

2. Autoreferat

Po ukończeniu studiów magisterskich na Wydziale Chemii i Fizyki technicznej Wojskowej Akademii Technicznej (WAT) rozpocząłem pracę w kierowanym przez płk. prof. dr. hab. inż. Stanisława Pachutę Instytucie Geodezji i Meteorologii Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji WAT. Moje pierwsze badania związane były z zagadnieniami teledetekcji. Dotyczyły one przetwarzania danych (obrazów wielospektralnych) satelitów geostacjonarnych METEOSAT Europejskiej Agencji Eksploatacji Satelitów Meteorologicznych – EUMETSAT oraz analiz zależności między wielkością widocznego na zdjęciach satelitarnych zachmurzenia i składowymi bilansu promieniowania dla stacji aktynometrycznych na terenie Polski. Prace te realizowane były w ramach badania dynamiki atmosfery pod kierunkiem prof. dr. hab. inż. Cz. Rymarza.

W 1987 r. zostałem skierowany na półroczny staż naukowy, który odbyłem w Instytucie Meteorologii i Hydrologii. Celem stażu w Zakładzie Prognoz Średnioterminowych (kierownik zakładu dr B. Jakubiak) było zapoznanie się z metodami analizy numerycznej szeregów danych geofizycznych. Jego skutkiem było wykorzystanie analizy fraktalnej do wyznaczania wymiarów korelacyjnych szeregów czasowych geopotencjału powierzchni izobarycznych. Jednocześnie zajmowałem się zagadnieniami propagacji zanieczyszczeń. Efektem wykonanych prac była między innymi *„Analiza rozkładu emiterów i propagacji zanieczyszczeń z uwzględnieniem klas stabilności atmosfery dla potrzeb instalacyjnych lidarów ramanowskiego w Mazowieckich Zakładach Rafineryjno Petrochemicznych”*, 1989 r. W 1989 r. odbyłem roczną praktykę w Centralnym Biurze Hydrologicznym Pyry. Zajmowałem się wówczas problemami dowiązania geograficznego i wizualizacją danych synoptycznych przedstawianych w postaci ploterowych map numerycznych. Zebrane w okresie stażu i praktyki spostrzeżenia były przyczynkiem do prac związanych z ujednoczeniem odwzorowań kartograficznych informacji meteorologicznych pochodzących z różnych źródeł, tj. obrazów satelitarnych, danych synoptycznych i pól prognostycznych modeli numerycznych pogody ośrodków Bracknell i Offenbach. Ich odzwierciedleniem są sprawozdania, artykuły, projekty badawcze, których byłem współwykonawcą (*Kroszczyński K., Winnicki I.*), *„Konstrukcja układu odniesienia do jednoczesnej interpretacji zdjęć satelitarnych i danych meteorologicznych typu GRID”*, Biul. WAT, XLV, 10–11, 1996, (*Kroszczyński K., Winnicki I.*), *„Algorytm zobrazowania zdjęć satelitarnych”*, Biul. WAT, XLV, 10-11, 1996, (*Barnat A., Jasiński J., Kroszczyński K., Rymarz Cz., Winnicki I.*), *„Badanie dynamiki atmosfery z uwzględnieniem zdjęć satelitarnych”*, Sprawozdanie dla KBN z zakończenia realizacji projektu badawczego Nr 2 Z6Z6 012 03p 15, (*Barnat A., Jasiński J., Kroszczyński K., Rymarz Cz., Winnicki I.*), *„Badanie globalnych i lokalnych stanów stabilności atmosfery z wykorzystaniem zdjęć satelitarnych”*, Sprawozdanie z realizacji ZBW-27, WIC/RWD25/10, 96. Podkreśleniem tych prac była nagroda Rektora WAT, 1996 (*Barnat A., Kroszczyński K., Winnicki I.*) za opracowanie *„Systemu wspomaganie pracy synoptyka wykorzystujący dane grid i zdjęcia satelitarne”*.

Ten okres badań pozwolił także na skonkretyzowanie moich zainteresowań w dziedzinie nieliniowych układów dynamicznych, a w konsekwencji napisania pod kierunkiem płk. prof. dr. hab. Ireneusza Winnickiego pracy doktorskiej pt. *„Analiza zbiorów fraktalnych teledetekcyjnych szeregów danych meteorologicznych”*. Treścią pracy było wykorzystanie teorii nieliniowych, konstruowanych w oparciu o dane pomiarowe, układów dynamicznych do śle-

dzenia dynamiki pogody i klimatu. Opierając się na technice zanurzenia (Takens, 1981), podjęto próbę rekonstrukcji przestrzeni fazowych i trajektorii układów dynamicznych na podstawie 30-letnich szeregów pomiarów geopotencjału. Głównym celem rozprawy było wyznaczenie charakterystyk dziwnych atraktorów tj., ich wymiarów korelacyjnych oraz miar niestabilności trajektorii - współczynników Lapunowa. Rozprawa, która dotyczyła badań podstawowych, poddana została ocenie środowiska naukowego przez ich prezentację w postaci artykułów, referatów na konferencjach krajowych, sprawozdań z realizacji prac badawczych oraz seminariów („Globalne i lokalne własności atraktora klimatycznego dla terenu Europy”, Instytut Geofizyki PAN 1997, „The properties of strange attractor reconstructed from the time series of tropospheric mean temperature”, Journal of Technical Physics, 41, 2000). Praca doktorska była dofinansowana przez Komitet Badań Naukowych (pierwszy grant promotorski w WAT). Projekt badawczy został zakończony i rozliczony. Pod względem merytorycznym pracę i jej wyniki zaakceptował Zespół Nauk Biologicznych, Nauk o Ziemi i Ochrony Środowiska. Sekcja P04F oceniła projekt pozytywnie wystawiając ocenę „bardzo dobry”. Praca zdobyła III nagrodę w konkursie na najlepszą pracę doktorską 1997 roku. Po obronie pracy (13.03.1997 r., doktor nauk technicznych, geodezja i kartografia, specjalność – teledetekcja) uzyskałem stanowisko adiunkta (1998 r.) na Wydziale Inżynierii, Chemii i Fizyki Technicznej WAT.

W tym czasie pracowałem także nad metodami łączenia zdjęć satelitarnych i pól meteorologicznych na siatkach regularnych (Kroszczyński K., Winnicki I.), „Konstrukcja siatek do zobrazowań zdjęć satelitarnych i danych GRID”, III Konf. Problemy Automatyzacji w Geodezji Inżynierskiej, Warszawa, 1997). Metody te: „Algorytm zobrazowania zdjęć satelitarnych w projekcjach kartograficznych”, „A universal algorithm for geostationary satellite images presentation in cartographic projections” przedstawiono (Kroszczyński K., Winnicki I.) w pracach prezentowanych na konferencjach krajowych i sympozjach (III Symposium on Military Meteorology, Hydrometeorological services role in peace keeping operations, 18/19. November 1998 Warsaw). Prace te pozwoliły na odpowiednie zilustrowanie i interpretację zjawisk meteorologicznych w wybranych projekcjach kartograficznych. Metody te zostały wykorzystane w monografii: „Obrazy satelitarne procesów atmosferycznych kształtujących pogodę”, PWN, Warszawa 1999 (Jasiński J., Kroszczyński K., Rymarz Cz., Winnicki I.). Za wydanie monografii zespół autorów pod kierownictwem prof. dr. hab. inż. C. Rymarza uzyskał w 1999 r. nagrodę Rektora WAT.

Istotnym efektem prowadzonych badań był oparty o uwspólnione projekcje kartograficzne, komputerowy system wzajemnej analizy produktów modeli prognostycznych i zdjęć satelitów geostacjonarnych METEOSAT. Został on zaprezentowany: „Meteosat image and grid data analysis system” na 16th International Conference on Interactive Information and Processing Systems (IIPS) for Meteorology, Oceanography, and Hydrology, 2000, Long Beach, California, USA. Referat konferencyjny został wydany w Book Group Autor(s) American Meteorology Society – AMS. Badania związane z opracowaniem systemów zabezpieczenia meteorologicznego w tym działań wojsk są kontynuowane i rozwijane do dziś. Mają one odzwierciedlenie w szeregu prac: „Software application for preparation of meteorological data analysis”, 31th Conference on Broadcast Meteorology, Williamsburg, Virginia, 2002 (referat konferencyjny został wydany przez AMS), „Meteosat satellite images transformation to UMPL mesoscale model projection”, V International Symposium on Military Meteorology

2003, Poznań-Kiekrz, „Wind field over sea analysis and forecast based on NWP model data and digital satellite imagery”, 2004, International Scientific and Technical Conference, Gdynia, „*Meteorological Models Role in Support of Military Operations*” i „*Military Operations Support Module*”, Polish Journal of Environmental Studies, 2007, (Figurski M., Kroszczyński K., Winnicki I.). W artykułach tych przedstawiono możliwości wykorzystania meteorologicznych produktów modeli mezoskalowych i zdjęć satelitarnych w celu wsparcia procesu decyzyjnego działań lotnictwa i zabezpieczenia działań rodzajów wojsk. Zaprezentowano także wyniki prac związanych z uruchomieniem modelu mezoskalowego COAMPS (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System).

Uzyskane doświadczenia skutkowały także zlecaniem przez Komisję Wypadków Lotniczych ekspertyz w zakresie analizy numerycznej: „*Analiza stanu warunków atmosferycznych na trasie przelotu samolotu Iskra Ts11 Mińsk Mazowiecki – Warszawa*”. 1998 r., „*Analiza stanu warunków atmosferycznych na trasie przelotu śmigłowca Mi-8 Wrocław – Warszawa w dniu 04.12.2003*” (wypełnienie lotniczy premiera L. Millera), opracowanie numeryczne wyników modelu mezoskalowego UMPL – Unified Model for Poland Area w celu „*Analizy stanu warunków atmosferycznych na trasie Gdynia – Łębork w dniu 20.04.2004 r. na podstawie danych modelu mezoskalowego*”.

Prowadzone w tym okresie prace znalazły także odzwierciedlenie w projektach badawczych finansowanych ze środków Komitetu Badań Naukowych: „*System wspomagania analizy danych satelitarnych w wojskowych biurach meteorologicznych*” – grant zwykły Nr 0T00A 004 1999-2001, WAT, wykonawca, „*System wspomagania analizy danych satelitarnych w wojskowych biurach meteorologicznych*” – grant zwykły Nr 0T00A 004 17, 1999-2001, WAT, główny wykonawca, „*Moduł mezoskalowych prognoz pogody dla potrzeb hydrometeorologicznego zabezpieczenia działań wojsk*” – grant zwykły Nr 0 T00A 067 2000-2002, WAT, główny wykonawca, „*System meteorologicznego wspomagania procesów decyzyjnych w dowodzeniu działaniami lotnictwa*” – grant zwykły, Nr 0T00A 002 22, 2002-2003, WAT, (główny wykonawca). Zrealizowałem także zadania badawcze: PBW 955: „*Operacyjne wykorzystanie mezoskalowych modeli dynamiki atmosfery w systemach wsparcia meteorologicznego RSZ*”, 2004-2005 r. W pracach tych modele meteorologiczne traktowane są jako dynamiczne systemy informacji przestrzennej.

Od 2004 r., będąc jednocześnie kierownikiem Zakładu Obrony przed Bronią Masowego Rażenia Wydziału Techniki Wojskowej WAT, brałem czynny udział w pracach Katedry Geodezji Wydziału Inżynierii Chemii i Fizyki Technicznej. Moim celem było operacyjne wyznaczenie funkcji odwzorowujących opóźnienia skośnego GNSS w oparciu o dane (przestrzenne rozkłady ciśnienia, temperatury i pary wodnej) niehydrostatycznych mezoskalowych modeli atmosfery typu COAMPS i WRF (Weather Research and Forecasting). Model COAMPS został uruchomiony (Figurski M., Kroszczyński K.) na klastrze komputerowym IA64 Feniks Wydziału Inżynierii Lądowej i Geodezji Wojskowej Akademii Technicznej. Byłem jednym z pomysłodawców projektu i członków zespołu wdrażającego klaster w Katedrze Geodezji. Ten etap badań sformalizowano w pracach: „*Wybrane problemy analizy falkowej zmian współrzędnych GPS*” (pokazano występowanie w sygnale nieodfiltrowanej oscylacji Chandlera) – Seminarium, *Satelitarne metody wyznaczania pozycji we współczesnej geodezji i nawigacji*, EGNOS Workshop, Kraków, 2004, „*Monitoring of permanent GPS stations at the Sudety Mountains*” i „*Mesoscale functions of GPS slant delay*” w *Acta Geodynamica et Geo-*

materialia, 2007 (Figurski M., Kroszczyński K.), „Badanie przepływów mezoskalowych w kontekście modelowania refrakcji atmosferycznej dla systemów GNSS”, PBW 937, 2006-2007 r., kierownik pracy. Zrealizowane prace stanowiły przyczynek do wystąpienia i otrzymania projektu badawczego habilitacyjnego MNiSW „Nowe metody operacyjnego wyznaczania troposferycznego opóźnienia skośnego GPS w oparciu o dane analiz i prognoz mezoskalowych, niehydrostatycznych modeli atmosfery”, N N526 2307 33, 2007-2011. Projekt rozliczono. Otrzymane wyniki prezentowano na konferencjach krajowych i międzynarodowych: „Mesoscale Anisotropy of GPS Slant Delay” – Symposium of the IAG Subcommission for Europe (EUREF), Brussels, 2008, poster; „Fast Marching method for GPS delay determination”, Generalne Zgromadzenie European Geosciences Union (EGU), Vienna, 2010, poster; „Modelling of mesoscale tropospheric delay functions” – Sympozjum EUREF, Gävle, 2010, poster; „Investigation of temporal and spatial distribution of slant delay for low elevation angles on the basis of mesoscale weather model data” – XXV International Union of Geodesy and Geophysics, Melbourne, 2011, poster; „Opóźnienia czasowe propagacji fal GPS w troposferze – Przegląd Telekomunikacyjny” 86, 282-286, 2013. Uzyskane w trakcie realizacji projektu habilitacyjnego dane umożliwiły także uczestnictwo w pracach związanych z tomografią GNSS atmosfery: „The calibration of mesoscale numerical weather prediction model NWP with the local meteorological observation for the local GNSS tomography”, AGU Fall Meeting San Francisco, 2008; „Integration and verification of meteorological observations and NWP model data for the local GNSS tomography”, Atmospheric Research 96, 2010 (Bosy J., Rohm W., Borkowski A., Kroszczyński K., Figurski M.). Pozwoliły również na badanie wpływu różnych funkcji odwzorowujących na wyznaczenie pozycji: „Results of the application of tropospheric correction from different troposphere models for precise GPS rapid static positioning”, Acta Geophysica 60(4), 2012 (Wielgosz P., Paziewski J., Krankowski A., Kroszczyński K. and Figurski M.). Wyniki pracy wykorzystano także w projekcie badawczym rozwojowym NCBiR, umowa nr 0960/R/T02/2010/10, „Budowa modułów wspomagania serwisów czasu rzeczywistego systemu ASG-EUPOS”, 2010-2013, w którym byłem wykonawcą.

Jestem zaangażowany również w działalność dydaktyczną. W 1994 r. zostałem asystentem w zespole pracowników naukowo-dydaktycznych. Prowadzę zajęcia ze studentami specjalności geodezyjnych i meteorologii.

2.1. Monografia

Moje osiągnięcie, zgodne z wymogami wynikającymi z art. 16.1 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. nr 65, poz. 595 ze zm.) stanowi dzieło opublikowane w całości pt. „Mezoskalowe funkcje odwzorowujące opóźnienia troposferycznego sygnałów GNSS”, Redakcja Wydawnictw Wojskowej Akademii Technicznej, Warszawa 2013, ISBN: 978-83-62954-99-5, (załączone do dokumentacji).

2.1.1. Sformułowanie tematyki i problemu naukowego

W precyzyjnym wyznaczaniu położenia techniką GNSS (Global Navigation Satellite System) istotną rolę pełni zjawisko refrakcji atmosferycznej. Wpływ ciśnienia, temperatury,

a przede wszystkim wilgotności spowalnia, rozprasza i zmienia kierunek sygnału GNSS. W konsekwencji działania tych czynników czas jego propagacji od satelity do odbiornika jest dłuższy niż w próżni. Części tego wydłużenia, które związane są przede wszystkim z dolnymi pogodotwórczymi warstwami atmosfery, nazywane są opóźnieniami lub poprawkami troposferycznymi skośnymi. Z uwagi na niedyspersyjność fal GNSS w troposferze opóźnienia skośne nie mogą być wyeliminowane, dlatego występują w równaniach obserwacyjnych w charakterze dodatkowych niewiadomych. W danej epoce pomiarowej jest ich tyle, ile widocznych ze stacji satelitów GNSS. Z obliczeniowego punktu widzenia jest to sytuacja niekorzystna, skutkująca często złym uwarunkowaniem macierzy obserwacyjnej. W celu redukcji niewiadomych opóźnienia skośne wyrażane są przez opóźnienia zenitalne, obliczane wraz z innymi parametrami geodezyjnymi w procesie estymacji rozwiązań układów obserwacyjnych. Obecnie związek obu opóźnień jest realizowany poprzez funkcje odwzorowujące, które rzutują opóźnienia zenitalne na kierunki do satelitów. W praktyce opóźnienia skośne/zenitalne są dzielone na części – wolnozmienną (hydrostatyczną) i szybkozmienną, trudną do modelowania (mokrą). W konsekwencji każda z tych części reprezentowana jest iloczynem odpowiednich opóźnień zenitalnych (ZHD/ZWD – *zenith hydrostatic/wet delay*) i funkcji odwzorowujących rzutujących je na kierunki wyznaczone kątami elewacji obserwacji. ZHD można określić dokładnie na podstawie pomiarów wartości ciśnienia w miejscu stacji GNSS, więc jedyną niewiadomą analizy obserwacji GNSS jest w tym przypadku opóźnienie zenitalne mokre. Wartości mokrych funkcji odwzorowujących występują wówczas w roli pochodnych cząstkowych macierzy układu równań obserwacyjnych. Ostatecznie opóźnienie zenitalne estymowane dla danej stacji i epoki pomiarowej jest przekształcane w zbiór opóźnień skośnych, co daje pożądaną efekt zmniejszenia liczby niewiadomych. Jeszcze kilka lat temu w dostępnych pakietach oprogramowania Bernese (*Dach i in.*, 2007), GAMIT-GLOBK (*King i Bock*, 2005) używano głównie funkcji odwzorowujących Niella (*Niell*, 1996). Współczynniki tych funkcji wyznaczono metodą najmniejszych kwadratów w oparciu o zbiory wybranych profili modelu standardowej atmosfery i zweryfikowano, korzystając z danych radiosondaży aerologicznych. Taki pośredni sposób określenia opóźnień skośnych, z powodu nieuwzględniania bieżącego stanu atmosfery, obarczony był dużym błędem systematycznym, zwłaszcza dla satelitów o małych kątach elewacji. Z tej przyczyny zwrócono uwagę na możliwość operacyjnego wyznaczania funkcji odwzorowujących na podstawie danych meteorologicznych, dostarczanych przez prognostyczne globalne modele pogody (*Niell*, 2001). Kontynuacją prac Niella były badania przedstawione w opracowaniu (*Boehm i in.*, 2006a), gdzie wykorzystano w tym celu model Europejskiego Centrum Prognoz Średnioterminowych (ECMWF – European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). Dyskretne funkcje odwzorowujące określono dla siatki globalnej i stacji międzynarodowych serwisów IGS (International GNSS Service), IVS (International VLBI Service) i IDS (International DORIS Service). Zauważono (*Boehm i in.*, 2006a), że wprowadzenie funkcji odwzorowujących istotnie poprawiło wyniki wyznaczeń długości baz VLBI i wysokości stacji referencyjnych GNSS. Podobnie w pracy (*Eresmaa i Jarvinen*, 2006) Fińskiego Instytutu Meteorologii do wyznaczania opóźnień skośnych i funkcji odwzorowujących zdefiniowano tzw. operator obserwacyjny. Wykorzystuje się w tym przypadku hydrostatyczny model mezoskalowy HIRLAM (High Resolution Limited Area Model). Model ten pracuje w oparciu o warunki graniczne dostarczane przez ECMWF. Używa się również modeli globalnych i regionalnych do wyznaczania powyższych

parametrów (*Ghoddousi-Farad i Dare, 2009*), a także mających podnieść precyzję rozwiązań funkcji gradientowych. W prowadzonych przez autora badaniach używa się natomiast danych niehydrostatycznych modeli mezoskalowych – COAMPS-NRL (Coupled Ocean/Atmosphere Mesoscale Prediction System-Naval Research Laboratory, *Hodur, 1997*) i WRF – The Weather Research and Forecasting. W odróżnieniu od modeli hydrostatycznych pozwalają one na bardziej adekwatną parametryzację zachodzących w atmosferze procesów fizycznych, np. istotnych dla propagacji fal GNSS przemian fazowych wody. Użycie modeli COAMPS oraz WRF jest perspektywiczne ze względu na ich systematyczny rozwój. Pod koniec 2010 roku wprowadzono nową, uruchomianą w Centrum Geomatyki Stosowanej Wojskowej Akademii Technicznej (CGS WAT) wersję modelu COAMPS. W przypadku modelu WRF w jego szybkim rozwoju uczestniczy bardzo aktywnie szereg najważniejszych instytucji meteorologicznych, np. National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), National Centers for Environmental Prediction (NCEP), Air Force Weather Agency (AFWA).

Wykorzystywane w prowadzonych przez autora badaniach niehydrostatyczne modele mezoskalowe o dużej rozdzielczości przestrzennej umożliwiają badanie skomplikowanej hydro-termodynamicznej struktury atmosfery oraz pozwalają śledzić dużą czasoprzestrzenną zmienność pól elementów meteorologicznych, przede wszystkim wilgotności. Zmienność ta jest przyczyną trudności w modelowaniu opóźnień sygnału GNSS. Modele te umożliwiają także lokalizację anizotropowego rozkładu wody, określając tym samym niejednorodności pól refrakcji atmosferycznej i związanych z nimi prędkości propagacji fal elektromagnetycznych GNSS. Generowane przez model mezoskalowy pola można użyć również do badania i symulacji ewolucji frontów promieniowania mikrofalowego w atmosferze. Uzyskane w ten sposób dane wykorzystane były w zaprojektowanym w pracy module analizy i dystrybucji troposferycznych poprawek czasu propagacji sygnałów GNSS.

Odpowiednie modelowanie opóźnień atmosferycznych w oparciu o dane niehydrostatycznych mezoskalowych modeli prognoz pogody jest niezwykle ważne dla kosmicznych technik geodezyjnych. Wyznaczanie opóźnień ma istotny wpływ na dokładność obliczeń parametrów geodezyjnych, przede wszystkim współrzędnych i prędkości stacji, służących do realizacji ziemskiego systemu odniesienia. W szczególności z nieodpowiednim modelowaniem opóźnienia troposferycznego mogą być bezpośrednio związane błędy wysokości stacji GNSS. Błędy te wpływają na realizację stabilnego i dokładnego ziemskiego układu odniesienia, który jest podstawą badań z zakresu nauk o Ziemi. Prowadzone w tym zakresie w pracy badania są zgodne z zasadniczym celem Globalnego Geodezyjnego Systemu Obserwacji (GGOS) Międzynarodowego Stowarzyszenia Geodezji (IAG) osiągnięcia 1 mm i 0.1 mm/rok dokładności dla położenia i prędkości stacji obserwacyjnych.

Istotę wykorzystania modeli mezoskalowych w geodezji ilustruje wpływ wyznaczanych w oparciu o nie poprawek troposferycznych na charakterystyki dokładnościowe satelitarnych technik pomiarowych. Przykładowo w technice SLR zaobserwowano 40% redukcję wartości residuów (*Hulley i Pavlis, 2007*), natomiast w GNSS (*Hobiger i in., 2008*) nastąpiła (1-10%) poprawa powtarzalności pozycji w stosunku do tych, które otrzymywano z użyciem rutynowych funkcji odwzorowujących z dodatkowym uwzględnieniem ich gradientów. Zauważono również istotną poprawę (do 30%) powtarzalności pozycji w przypadku stosowania numerycznych modeli pogody o dużej rozdzielczości przestrzennej. Jest ona widoczna zwłaszcza w przypadku złych warunków atmosferycznych (*Hobiger i in., 2010*). Badania

anizotropowego rozkładu opóźnień troposferycznych w takich warunkach przeprowadzono również w pracy (Figurski i Kroszczyński, 2007). Zaobserwowano także redukcję artefaktów estymacji czasu UT1 (Boehm i in., 2010). W technice InSAR wykorzystanie modeli meteorologicznych przyczynia się do poprawy interpretacji sygnałów geofizycznych, ponieważ umożliwia korektę deformacji danych teledetekcyjnych spowodowanych refrakcją atmosferyczną. Stwierdzono także (Hobiger i in., 2008), że wartości opóźnień troposferycznych skośnych, określone rozwiązaniami równania eikonału na podstawie danych mezoskalowych modeli pogody, mogą odpowiadać w 99% ich wartościom rzeczywistym. Uzyskana w ten sposób estymata całkowitego opóźnienia skośnego prowadzi do osiągnięcia milimetrowej dokładności wyznaczania położenia stacji GNSS metodą precyzyjnego punktowego pozycjonowania (PPP), (Hobiger i in. 2008). Dodatkowo w badaniach rozprzestrzeniania się fal GNSS można uwzględnić różne możliwości parametryzacji zjawisk fizycznych, np. turbulencji i konwekcji, wprowadzać modele mikrofizyki chmur, schematy transformacji i oddziaływania promieniowania atmosfery, istotne z punktu widzenia rozkładu wilgotności w atmosferze, w tym jej warstwy granicznej. Dysponując długimi szeregami czasowymi pól elementów meteorologicznych modelu mezoskalowego, określającymi stan troposfery w odpowiednio dużym otoczeniu miejsca obserwacji, można próbować wyznaczać zależne od czasu i przestrzeni macierze kowariancji opóźnień troposferycznych. Potraktowanie generowanego przez model prognostyczny stanu atmosfery, zwłaszcza w krótkich przedziałach czasu, jako rzeczywistego, pozwala przeprowadzić szereg badań, których nie można wykonać w oparciu o dane pomiarów parametrów meteorologicznych udostępniane przez stacje synoptyczne i aerologiczne. Realność tych stanów pogodowych może być dodatkowo weryfikowana podczas rutynowej pracy ośrodków meteorologicznych, np. Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej (IMGW). Dane modeli prognostycznych mogą służyć do prowadzenia wielowariantowych prac testowych w zakresie tomografii GNSS atmosfery (Bosy i in. 2010). Specyfika działania modeli mezoskalowych obejmuje bardzo istotny dla optymalnego prognozowania pogody proces asymilacji. Z jednej strony dane GNSS związane z zawartością pary wodnej w słupach atmosfery mogą być asymilowane do modelu, z drugiej lepsza prognoza stanu atmosfery skutkuje dokładniejszymi wartościami, wyznaczanymi w oparciu o uaktualnione dane opóźnień skośnych i współczynników prognostycznych funkcji odwzorowujących. Prowadzone prace zmierzają między innymi do uwzględnienia w działaniu operacyjnym modelu CO-AMPS czy WRF pomiarów wykonywanych np. przez stacje systemu ASG-EUPOS. Badania w tym kierunku są istotne, ponieważ zauważono (Boehm i Schuh, 2007), że dla większości stacji współczynniki hydrostatycznych funkcji odwzorowujących i opóźnienia zenitalnego mogą być bardzo dobrze prognozowane na okres 4–5 dni, natomiast współczynniki funkcji i opóźnień mokrych odbiegają znacznie od prognozowanych po 1 lub 2 dniach. Zapewnienie lepszej predaktybilności pól wilgotności prowadzi wprost do wykorzystania opóźnień zenitalnych i skośnych w analizach geodezyjnych czasu rzeczywistego. Należy zaznaczyć, że w przypadku spektralnego modelu globalnego ECMWF wyznaczane są funkcje prognostyczne (<http://www.hg.tuwien.ac.at/~ecmwf1>), które udostępniane są bezpłatnie tylko w celach naukowych i dydaktycznych.

Z przedstawionych przez autora badań wynika, że wartości opóźnień zenitalnych i skośnych mogą być zależne od rozdzielczości siatki obliczeniowej. Stosowana obecnie w spektralnym modelu globalnym ECMWF siatka (rozdzielczość $0.36^\circ \times 0.36^\circ$, tj. ~ 40 km)

może nie być wystarczająca do modelowania odpowiednich charakterystyk propagacji fal GNSS w zastosowaniach czasu rzeczywistego. W badaniach własnych wykorzystano siatki modeli mezoskalowych o rozdzielczości 13 km, 4,3 km i 1,44 km. Posłużyły one do określenia anizotropii rozkładów opóźnienia skośnego, która uwidacznia się dla małych wartości kątów elewacji (*Kroszczyński i in.*, 2006, 2009, 2010; *Figurski i in.*, 2007, 2009). Obecnie rutynowo jest ona modelowana przez programy typu Bernese w postaci niewiadomych, estymowanych w procesie analizy danych GNSS gradientów horyzontalnych. Gradienty te i odpowiadające im funkcje odwzorowujące występują w wielu modelach opóźnienia skośnego (np. *Chen i Herring* 1997; *Meindl i in.*, 2004). Zaletą korzystania z modeli numerycznych pogody jest w tym przypadku możliwość bezpośredniego ich określenia (*Boehm i Schuh*, 2007; *Ghoddousi-Farad i Dare*, 2009). Chociaż wartości gradientów w większości przypadków są bardzo małe (rzędu 1 mm), są one użyteczne w badaniach asymetrii opóźnień troposferycznych. Nieuwzględnienie tej asymetrii może mieć wpływ na wymagające wysokiej precyzji aplikacje GNSS, np. długoterminowe badania geodynamiczne lub realizacje ziemskiego systemu odniesienia. Rozważając różne strategie wyznaczania funkcji odwzorowujących i gradientów, używanych dziś w analizach pomiarów GNSS czy VLBI, można zauważyć, że są one określane pośrednio w oparciu o dane numerycznych modeli pogody. Funkcje wiążące opóźnienia skośne z zenitalnymi przedstawiane są zwykle ułamkami łańcuchowymi z kilkoma współczynnikami zależnymi od czasu i położenia stacji. Można powiedzieć, że w tym sensie są one optymalne, a zarazem uniwersalne, jednakże efekt ten jest uzyskiwany kosztem redukcji i uśrednienia informacji zawartych w danych meteorologicznych. Redukcja ta w powiązaniu z małą rozdzielczością przestrzenną modeli globalnych objawia się między innymi brakiem zależności tych funkcji od azymutu obserwacji dla małych wartości kątów elewacji. Z drugiej strony obecny rozwój modeli meteorologicznych wskazuje, że w oparciu o generowane przez nie dane możliwe jest bezpośrednie obliczenie opóźnień skośnych za pomocą odpowiednio szybkich procedur rozwiązujących równanie eikonału. Idea wykorzystania w równaniach obserwacyjnych opóźnień skośnych, obliczanych bezpośrednio na podstawie danych numerycznego modelu pogody, towarzyszyła autorowi od początku prowadzonych w tym zakresie badań (*Kroszczyński*, 2006). Niewiadome opóźnienia nieliniowych układów równań obserwacyjnych GNSS stają się więc znanymi pseudoobserwacjami, uwzględniającymi w naturalny sposób informacje o asymetrii stanu atmosfery dla różnych kierunków obserwacji sygnałów GNSS. Nie jest w tym przypadku potrzebna estymacja opóźnień zenitalnych i określających asymetrię gradientów horyzontalnych. Trzeba podkreślić, że w prowadzonych badaniach to przeniesienie z przestrzeni niewiadomych do przestrzeni pomiarów (wektorów wyrazów wolnych układów obserwacyjnych) jest możliwe dzięki zastosowaniu numerycznego niehydrostatycznego modelu pogody COAMPS (WRF). Wstępne badania wpływu parametryzacji opóźnienia skośnego na rozwiązania GNSS przedstawiono w pracy (*Hobiger i in.*, 2008). W tym celu zastosowano, działający w oparciu o dane modelu mezoskalowego Japanese Meteorological Agency (JMA), moduł wyznaczania opóźnień skośnych Kashima Ray-Tracing Service (KARATS), (*Hobiger i in.*, 2007). Moduł ten, wraz z napisanym w języku MATLAB (<http://www.mathworks.com>) programem GPSTools (<http://gpspp.sakura.ne.jp>), został użyty do analiz rozwiązań metody precyzyjnego pozycjonowania (PPP). W wyniku stwierdzono (*Hobiger i in.*, 2007), że w porównaniu z analizą PPP opartą o standardowe funkcje odwzorowujące i gradienty horyzontalne, bezpośrednie wykorzystanie

w metodzie PPP mezoskalowych opóźnień troposferycznych skośnych poprawia precyzję rozwiązań.

W ramach prowadzonych przez autora prac skonstruowano, sprzężony z modelem COAMPS, moduł wyznaczania opóźnień i funkcji odwzorowujących dla stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS.

Wydaje się, że systematyczne postępy w dziedzinie prognozowania stanu atmosfery, między innymi związane z odpowiednim dostosowaniem modeli meteorologicznych do realizacji zadań geodezyjnych, pozwolą w najbliższej przyszłości skutecznie zredukować, poprzez parametryzację opóźnienia skośnego, liczbę wyznaczanych niewiadomych wektora rozwiązań GNSS. W przypadku zastosowań o mniejszych wymaganiach i zadań pozycjonowania kinematycznego, bezpośrednie opóźnienia skośne mogą już dziś być stosowane, dając rozwiązania o centymetrowej dokładności.

Głównym wynikiem prowadzonych przez autora prac badawczych jest opracowanie nowej metodyki przetwarzania danych niehydrostatycznych mezoskalowych modeli pogody dla uzyskania opóźnień skośnych sygnałów GNSS i odpowiadających im mezoskalowych funkcji odwzorowujących, wyznaczenie i zbadanie właściwości opóźnień skośnych dla małych wartości kątów elewacji oraz opracowanie, na bazie szybkich rozwiązań równania eikonalu i danych prognostycznych numerycznych modeli pogody, programu operacyjnego wyznaczania opóźnień troposferycznych (neutralnej atmosfery).

W szczególności celem pracy było udowodnienie tezy, że wpływające na precyzyjne analizy GNSS czasoprzestrzenne rozkłady opóźnień skośnych stacji GNSS dla małych wartości kątów elewacji są anizotropowe, tj. są funkcjami zależnymi od kątów elewacji oraz azymutu obserwowanych przez nie satelitów i mogą być wyznaczane na podstawie danych modeli mezoskalowych o dużej rozdzielczości przestrzennej.

Bezpośrednią przyczyną podjętych prac była możliwość wykorzystania danych modeli mezoskalowych pracujących w trybie operacyjnym w CGS WAT do badania zachowania się opóźnień skośnych – funkcji odwzorowujących w różnych warunkach propagacji sygnałów GNSS. Obecnie wykorzystywane w praktyce funkcje odwzorowujące nie zależą od azymutu obserwacji, chociaż azymutalnej asymetrii może odpowiadać kilka decymetrów dla kąta elewacji 5° . W przypadku 3° są to wielkości rzędu metra, a zatem nie powinny być ignorowane.

Działające dziś numeryczne modele pogody są w stanie dostarczać odpowiednich informacji o czterowymiarowym stanie neutralnej atmosfery. Coraz lepsza jakość prognoz i większa dostępność produktów skłaniają do rozwoju skutecznych algorytmów, pozwalających bezpośrednio wyznaczać opóźnienia skośne sygnałów GNSS.

2.1.2. Układ monografii

W części pierwszej opisano zagadnienia propagacji sygnałów GNSS w atmosferze. Zdefiniowano pojęcia zależnego od podstawowych parametrów meteorologicznych współczynnika refrakcji neutralnej atmosfery. Określono, wyznaczane na jego podstawie, opóźnienia sygnałów GNSS. Przedstawiono również podstawowe modele refrakcji atmosferycznej.

- W części drugiej scharakteryzowano niehydrostatyczny mezoskalowy model pogody COAMPS. Omówiono szereg zagadnień związanych z zapewnieniem jego funkcjonowania w trybie operacyjnym. Poruszono problemy dotyczące jego dostosowania do realizacji zadań

geodezyjnych. Skonstruowano, oparte na geometrii modelu, geodezyjne układy współrzędnych. Zaprezentowano program (napisany w języku MATLAB – MATrix LABoratory) służący do analizy pól refrakcji i opóźnienia skośnego, pozwalający badać wpływ stanu fizycznego neutralnej atmosfery na propagację sygnałów GNSS oraz umożliwiający uwzględnienie innych źródeł informacji, np. w postaci zdjęć geostacjonarnych satelitów meteorologicznych.

- Część trzecia obejmuje zagadnienia numerycznej realizacji wyznaczania opóźnień zenitalnych i skośnych opartych na równaniach Maxwella oraz zasadzie najmniejszego działania Fermata. Zdefiniowano metodę śledzenia promieni służącą do wyznaczania czasu propagacji sygnału GNSS. Przedstawiono szereg algorytmów obliczania opóźnień skośnych, od prostych, opartych na twierdzeniu Snelliusa, do bardziej zawansowanych, bazujących na równaniu różniczkowym cząstkowym eikonału. Postawiono zagadnienia początkowe i brzegowe w celu wyznaczenia rozwiązań równania eikonału. Wprowadzono oparte na schemacie skanowania atmosfery dyskretne mezoskalowe funkcje odwzorowujące.
- W rozdziale czwartym opisano funkcje odwzorowujące stosowane obecnie w praktyce. Szczególną uwagę zwrócono na te, których wyznaczenie oparto na danych numerycznych modeli pogody. Takie funkcje odwzorowujące posiadają potencjalną możliwość redukcji błędów systematycznych rozwiązań GNSS, co jest istotne w geofizycznych zastosowaniach geodezji.
- W rozdziale piątym omówiono wybrane aspekty modelowania opóźnienia neutralnej atmosfery wykorzystywanego w metodzie PPP, opartej o niezależne od wpływu jonosfery kombinacje liniowe dwuczęstotliwościowych obserwacji kodowych i fazowych. Wskazano różnice między opóźnieniem zenitalnym, będącym składową rozwiązania PPP, otrzymanego metodą najmniejszych kwadratów (MNK) lub filtracji Kalmana, a bezpośredniego, wyznaczonego metodą śledzenia promieni na podstawie danych mezoskalowego modelu pogody. Omówiono relacje zachodzące między składowymi rozwiązań metody PPP. Przedstawiono przeprowadzone badania wpływu parametryzacji opóźnienia skośnego na rozwiązania GNSS.
- W części szóstej zaprezentowano wyniki badań opóźnienia skośnego i dyskretnych funkcji odwzorowujących określonych na podstawie danych niehydrostatycznego mezoskalowego modelu atmosfery COAMPS. Celem badań było wyznaczenie nowych, nierozważanych dotychczas w literaturze czasoprzestrzennych, mezoskalowych charakterystyk opóźnienia GNSS w funkcji małych wartości kątów elewacji dla siatek modelu o różnej rozdzielczości przestrzennej. Badano również opóźnienia dla przypadku występowania złych warunków pogodowych. Przedstawione wyniki dotyczą okresu od 14 do 20 kwietnia 2008, w którym na terenie Europy obserwowano aktywne, dające intensywne opady układy frontów atmosferycznych.
- W części siódmej przedstawiono nową metodę wyznaczania opóźnienia skośnego, opartą o tzw. metodę szybkiej propagacji (MSP), którą sformułowano w postaci zagadnienia brzegowego polegającego na wyznaczeniu najkrótszej drogi (geodezyjnej) pokonywanej przez sygnał między wybranymi punktami niejednorodnego ośrodka atmosfery. Podstawowym celem badań było porównanie przebiegów opóźnienia zenitalnego otrzymanych na bazie danych prognostycznych modelu i z powtórnych rozwiązań sieciowych (Bernese 5.0) oraz precyzyjnego pozycjonowania (PPP, GpsTools 0.64) dla systemu ASG-EUPOS.
- W części ósmej zaprezentowano program (napisany w języku MATLAB) wyznacza-

nia opóźnień skośnych dla systemu ASG-EUPOS, który może być wykorzystany do celów zwiększenia dokładności wyznaczania pozycji stacji referencyjnych. Program ten umożliwi zmniejszenie wpływu anizotropii opóźnień skośnych, prowadząc do uzyskania milimetrowej dokładności pozycji stacji GNSS. Zapewnia on operacyjność obliczania opóźnień skośnych, które mogą być bezpośrednio użyte w równaniach obserwacyjnych. Wyznaczanie tych opóźnień związane jest z asymilacją troposferycznych opóźnień zenitalnych GNSS do modeli mezoskalowych i w konsekwencji może wpłynąć na poprawę określenia początkowych, troposferycznych pól wilgotności atmosfery, przyczyniając się do ich poprawnej prognozy.

- Część ostatnia stanowi podsumowanie wraz z wnioskami i uwagami końcowymi oraz bibliografią, związaną z prezentowanymi w pracy zagadnieniami.

2.1.3. Omówienie problematyki oraz wyników badań własnych

W monografii przedstawiono wyniki eksperymentów numerycznych i analiz dotyczących propagacji sygnałów GPS w atmosferze. Zasadniczym celem było wyznaczanie dyskretnych charakterystyk czasoprzestrzennych opóźnień skośnych, które są niewiadomymi układów równań obserwacyjnych GNSS. Opóźnienia wyznaczano metodami śledzenia promieni bazującymi na równaniach Maxwella i zasadzie najmniejszego działania Fermata. Odpowiadające im algorytmy realizują rozwiązania równania różniczkowego cząstkowego eikonału lub w najprostszym przypadku działają w oparciu o prawo Snelliusa (rozdz. III). Rozwiązania sformułowano zarówno w postaci zagadnienia początkowego, jak i brzegowego. Rozwiązanie zadania brzegowego uzyskano metodą szybkiej propagacji (rozdz. VII). Polegało ono na wyznaczeniu geodezyjnej (najkrótszej drogi) pokonywanej przez sygnał GNSS między wybranymi punktami atmosfery. Źródłem danych dla metod promieni były czterowymiarowe pola współczynnika załamania otrzymywane w oparciu o dane pracującego operacyjnie w CGS WAT niehydrostatycznego mezoskalowego modelu prognostycznego COAMPS (rozdz. II). Badania prowadzono w oparciu o opracowaną metodykę przetwarzania danych i wyznaczania opóźnień skośnych (rozdz. III), realizowaną w praktyce przez program napisany w języku programu MATLAB scalający procedury obliczeniowe. Program ten pozwala badać kątowe charakterystyki opóźnienia skośnego stacji należącej do efektywnego obszaru obliczeniowego modelu mezoskalowego dla różnych warunków atmosferycznych. Głównym jego zadaniem jest wyznaczanie poprawek troposferycznych czasu propagacji sygnału GNSS. Ze względu na anizotropię stanu atmosfery w otoczeniu stacji GNSS zbadano kątowe charakterystyki funkcji odwzorowujących, zwłaszcza w zakresie małych wartości (3° – 20°) kątów elewacji. Motywacją do przeprowadzenia tych obliczeń był fakt, iż obecnie wykorzystywane w praktyce funkcje odwzorowujące nie zależą od azymutu obserwacji. Z tego powodu w analizach precyzyjnych trzeba dodatkowo uwzględnić gradienty tych funkcji zwiększające ogólną liczbę niewiadomych równań obserwacyjnych. Założenie izotropowości atmosfery przyjmowane jest w wielu przypadkach rutynowego wyznaczania rozwiązań GNSS. Przyczyną takiego postępowania jest brak powszechnego dostępu do prognostycznych danych meteorologicznych modeli mezoskalowych, tj. wyznaczanych na ich podstawie mezoskalowych opóźnień zenitalnych i skośnych. W odniesieniu do naszego kraju jest to również poważny problem wymagający kompleksowego rozważenia i rozwiązania.

W prowadzonych badaniach do wyznaczania opóźnień skośnych wykorzystywano,

archiwizowane co godzinę w ramach prognozy dobowej, pola modelu mezoskalowego COAMPS. Obliczenia realizowano w oparciu o dane analiz stanu atmosfery odpowiadających epokom synoptycznym dla godzin 00 UTC i 12 UTC. Jakość tych danych rzutuje bezpośrednio na zgodność modelowanej pogody z pogodą rzeczywistą dla stacji GNSS. Z punktu widzenia wyznaczania opóźnień skośnych dla stacji systemu ASG-EUPOS potrzebny jest więc odpowiedni proces ich asymilacji. Autor pracy widzi potrzebę wykorzystania w tym procesie obserwacji pochodzących z różnych źródeł, w tym GNSS. Asymilacja obserwacji GNSS do modelu mezoskalowego może udokładnić początkowy (00 i 12 UTC) rozkład pól wilgotności, co z kolei wpłynie na poprawę pól prognostycznych modelu mezoskalowego, a w konsekwencji określanych na ich podstawie prognostycznych wartości opóźnień skośnych. Użyte w procesie realizacji sprzężenia zwrotnego udokładnione wartości opóźnień można wówczas wykorzystać w charakterze parametrów równań obserwacyjnych, a więc do redukcji liczby ich niewiadomych lub jako bardzo dobre jakościowo przybliżenia początkowe.

Zdobyte doświadczenia w pracy z modelami mezoskalowymi umożliwiły stworzenie przestrzeni badawczej do podjęcia prac związanych z tą problematyką i powinny znaleźć w przyszłości odzwierciedlenie w postaci stosownych projektów badawczych. Istotną kwestią jest konieczność podjęcia systematycznej analizy i walidacji uzyskiwanych prognoz pogody. Jest ona niezbędna do uzyskania wiarygodności opóźnień skośnych wyznaczanych w trybie operacyjnym na potrzeby potencjalnych użytkowników. W pracy poruszono także problemy dotyczące dostosowania modelu mezoskalowego do realizacji zadań geodezyjnych. Skonstruowano między innymi związany z geometrią modelu geodezyjny układ współrzędnych. Prace nad takimi układami powinny być kontynuowane, aby uniknąć stosowanych w tym przypadku geometrycznych, a przede wszystkim fizycznych uproszczeń.

Wykorzystywane w badaniach metody promieni pozwoliły wprowadzić oparte na schemacie skanowania atmosfery dyskretne rozkłady opóźnień skośnych i związane z nimi bezpośrednio funkcje odwzorowujące. Posiadają one potencjalną możliwość redukcji błędów systematycznych rozwiązań GNSS, ponieważ są wyznaczone na podstawie cyklicznie używanych danych numerycznych modeli pogody. Uzyskana redukcja błędów systematycznych jest istotna w geofizycznych zastosowaniach geodezji bazujących na wynikach precyzyjnych analiz technik VLBI i GNSS. Ze względu na anizotropię stanu atmosfery użycie tak określonych funkcji odwzorowujących powinno poprawić powtarzalność wyznaczeń współrzędnych stacji, zwłaszcza w przypadku sygnałów satelitów o małych wartościach kątów elewacji. Wykorzystanie takich kątów elewacji przyczynia się również do dekorelacji składowych rozwiązań równań obserwacyjnych GNSS. Przykładowo wpływa na lepszą separację błędów zegarów odbiorników i wysokości stacji GNSS. Wyznaczone co godzinę mezoskalowe funkcje odwzorowujące (COAMPS – siatki 4.3 i 1.44 km) różnią się od globalnych sześciogodzinnych VMF1 (ECMWF – siatka $2.5^\circ \times 2^\circ$) rozdzielczością czasoprzestrzenną. Z tej przyczyny mogą być one użyte na przykład w badaniach wpływu lokalnych anomalii pogodowych typu strefy warstwowego zachmurzenia czy fronty atmosferyczne. Jednogodzinna (lub większa 15 min) rozdzielczość czasowa archiwizowanych pól refrakcji pozwala na odpowiednią interpolację występujących w równaniach obserwacyjnych niewiadomych opóźnień skośnych. Użycie szybkich, pracujących w trybie operacyjnym, metod promieni pozwala je określić dla każdej obserwacji prowadzonej przez stację GNSS. Z tego powodu posługiwanie się klasycznymi funkcjami odwzorowującymi i gradientowymi staje się zbędne. Wyzna-

czony metodą promieni opóźnienia są bardzo dobrym przybliżeniem ich wartości wyrównanych, uzyskanych w wyniku rozwiązania układów równań obserwacyjnych. Niewiadomymi są tutaj poprawki do ich wartości przybliżonych. Ze względu na istniejące ograniczenia prognostycznych modeli meteorologicznych poprawki te nadal trzeba uwzględniać, aby uniknąć przenoszenia się błędów na inne, wyznaczone podczas estymacji składowe wektora stanu GNSS. Jeśli opóźnienia odpowiadałyby rzeczywistym, wówczas występowałyby w tych równaniach w roli parametrów, zmniejszając liczbę estymowanych niewiadomych. Przyczyniłyby się tym samym do zwiększenia stabilności i dokładności rozwiązań.

Istotną przeszkodą do uzyskania pozycji stacji GNSS na poziomie milimetrowej dokładności jest anizotropia opóźnień skośnych. W celu jej zbadania rozważano względne czasoprzestrzenne rozkłady opóźnień skośnych. Uzyskano je, odejmując od rozkładów bezwzględnych rozkłady uśrednione azymutalnie lub określone dla wybranej epoki odniesienia (rozdz. VI). Pozwalają one śledzić zmiany warunków pogodowych i zarazem propagacyjnych atmosfery w otoczeniu stacji GNSS. Stwierdzono, że różnice dodatnie korelują z kierunkami wskazującymi istnienie rozwiniętego zachmurzenia warstwowego, np. frontowego, z którym związane są obszary zawierające większe ilości pary wodnej, natomiast ujemne odpowiadają propagacji fal GNSS przez niezachmurzone obszary atmosfery. Takie zachowanie potwierdzają systemy zachmurzenia widoczne na analizowanych zdjęciach satelitarnych. Podobne rozkłady kątowe uzyskano dla wszystkich stacji referencyjnych systemu ASG-EUPOS. Ogólnie mogą być one otrzymane dla każdego punktu obszaru obliczeniowego modelu mezoskalowego spełniającego warunek wykonalności skanowania. Dokładne zbadanie charakteru uzyskanych różnic opóźnień skośnych powinno być oparte na danych z odpowiednio długiego przedziału czasu. Taką możliwość dają prace prowadzone obecnie w CGS WAT, związane z powtórным wyznaczeniem rozwiązań sieciowych i PPP systemu ASG-EUPOS. W ramach prowadzonych badań porównano także opóźnienia zenitalne wyznaczone na podstawie danych modelu mezoskalowego COAMPS i ECMWF (uzyskane z serwisu VMF1). Zarówno w jednym, jak i drugim przypadku opóźnienia hydrostatyczne wykazują małą zmienność przestrzenną. W rozkładach przestrzennych opóźnień hydrostatycznych daje się zauważyć wyraźny wpływ czynników topograficznych. W polach opóźnień hydrostatycznych modelu COAMPS (rozdzielczość siatek 4.3 km, 1.44 km) wyraźnie uwidacznia się wpływ topografii terenu. W opóźnieniach zenitalnych VMF1 modelu ECMWF, rozpowszechnianych w siatce $2.5^\circ \times 2.0^\circ$, wpływ ten jest w dużym stopniu uśredniony. W odróżnieniu od opóźnień hydrostatycznych, pola opóźnień zenitalnych mokrych odzwierciedlają przede wszystkim występujące w atmosferze czasoprzestrzenne zmiany wilgotności. Uwidaczniają one (COAMPS) obecność frontów atmosferycznych, którym odpowiadają wyraźne wzrosty wartości opóźnienia mokrego. Z analizy map uśrednionych wynika, że maksymalne wartości różnic pól opóźnień hydrostatycznych COAMPS i VMF1-ECMWF nie przekraczają 5 cm. W wielu przypadkach dla obszaru Polski, z wyłączeniem terenów górskich, są one mniejsze od 2 cm. Podobnie zachowują się różnice uśrednionych pól opóźnień zenitalnych mokrych. Uzyskana zgodność jest wyrazem faktycznej realizacji odpowiedniości, uśrednionych względem czasu i przestrzeni stanów modelu mezoskalowego COAMPS i globalnego modelu ECMWF.

W pracy porównano również przebiegi opóźnienia zenitalnego otrzymane metodą szybkiej propagacji WMSP na bazie danych prognostycznych modelu COAMPS i otrzymanych z powtórnych rozwiązań sieciowych (Bernese 5.0) i PPP (GpsTools 0.64) dla

systemu ASG-EUPOS. Podobieństwo geometryczne wynikające ze zgodności położenia ekstremów rozważanych przebiegów świadczy o dobrym odtwarzaniu warunków pogodowych i odpowiadających im pól prognostycznych przez używany w badaniach model mezoskalowy. W większości przypadków różnice między szeregami opóźnień, obliczonych metodami precyzyjnego punktowego pozycjonowania, sieciową i szybkiej propagacji WMSP, nie przekraczają 1.5 cm. Uzyskane różnice mogą na przykład wynikać z nierównoważności (fizycznej) obliczanych opóźnień zenitalnych. Opóźnienia skośne metod sieciowej i PPP są wynikiem stosowania procedur optymalizacyjnych (najmniejszych kwadratów i filtru Kalmana), działających w oparciu o, otrzymywane z różnych kierunków rzeczywistej atmosfery, sygnały fazowe i kodowe. W przypadku metody WSMP są one określane dokładnie w zenicie nad punktem centrum fazowego anteny stacji GNSS, na bazie pól meteorologicznych modelu mezoskalowego. Z tego powodu bezpośrednie użycie tak obliczonych opóźnień zenitalnych w równaniach obserwacyjnych może nie prowadzić do wzrostu precyzji czy powtarzalności uzyskiwanych rozwiązań, zwłaszcza w przypadku uwzględniania sygnałów od satelitów o małych wartościach kątów elewacji.

Zrealizowane przez autora badania wyznaczanych w oparciu o dane modelu mezoskalowego COAMPS rozkładów opóźnień skośnych pozwoliły na sformułowanie potwierdzających tezę pracy następujących wniosków:

- Obecnie używane globalne empiryczne funkcje odwzorowujące, w odróżnieniu od wyznaczanych w pracy funkcji mezoskalowych, nie są w stanie prawidłowo modelować opóźnień skośnych, spowodowanych czasoprzestrzennymi zmianami pól ciśnienia temperatury i wilgotności atmosferycznej, wynikłych z konwekcji atmosferycznej, propagacji frontów atmosferycznych i związanych z nimi systemów zachmurzenia.
- Dane prognostyczne niehydrostatycznych mezoskalowych modeli pogody o dużej rozdzielczości przestrzennej pozwalają modelować czasoprzestrzenne niejednorodności rozkładów pól refrakcji atmosferycznej w otoczeniu stacji GNSS. Dla prognoz dobowych mogą być one użyte, w charakterze pól rzeczywistych, do badania i symulacji propagacji fal GNSS oraz wyznaczania prognostycznych rozkładów kątowych opóźnień skośnych dla różnych warunków atmosferycznych.
- Zdefiniowanie względnych czasoprzestrzennych, kątowych rozkładów opóźnień skośnych stacji GNSS pozwala na odpowiednie badanie ich anizotropowego charakteru, tj. zależącego od kierunku obserwacji satelitów GNSS. Uzyskane rozkłady odzwierciedlają niejednorodność przestrzennego stanu fizycznego atmosfery, zwłaszcza pola wilgotności atmosferycznej wzdłuż promieni sygnału GNSS.
- Wyniki przeprowadzonych eksperymentów obliczeniowych pokazały, że rozkłady kątowe opóźnień skośnych (funkcji odwzorowujących) są anizotropowe, tj. zależą od azymutu α prowadzenia obserwacji satelitów GNSS.
- Stwierdzono, że dla małych wartości kątów elewacji anizotropia azymutalna opóźnień skośnych może przekraczać wartości 1 m i może być jeszcze większa w przypadku niekorzystnych warunków atmosferycznych.
- Godzinna zmienność czasowa funkcji odwzorowujących (opóźnień skośnych) stacji GNSS w przypadku małych wartości kątów elewacji może również przekraczać wartość 1 m. W związku z wykazaną dużą zmiennością opóźnień skośnych istotne są badania anizotro-

wości ich rozkładów kątowych związane z wpływem różnych parametryzacji modelu mezoskalowego, np. uwzględniających zwiększenie liczby poziomów obliczeniowych, zwłaszcza w dolnej, wilgotnej części troposfery. Istotne jest też użycie analiz wielospektralnych zdjęć satelitów geostacjonarnych i okołobiegunowych oraz danych radarowych mogących sprecyzować zależności między opóźnieniem skośnym i wilgotnością atmosferyczną.

Przeprowadzone badania pokazały, że obecne sprzętowe i programistyczne możliwości obliczeniowe pozwalają wyznaczać rozkłady opóźnień skośnych stacji referencyjnych ASG-EUPOS w czasie prawie rzeczywistym. W obliczeniach wykorzystano matlabowski moduł operacyjnego określania korekt troposferycznych metodami opartymi o rozwiązania równania eikonału. Realizowane obecnie, w oparciu o klaster CGS Fenix, prace zmierzają do zintegrowania algorytmów metod promieni z kodem fortranowskim modelu COAMPS. Czas obliczania opóźnień istotnie zredukowano, przystosowując algorytmy promieni (rozdz. VI i VII) do przetwarzania równoległego na procesorach wielordzeniowych stacji roboczych, a także procesorach kart graficznych systemu obliczeniowego NVIDIA® Tesla™ S1070. Wydajną realizację obliczeń równoległych umożliwiło wykorzystanie środowiska programistycznego CUDA w połączeniu z działającym wraz programem MATLAB modułem AccelerEyes Jacket GPU. W zależności od stosowanej metody promieni moduł GPU może przyspieszyć obliczenia rozkładów opóźnień skośnych dla stacji referencyjnych ASG-EUPOS kilkudziesięciokrotnie w porównaniu do sekwencyjnie działających procesorów jednordzeniowych. Zapewnia on w pełni operacyjność obliczania opóźnień skośnych, które mogą być bezpośrednio użyte w równaniach obserwacyjnych. Zaletą skonstruowanego programu jest to, że redukcja opóźnień atmosferycznych będzie wydajniejsza i dokładniejsza przy każdym udoskonaleniu numerycznego modelu pogody, tj. zwiększeniu jego czasoprzestrzennej rozdzielczości, uwzględnieniu nowych źródeł danych obserwacyjnych czy nowych efektywnych parametryzacji zjawisk atmosferycznych. Finalnie pozwoli on przesyłać produkty metod śledzenia promieni do użytkowników i umożliwi ich wykorzystanie w trybie czasu prawie rzeczywistego.

Przeprowadzone prace uwidoczniły także ich związek z innymi, istotnymi dla propagacji sygnałów GNSS, obszarami badań uwzględniających pomiary GNSS: w analizie ewolucji zjawisk fizycznych w warstwie granicznej i troposferze, w procesie asymilacji modeli mezoskalowych i tomografii GNSS atmosfery. Badania te mogą istotnie wpłynąć na poprawę jakości prognoz pogody, a tym samym na zasadzie sprzężenia zwrotnego udokładnić pola refrakcji i wyznaczone rozkłady opóźnień skośnych.

W badaniach starano się powiązać informacje z różnych dziedzin nauki: geodezji, meteorologii, informatyki, fizyki atmosfery czy też teorii równań różniczkowych. Autor pracy uważa, że rozwiązanie dzisiejszych problemów geodezji związanych z problematyką propagacji sygnałów GNSS wymaga podejścia interdyscyplinarnego.

Michał Matus