

Wydział Inżynierii Środowiska i Geodezji  
Uniwersytetu Rolniczego  
im. Hugona Kołłataja w Krakowie  
oraz  
Centrum Badań Kosmicznych PAN  
w Warszawie

**Recenzja rozprawy doktorskiej pt. "*Integracja modeli troposfery uzyskanych z danych GNSS i meteorologicznych z Numerycznymi Modelami Prognozy Pogody na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania*"**

Opinię niniejszą opracowano na zlecenie Dziekana Wydziału Kształtowania Środowiska i Geodezji Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu. Podstawę do przygotowania opinii stanowiło streszczenie rozprawy doktorskiej w języku polskim i angielskim, w której przedstawiony został jedno tematyczny cykl 4 opublikowanych artykułów z listy A:

[1] Wilgan K, Rohm W, Bosy J (2015) Multi-observation meteorological and GNSS data comparison with Numerical Weather Prediction model, Atmospheric Research, Vol. 156, s. 29-42, IF=3.377, lista A MNiSW 30 pkt., udział 75%

[2] Wilgan K (2015) Zenith total delay short-term statistical forecasts for GNSS Precise Point Positioning, Acta Geodynamica et Geomaterialia, Vol. 12, No. 4 (180), s. 345-354, IF=0.561, lista A MNiSW 20 pkt.

[3] Wilgan K, Hurter F, Geiger A, Rohm W, Bosy J (2017) Tropospheric refractivity and zenith path delays from least-squares collocation of meteorological and GNSS data, Journal of Geodesy, Vol. 91, No. 2, s. 117–134, IF = 2.486, lista A MNiSW 40 pkt., udział 60%

[4] Wilgan K, Hadaś T, Hordyniec P, Bosy J (2017) Real-time precise point Positioning augmented with high-resolution numerical weather prediction model, GPS Solutions, July 2017, Volume 21, Issue 3, pp 1341–1353 doi:10.1007/s10291-017-0617-6 IF = 2.991, lista A MNiSW 35 pkt., udział 45%

W przedstawionych publikacjach mgr inż. Karina Wilgan jest pierwszą autorką, a jedna z prac jest jedno autorska co wskazuje na jej znaczący udział w ich przygotowaniu.

Przedłożona praca doktorska łączy w sobie zagadnienia związane z geodezją jak i meteorologią, które w ciągu ostatnich kilkudziesięciu lat rozwijane były oddzielnie. Połączenie to staje się coraz bardziej korzystne dla geodezji gdyż informacja na temat parametrów troposfery pozwala nie tylko z większą dokładnością wyznaczać poprawki do mierzonych pseudoodległości w technice GNSS, ale również pozwala wprowadzać poprawki troposferyczne do obserwacji w technikach: laserowych pomiarach odległości do satelitów, radiointerferometrii długich baz, altimetrii

satelitarnej czy też satelitarnej interferometrii radarowej. Obserwacje GNSS, których rozdzielczość czasowa i przestrzenna cały czas wzrasta, ze względu na wzrastającą liczbę pomiarów dzięki rozwojowi technik globalnego pozycjonowania GNSS, pozwalają wyznaczać zawartość pary wodnej w atmosferze co staje się korzystne dla budowania coraz dokładniejszych modeli meteorologicznych.

Wykorzystanie Numerycznych Modeli Prognozy Pogody (NWP) takich jak: modele globalne GFS (Global Forecast System) i ECMWF (European Centre for Medium Weather Forecasts) oraz modele regionalne HIRLAM (High Resolution Limited Area Model), COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System) czy też WRF (Weather Research and Forecasting) nie zapewniają ani wysokiej rozdzielczości czasowej ani przestrzennej parametrów troposfery, więc konieczna jest integracja danych z tych modeli z produktami GNSS pochodzącymi z analiz w czasie prawie-rzeczywistym.

Celem pracy doktorskiej mgr inż. Kariny Wilgan było zbudowanie homogenicznego, wysokorozdzielczego w czasie i przestrzeni modelu troposfery dla terenu Polski na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania GNSS. Precyzyjne pozycjonowanie techniką GNSS np. w metodzie statycznej wymaga znajomości dokładnego modelu troposfery natomiast w czasie rzeczywistym np. metodą RTK (Real Time Kinematic) wymaga dokładnej prognozy tego modelu. W tezie pracy doktorskiej zawarta jest informacja, że zoptymalizowane modele NWP mogą zapewnić wymaganą dokładność wyznaczenia opóźnienia troposferycznego dla precyzyjnego pozycjonowaniu GNSS w czasie rzeczywistym.

Publikacje składające się na rozprawę doktorską dotyczą tej samej tematyki badawczej tworząc monotematyczny cykl związany z wykorzystaniem numerycznych modeli troposfery w celu wyznaczenia opóźnienia troposferycznego dla precyzyjnego pozycjonowaniu GNSS w czasie rzeczywistym. Zdobyte doświadczenia naukowe, jak również algorytmy obliczeniowe opracowane dla realizacji publikacji poprzednich są wykorzystywane w następnych publikacjach.

W pracy [1] porównane zostały dane meteorologiczne z modelu NWP COAMPS, które charakteryzują się wysoką rozdzielczością przestrzenną z następującymi danymi referencyjnymi: 1) wartościami opóźnienia troposferycznego ZTD (zenith total delay) wyznaczonymi z obserwacji GNSS 121 stacji sieci ASG-EUPOS, 2) parametrami meteorologicznymi na 15 stacjach sieci EPN (EUREF Permanent Network) oraz 3) parametrami meteorologicznymi w pionowych profilach atmosfery mierzonych za pomocą radiosondaży. W wyniku tych porównań znaleziona została optymalna metoda wyznaczenia wartości ZTD z danych dla modelu NWP COAMPS za pomocą kilku metod interpolacyjnych oraz wzorów deterministycznych. W pracy tej pokazano, że wartości opóźnienia troposferycznego obliczone tylko na podstawie danych NWP charakteryzują się niewystarczającą zgodnością z danymi referencyjnymi, niezależnie od zastosowanej metody interpolacji. Poprzez integrację danych NWP COAMPS z danymi GNSS oraz parametrami meteorologicznymi na stacjach sieci EPN i obserwacjami z radiosondaży zwiększona została dokładność danych NWP COAMPS. Ważnym wnioskiem pracy [1] było stwierdzenie, że modele troposfery NWP COAMPS pomimo wysokiej rozdzielczości czasowo-przestrzennej mają niewystarczającą dokładność dla pozycjonowania, więc należy zwiększyć ich dokładność poprzez integrację na przykład z danymi GNSS.

W jedno autorskiej pracy [2] przedstawione zostały algorytmy prognozujące wartości ZTD za pomocą modeli stochastycznych AR (autoregressive) i ARMA (autoregressive moving average). Wartości ZTD z danych GNSS obliczane są z opóźnieniem godzinnym w czasie prawie-rzeczywistym (NRT, ang. near real-time), dlatego w celu dostarczenia wartości ZTD w czasie rzeczywistym, np. dla pomiarów RTK, konieczna jest prognoza krótkoterminowa tych danych. Autorka pracy zaproponowała dwa modele prognozowania: globalny i lokalny. W modelu lokalnym każda stacja GNSS rozpatrywana była oddzielnie i miała własny stochastyczny model prognozy, natomiast w modelu globalnym wszystkie stacje miały ten sam model prognozy. Obliczone stochastyczne prognozy wartości ZTD porównane zostały z prognozami ZTD wyznaczonymi z deterministycznych ekstrapolacji modeli GPT2 (Global Pressure and Temperature, wersja 2) i NWP COAMPS. Autorka wykazała, że prognozy stochastyczne lepiej wpasowują się do przyszłych rzeczywistych wartości szeregów czasowych ZTD, a także, że globalny i lokalny model prognozowania są tak samo dokładne. Autorka proponuje więc wyznaczanie prognoz w podejściu globalnym gdyż znacznie ułatwia to automatyzację obliczeń wartości ZTD na wszystkich stacjach jednocześnie.

W artykule [3] zaproponowano zintegrowany model troposfery dla Polski i Szwajcarii z różnych źródeł danych wyznaczany metodą kolokacji najmniejszych kwadratów wykorzystującej oprogramowanie COMEDIE (Collocation of Meteorological Data for Interpretation and Estimation of Tropospheric Pathdelays), opracowane na Politechnice Federalnej w Zurychu. Zaletą tej metody jest łatwość łączenia ze sobą obserwacji pochodzących z różnych źródeł danych w celu zrekonstruowania wartości zadanego parametru troposfery w dowolnym miejscu i czasie. Dla Szwajcarii obliczono profile całkowitej refrakcyjności z trzech zbiorów danych wejściowych: 1) obserwacji z naziemnych stacji meteorologicznych, 2) obserwacji ze stacji meteorologicznych zintegrowanych z danymi ZTD GNSS oraz 3) obserwacji ze stacji meteorologicznych zintegrowanych z danymi ZTD GNSS z uwzględnieniem ich horyzontalnych gradientów. Stwierdzono, że najlepszy model całkowitej refrakcyjności opiera się na parametrach meteorologicznych z sieci naziemnych stacji, zintegrowanych z danymi GNSS. Dla Polski modele całkowitej refrakcyjności oraz wartości ZTD zostały obliczone na podstawie czterech zbiorów danych: 1) modelu NWP WRF, 2) modelu WRF zintegrowanego z ZTD GNSS, 3) ZTD GNSS, 4) modelu WRF, ZTD GNSS i naziemnych pomiarów meteorologicznych. Obliczone parametry zostały porównane z danymi referencyjnymi, którymi były profile refrakcyjności z radiosondaży oraz bezpośrednio pomiary ZTD na stacjach GNSS. Najbardziej dokładnym modelem, zarówno całkowitej refrakcyjności, jak i opóźnienia troposferycznego okazał się model oparty na danych NWP o rozdzielczości przestrzennej 10×10 km z 34 poziomami wysokości i rozdzielczości czasowej godzinnej, zintegrowanych z produktami GNSS. Zatem integracja danych NWP z danymi GNSS jest konieczna przy równoczesnym obliczaniu wartości całkowitej refrakcyjności oraz opóźnienia troposferycznego.

W artykule [4] model troposfery oparty na danych GNSS i parametrach meteorologicznych z modelu NWP, charakteryzujący się najwyższą dokładnością i przedstawiony w artykule [3] został wdrożony do oprogramowania GNSS-WARP (Wrocław Algorithms for Real-time Positioning), które tworzone jest w Instytucie

Geodezji i Geoinformatyki Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu w celu pozycjonowania metodą PPP w czasie rzeczywistym. Zastosowanie tego modelu troposfery w tym oprogramowaniu pozwoliło na dokładniejsze wyznaczenie składowych wysokościowych i poziomych współrzędnych punktów oraz skrócenie czasu konwergencji rozwiązania o 13% dla współrzędnych płaskich i o 20% dla składowej wysokościowej. W artykule zaproponowano także użycie funkcji mapujących obliczonych na podstawie modelu WRF, który charakteryzuje się wysoką rozdzielczością czasowo-przestrzenną z siatką horyzontalną 4 × 4 km i z 47 poziomami wysokości. Przeprowadzone zostały testy numeryczne w kilku wariantach z różnymi modelami a priori i różnymi funkcjami mapującymi, w wyniku czego obliczone zostały współrzędne, które porównane zostały z oficjalnymi współrzędnymi sieci EPN.

### **Uwagi szczegółowe**

W pierwszym zdaniu wprowadzenia na stronie 1 zamiast "ekscesu długości doby" powinno być "zmian długości doby ziemskiej".

W trzecim zdaniu wprowadzenia na stronie 1 zamiast "ze stacji referencyjnej wyrównujące pozycje pozostałych stacji" lepiej brzmiałoby "ze stacji referencyjnej poprawiające pozycje pozostałych stacji"

We wprowadzeniu na stronie 1 zamiast "... opóźnienie sygnału GNSS podczas przechodzenia przez atmosferę na drodze satelita – odbiornik" powinno być "... opóźnienie sygnału GNSS podczas przechodzenia przez atmosferę na drodze satelita – antena odbiornika"

We wprowadzeniu na stronie 2 w dwóch kolejnych zdaniach rozpoczynających się od "Ponadto, opóźnienie troposferyczne w kierunku zenitu..." zamiast "współrzędną wysokościową odbiornika " powinno być "współrzędną wysokościową mierzonego punktu ".

Na stronie 4 skróty ZWD, ZHD, EIG EUMETNET, AR i ARMA nie zostały objaśnione w języku angielskim.

Na stronie 4 w zdaniu "Przy opracowaniu prognoz wykorzystano modele statystyczne: autoregresji (AR) oraz autoregresji i ruchomej średniej (ARMA)." słowo "statystyczne" należałoby zastąpić słowem "stochastyczne". Kolejne zdanie "Modele te są szeroko stosowane w innych naukach przyrodniczych (geofizyka, hydrologia, meteorologia), natomiast rzadko w geodezji." jest nieprawdziwe gdyż stochastyczne modele AR i ARMA są wykorzystywane w geodezji do prognozowania parametrów ruchu obrotowego Ziemi, a także do wyznaczania widm mocy np. metodą MESA (maximum entropy spectral analysis) ze współczynników autoregresji. Na końcu strony 4 w zdaniu "W modelu globalnym jeden model statystyczny obowiązywał dla każdej stacji." stwierdzenie "model statystyczny" należy zamienić na "model stochastyczny". W kolejnym zdaniu "Otrzymane predykcje porównano z innymi prognostycznymi źródłami danych: deterministycznym modelem GPT2 oraz modelem NWP COAMPS." słowo "predykcje" należałoby zastąpić słowem "prognozy", natomiast stwierdzenie "deterministycznym modelem" należałoby zastąpić "ekstrapolacją modelu deterministycznego".

## Podsumowanie

Przedstawiona do recenzji rozprawa doktorska prezentuje wysoki poziom merytoryczny. Autorka przedstawiła zagadnienia związane z szeroko pojętym modelowaniem parametrów troposfery, w których wykazała, że posiada niezbędną wiedzę teoretyczną i specjalistyczną w zakresie uprawianej dyscypliny naukowej, a także posiada umiejętność samodzielnego prowadzenia pracy naukowej, a co najważniejsze umiejętność współdziałania w większej grupie dla realizacji bardziej ambitnych programów naukowych. Doświadczenia autorki stanowią bardzo dobrą podstawę do kontynuowania tych badań w celu uzyskania bardziej dokładnych modeli troposfery, szczególnie w czasie występowania ekstremalnych zjawisk pogodowych, na potrzeby precyzyjnego pozycjonowania. Poprawianie modeli troposferycznych służy również meteorologii dzięki czemu pomiary GNSS stają się coraz bardziej użyteczne do prognozowania pogody.

Warto zaznaczyć, że mgr inż. Karina Wilgan jest członkiem międzynarodowej grupy studiów JSG 0.14: Fusion of multi-technique satellite geodetic data przy Inter-Commission Committee on Theory (ICCT) Międzynarodowej Asocjacji Geodezyjnej.

Uwagi krytyczne wyrażone w niniejszej recenzji nie wpływają na wysoką ocenę rezultatów przedstawionych w rozprawie doktorskiej Pani mgr inż. Kariny Wilgan.

Stwierdzam, że przedstawiona rozprawa mgr inż. Kariny Wilgan w pełni spełnia warunki stawiane pracom doktorskim określone w art. 13 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. 2003, Nr 65, poz. 595, ze zm.) oraz § 6 Rozporządzenia Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego z dnia 22 września 2011 r. w sprawie szczegółowego trybu i warunków przeprowadzania czynności w przewodach doktorskich .. i wnoszę o dopuszczenie autorki do dalszych etapów przewodu doktorskiego. Ze względu na ważność tematyki badawczej, a także ogromne zaangażowanie doktorantki w działaniach zmierzających do poprawiania meteorologicznych modeli troposfery poprzez ich integrację z danymi ZTD GNSS wnoszę o wyróżnienie rozprawy doktorskiej mgr inż. Kariny Wilgan.

