNSS oraz z mapą parametru ROTI.

W ostatnim rozdziale (Podsumowanie) Doktorant przedstawił najważniejsze cele pracy oraz opisał uzyskane wyniki i wnioski.

Rozprawa doktorska zawiera wszystkie niezbędne elementy i została skonstruowana prawidłowo.

### **Cel rozprawy, ocena merytoryczna rozprawy**

W rozprawie doktorskiej mgr inż. Kacper Kotulak podjął się stworzenia regionalnych map opisujących fluktuacji gęstości elektronów (ROTI) dla Europy z wykorzystaniem obserwacji GNSS z czterech konstelacji (GPS, GLONASS, Galileo, BeiDou), wraz z oceną otrzymanych map. Celem pracy była weryfikacja następującej tezy badawczej: *indeksy ROT i ROTI otrzymane z multikonstelacyjnych obserwacji GNSS stanowią wydajne i wiarygodne narzędzie do monitorowania zaburzeń jonosferycznych, komplementarne z innymi technikami.*

Motywacją do podjęcia tematu było ulepszenie map ROTI tworzonych przez Jonosferyczną Grupę Roboczą IGS. Aktualnie tworzone przez IGS mapy ROTI opracowywane są wyłącznie na podstawie obserwacji GPS oraz tylko dla obszarów okołopólnych. Ponadto dostępne są z niską (dobową) rozdzielczością czasową. Doktorant w rozprawie zaproponował wykorzystanie dodatkowo obserwacji GLONASS, Galileo i BeiDou, natomiast mapy ROTI wyznaczał dla obszaru Europy na podstawie jednonumitowych wartości ROT w ciągu 5 minut.

Metoda stosowana przez Doktoranta jest opisana w rozdziale 3 rozprawy pt. *ROT I ROTI jako narzędzia monitorowania nieregularności w jonosferze*. Wartości ROT Doktorant wyznaczył na podstawie różnicowych obserwacji fazowych wolnych od wpływu geometrii (ang. *geometry free*). Detekcja utraty cykli fazowych odbywa się za pomocą kombinacji liniowej obserwacji fazowych i kodowych Melbourne-Wübbena, którą Doktorant wybrał po przeprowadzeniu stosownych testów. (Przydałoby się jednak gdyby w części teoretycznej Doktorant bardziej szczegółowo opisał własności tej kombinacji liniowej obserwacji.)

W mojej ocenie zaproponowana przez Doktoranta metoda do wyznaczenia parametrów ROT i ROTI jest prawidłowa. Doktorant również wykazał wyższość stosowania wielokonstelacyjnych obserwacji GNSS do wyznaczania map ROTI, w stosunku do podejścia wykorzystującego tylko obserwacje GPS, zarówno w kontekście dostępnej liczby obserwacji, jak i w kontekście ich interpretacji. Doktorant wykazał bowiem, że mapy ROTI wyznaczone na podstawie czterech konstelacji GNSS, dużo wyraźniej obrazują zasięg występowania nieregularności jonosfery, czyli granicę owalu zorzowego. Doktorant wykazał również, że korzystanie z obserwacji wielokonstelacyjnych jest szczególnie istotne w przypadku map wyznaczanych w czasie prawie rzeczywistym.

W swojej rozprawie Doktorant przeprowadził wszechstronne analizy zmierzające do oceny wiarygodności i przydatności stworzonych map ROTI (rozdziały 4, 5 i 6). Na podstawie analizy

uśrednionych dobowych map ROTI (wyznaczonych w okresach trzymiesięcznych dla trzech lat w różnych okresach cyklu słonecznego) Doktorant potwierdził występowanie zorzowej konwekcji plazmy w jonosferze na wysokich szerokościach geograficznych. Wykazał również zmienność nieregularności w jonosferze w ciągu roku, także w związku z maksimum słonecznym. Potwierdził również asymetrię owalu zorzowego względem dnia i nocy. Średniodobowe wartości ROTI dla nocy i dnia porównał również z wartościami indeksu zorzowej aktywności geomagnetycznej (Kp). Doktorant zauważył, że ekspansja okołozorzowych nieregularności jonosferycznych do niższych szerokości geograficznych związana jest z globalnymi zaburzeniami pola magnetycznego. Autor dokonał również oceny możliwości badania struktur jonosferycznych za pomocą własnych map ROTI względem innych technik obserwacyjnych. Ciekawe wyniki Doktorant uzyskał porównując mapy ROTI z wynikami pomiarów *in situ* satelity Swarm. Doktorant uzyskał dobrą zgodność obu wyników, a zauważone rozbieżności przypisał różnym wysokościami, do których odnoszą się wyniki GNSS i Swarm. Jako uzupełnienie informacji o stanie jonosfery Doktorant wskazał również mapy  $\Delta$ TEC, przedstawiające przemieszczające się zaburzenia jonosferyczne, za pomocą których można badać większe struktury niż za pomocą map ROTI. Doktorant uzupełnił swoją rozprawę również o wyniki scyntytacji jonosferycznych wyznaczonych za pomocą technik GNSS i LOFAR, które z kolei pozwalają badać struktury o mniejszych skalach.

Część merytoryczną i wykonane analizy oceniam bardzo wysoko. Doktorant wykazał się dużą umiejętnością samodzielnej pracy badawczej, opracowania wyników oraz ich dogłębnej analizy i interpretacji. W mojej ocenie Doktorant zrealizował cel rozprawy doktorskiej a wyniki wszechstronnych badań potwierdziły postawioną tezę. Rozprawa stanowi bardzo wartościową monografię w zakresie badania nieregularności jonosferycznych.

Należy również podkreślić, że prace, które Doktorant wykonał w ramach swojej rozprawy doktorskiej były prowadzone w ramach współpracy międzynarodowej z Jonosferyczną Grupą Roboczą IGS oraz w projekcie ARTEMIS. Ponadto, mapy ROTI czasu rzeczywistego, które Doktorant opracował w niniejszej rozprawie mogą w niedalekiej przyszłości mogą stać się częścią oficjalnych produktów jonosferycznych IGS.

### **Uwagi szczegółowe**

W rozdziale 2 na stronie 44 (w podrozdziale 2.2 „Międzynarodowa Służba GNSS – IGS i jonosferyczna grupa robocza”) Doktorant napisał, że jednym z najważniejszych zadań służby IGS jest tworzenie i utrzymywanie Międzynarodowego Ziemijskiego Układu Odniesienia (ITRF). Niestety jest to pewna nieścisłość ponieważ IGS jedynie wspiera tworzenie ITRF poprzez dostarczanie dobowych rozwiązań współrzędnych GNSS, natomiast układ ITRF jest tworzony przez służbę IERS (a konkretnie przez Centrum ITRS służby IERS, które mieści się w IGN we Francji). Ponadto, we wspomnianym podrozdziale Doktorant umieścił także sieci EPN, UNAVCO i ASG-EUPOS, które lepiej by było opisać w osobnym podrozdziale.

Na stronie 56 podpisy do rysunków 3.3a, 3.3c i 3.3d są nieprawidłowe. Pod rysunkiem 3.3a jest podpis „Bezpośredni wynik zróżnicowanej w czasie kombinacji  $\Phi_{GF}$ ”, ale wydaje się, że są to obserwacje niezróżnicowane w czasie (jest to taki sam wykres jak na rysunku 3.1). Dla rysunku 3.3c powinno być „Wyznaczenie pionowych wartości TEC” zamiast „Wyznaczenie pionowych wartości ROT”. Dla

rysunku 3.3d powinno być np. „Wyznaczenie wartości ROT” zamiast „Wykluczenie obserwacji poniżej 20° maski elewacji”.

Na str. 65 Doktorant napisał, że na Rys. 3.10a i 3.10b wyraźnie odznaczają się wysokie wartości ROTI, czyli większe niż 1 TECU/min. Niemniej na mapach ROTI Autor używa skali w zakresie od 0 do 1 TECU/min.

Autor przedstawia na rysunkach mapy ROT „w jednej 5-minutowej epoce”, jednak nie wyjaśnia jakie dokładnie wartości są prezentowane. Prawdopodobnie zostały zaprezentowane 1-minutowe wartości ROT podczas wybranego okresu 5 minut, ale należałoby to w pracy wyjaśnić.

Obserwacje GNSS ze stacji permanentnych IGS i EPN standardowo są udostępniane w interwale 30 sekund, a obserwacje w strumieniu RTCM w interwale nawet 1 sekundy. Z rozprawy natomiast nie wynika jaki interwał obserwacji GNSS jest wykorzystywany do wyznaczania parametru ROT i również należałoby to wyjaśnić.

Praca zawiera kilka błędów edytorskich, np. brak kropki, lub przecinek zamiast kropki na końcu zdania (str. 54, 68, 114), czy brak spacji pomiędzy wartością liczbową a jednostką miary (np. str. 30, 34, 37). Zawiera również uchybienia typograficzne, jak pozostawianie na końcach linii wyrazów jednoliterowych, czy liczb, po których występują skróty nazw jednostek miar.

Na stronie 67 powinno być „RINEX” zamiast „RINES”.

Niektóre pozycje (w liczbie 12) w spisie literatury zawierają jedynie tytuły prac, nazwiska autorów i rok publikacji, nie zawierają natomiast szczegółów dotyczących czasopisma czy innej publikacji, w którym dany artykuł został opublikowany.

Niemniej powyższe uwagi i nieścisłości nie mają istotnego wpływu na badania i wyniki zamieszczone w rozprawie.

## **Wnioski końcowe**

Na podstawie analizy przedstawionej mi do recenzji rozprawy doktorskiej mgr inż. Kacpra Kotulaka stwierdzam, że Doktorant w sposób oryginalny rozwiązał problem naukowy oraz wykazał się umiejętnością samodzielnego prowadzenia pracy naukowej. Autor rozprawy wykazał się również ogólną wiedzą teoretyczną na wysokim poziomie. Rozprawa stanowi bardzo wartościową monografię w zakresie badania nieregularności jonosferycznych. Wobec powyższego stwierdzam, że rozprawa doktorska mgr inż. Kacpra Kotulaka „*Multiinstrumentalna diagnostyka różnoskalowych nieregularności jonosferycznych*” spełnia wymogi stawiane pracom doktorskim określone w Ustawie z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. Nr 65 poz. 595) z późniejszymi zmianami w brzmieniu z dnia 15 września 2017 r. (Dz. U. 2017 r. poz. 1789.), zgodnie z Art. 175. 1. Ustawy z dnia 3 lipca 2018 r. Przepisy wprowadzające ustawę – Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce<sup>1</sup> (Dz.U. 2018 poz. 1669). Wnioskuje zatem o przyjęcie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kacpra Kotulaka oraz dopuszczenie jej do dalszych czynności w postępowaniu o nadanie stopnia naukowego doktora i publicznej obrony.

*Tomasz Diwon*