

AUTOREFERAT

1. Imię i nazwisko: Mariusz Szymanowski

2. Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej

Stopień naukowy doktora nauk o Ziemi w zakresie geografii – klimatologii uzyskałem w grudniu 2003 r. na podstawie uchwały Rady Naukowej Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego, po obronie pracy doktorskiej pt. „Meteorologiczne i urbanistyczne uwarunkowania miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu”. Promotorem w przewodzie doktorskim była dr hab. prof. UWr. Maria Dubicka, a recenzentami: prof. dr hab. Barbara Obrębska-Starkłowa (Uniwersytet Jagielloński) i prof. dr hab. Kazimierz Kłysik (Uniwersytet Łódzki).

3. Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/artystycznych

I. od 1989 Uniwersytet Wrocławski, Instytut Geografii i Rozwoju Regionalnego (dawniej: Instytut Geograficzny):

- 1989 – 1990 pracownik laboratorium hydrochemicznego w Zakładzie Geografii Fizycznej,
- 1990 – 2004 Zakład Meteorologii i Klimatologii:
 - 1990 – 1998: samodzielny geograf,
 - 1998 – 2004: specjalista,
 - 2004: starszy specjalista,
- od 2004 Zakład Geoinformatyki i Kartografii (dawniej: Zakład Kartografii)
 - 2004 – 2005: asystent
 - od 2005: adiunkt

II. 1991 – 1992 Instytut Ekologii Polskiej Akademii Nauk: uczestnik XVI Polskiej Wyprawy Antarktycznej do stacji im. H. Arctowskiego na Wyspie Króla Jerzego (Szetlandy Pd.)

4. Jako osiągnięcie naukowe wynikające z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.) przedstawiam jednotematyczny cykl dziesięciu publikacji pod zbiorczym tytułem:

Modelowanie pola temperatury powietrza w wybranych skalach przestrzennych i czasowych: metody interpolacji, walidacji i wizualizacji.

a) (autor/autorzy, rok wydania, tytuł publikacji, nazwa wydawnictwa)

[A1] Szymanowski M., Kryza M., 2008, *GIS application for the spatial interpolation of the urban heat island in Wrocław, Poland* [w:] Kłysik K., Wibig J., Fortuniak K. (red.) *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 21–34.

[rozdział w monografii] **Mój udział (60%)** obejmował: (1) zaplanowanie badań terenowych i kameralnych - opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) przygotowanie warstw zmiennych objaśniających w oparciu o mapę pokrycia terenu i zdjęcie satelitarne Landsat TM, (5) współpracę w interpolacji metodami deterministycznymi i geostatystycznymi, (6) analizę i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A2] Szymanowski M., Kryza M., 2009, *GIS-based techniques for urban heat island spatialization*, Climate Research, 38, 171–187.

[artykuł - lista A wykazu MNiSW, IF: 1.994, punktacja MNiSW: 30] Mój udział (70%) obejmował: (1) zaplanowanie badań terenowych i kameralnych - opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) przygotowanie warstw zmiennych objaśniających w oparciu o mapę pokrycia terenu i zdjęcie satelitarne Landsat TM, (5) współpracę w interpolacji metodami deterministycznymi i geostatystycznymi – optymalną parametryzację metod, (6) analizę i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A3] Szymanowski M., Kryza M., 2009, *Zastosowanie regresji ważonej geograficznie do modelowania miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu*, Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji 20, 407–419.

[artykuł - lista B wykazu MNiSW, punktacja MNiSW: 4] Mój udział (70%) obejmował: (1) zaplanowanie badań terenowych i kameralnych - opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) przygotowanie warstw zmiennych objaśniających w oparciu o mapę pokrycia terenu i zdjęcie satelitarne Landsat TM, (5) opracowanie koncepcji zastosowania regresji ważonej geograficznie i krigingu reszt regresji ważonej geograficznie, (6) analizę i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A4] Szymanowski M., Kryza M., 2010, *Przestrzenna interpolacja temperatury powietrza we Wrocławiu z zastosowaniem lokalnych i globalnych modeli regresji* [w:] Bednorz E., Kolendowicz L. (red.) *Klimat Polski na tle klimatu Europy. Zmiany i ich konsekwencje*, Studia i Prace z Geografii i Geologii, 16, Bogucki Wydawnictwo. Naukowe, Poznań, 189–202.

[rozdział w monografii] Mój udział (60%) obejmował: (1) zaplanowanie badań terenowych i kameralnych - opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) przygotowanie warstw zmiennych objaśniających w oparciu o mapę pokrycia terenu i zdjęcie satelitarne Landsat TM, (5) opracowanie koncepcji zastosowania regresji ważonej geograficznie wraz z doбором optymalnej wielkości macierzy sąsiedztwa i krigingu reszt regresji ważonej geograficznie, (6) analizę i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A5] Szymanowski M., Kryza M., 2011, *Application of remotely sensed data for spatial approximation of urban heat island in the city of Wrocław, Poland* [w:] Stilla U., Gamba P., Juergens C., Maktav D. (red.) JURSE 2011 - Joint Urban Remote Sensing Event, IEEEExplore Digital Library, DOI: 10.1109/JURSE.2001.5764792, 353–357.

[recenzowane materiały konferencyjne] Mój udział (75%) obejmował: (1) pomysł badawczy i zaplanowanie koncepcji publikacji, (2) przetworzenie obrazów satelitarnych Landsat ETM+ dla uzyskania warstw indeksów wegetacji NDVI, NDMI, SAVI oraz temperatury radiacyjnej powierzchni, albedo i emisyjności, (3) przygotowanie na podstawie danych 3D zabudowy warstw współczynników szorstkości i porowatości, (4) współpracę przy modelowaniu dopływu promieniowania słonecznego, (5) filtrowanie dolnoprzepustowe warstw, (6) analizę korelacji temperatury powietrza ze zmiennymi środowiskowymi i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A6] Szymanowski M., Kryza M., 2011, *Application of geographically weighted regression for modelling the spatial structure of urban heat island in the city of Wrocław (SW Poland)*, Procedia Environmental Sciences, 3, 87–92.

[recenzowane materiały konferencyjne – baza Web of Science] Mój udział (65%) obejmował: (1) pomysł badawczy i opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) współudział w przygotowaniu nowego zestawu warstw zmiennych objaśniających w oparciu o zdjęcia satelitarne Landsat ETM+, dane lidarowe i mapę pokrycia terenu, (5) współudział w specyfikacji i kalibracji modeli regresji i krigingu reszt, (6) analizę i interpretację wyników, (7) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A7] Szymanowski M., Kryza M., 2012, *Local regression models for spatial interpolation of urban heat island – an example from Wrocław, SW Poland*, Theoretical and Applied Climatology, 108, 53–71.

[artykuł - lista A wykazu MNiSW, IF: 1,942, punktacja MNiSW: 30] Mój udział (70%) obejmował: (1) pomysł badawczy i opracowanie koncepcji publikacji, (2) udział w pomiarach, (3) przygotowanie wejściowych danych temperatury powietrza, (4) współudział w przygotowaniu nowego zestawu warstw zmiennych objaśniających w oparciu o zdjęcia satelitarne Landsat ETM+, dane lidarowe i mapę pokrycia terenu, (5) współudział w specyfikacji i kalibracji modeli regresji i krigingu reszt, (6) opracowanie metodyki wyboru modelu regresji z wykorzystaniem analizy kryterium informacyjnego Akaike, analizy wariancji (ANOVA) i testów niestacjonarności parametrów Monte Carlo i F3 Leunga, (7) opracowanie koncepcji analizy przestrzennego rozmieszczenia błędów oceny krzyżowej za pomocą miar lokalnej autokorelacji przestrzennej, (8) analizę i interpretację wyników, (9) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A8] Szymanowski M., Kryza M., 2012, Zastosowanie krigingu reszt lokalnego modelu regresji do interpolacji przestrzennej średniej rocznej temperatury powietrza w Polsce, Przegląd Geofizyczny 57(1), 73–84.

[artykuł - lista B wykazu MNiSW, punktacja MNiSW: 4] Mój udział (70%) obejmował: (1) pomysł badawczy i opracowanie koncepcji publikacji, (2) przygotowanie bazy danych temperatury powietrza dla Polski, (3) współpracę w przygotowaniu warstw zmiennych objaśniających metodami analizy przestrzennej, (4) opracowanie metodyki zastosowania lokalnego modelu regresji i jego rozszerzenia o kriging reszt dla średniej rocznej temperatury powietrza w Polsce, (5) analizę i interpretację wyników, (6) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A9] Szymanowski M., Kryza M., Spallek W., 2013, Regression-based air temperature spatial prediction models: an example from Poland, Meteorologische Zeitschrift, Fast Track, DOI: 10.1127/0941-2948/2013/0440.

[artykuł - lista A wykazu MNiSW, IF: 1,875, punktacja MNiSW: 20] Mój udział (75%) obejmował: (1) pomysł badawczy i opracowanie koncepcji publikacji, (2) przygotowanie bazy danych temperatury powietrza dla Polski, (3) współpracę w przygotowaniu warstw zmiennych objaśniających metodami analizy przestrzennej, (4) opracowanie drzewa decyzji wyboru optymalnej metody interpolacji dla każdego przypadku, (5) analizę i interpretację wyników, (6) napisanie tekstu publikacji i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

[A10] Szymanowski M., Kryza M., Spallek W., 2012, Atlas temperatury powietrza w Polsce: studium metodyczne, Rozprawy Naukowe Instytutu Geografii i Rozwoju Regionalnego Uniwersytetu Wrocławskiego, 26, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, ss.125.

[monografia] Mój udział (75%) obejmował: (1) pomysł badawczy i opracowanie koncepcji publikacji, (2) przygotowanie bazy danych temperatury powietrza dla Polski, (3) współpracę w przygotowaniu warstw zmiennych objaśniających metodami analizy przestrzennej, (4) opracowanie drzewa decyzji wyboru optymalnej metody interpolacji dla każdego przypadku, (5) przygotowanie 69 map cyfrowych temperatury powietrza w Polsce, (6) analizę i interpretację rezultatów modelowania, (7) napisanie tekstu monografii i współpracę w przeprowadzeniu jej przez etap recenzji.

b) omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania

Wstęp

Modelowanie przestrzennej struktury elementów, zjawisk i procesów środowiska geograficznego, zarówno przyrodniczego, jak i społeczno-ekonomicznego, jest jednym z podstawowych zadań metodycznych współczesnej geografii. Techniki i procedury, umożliwiające matematyczny opis i analizę rozmieszczenia obiektów, nazywane ogólnie analizą przestrzenną, są sukcesywnie rozwijane, zwłaszcza od czasu „rewolucji ilościowej” w geografii w poł. XX w. Proces ten szczególnie dynamiki nabrał w ostatnich dwóch dekadach w związku z intensywnym rozwojem geotechnologii, integrującej systemy informacji geograficznej (GIS), globalne systemy pozycjonowania (GPS) i teledetekcję. Modelowanie przestrzenne to także nieodłączny element współczesnej klimatologii,

w której opracowanie rozkładów i map elementów klimatu można uznać za jeden z wiodących problemów metodycznych i praktycznych. Dominującym sposobem tworzenia ciągłej przestrzennej informacji klimatologicznej jest modelowanie empiryczne, bazujące na danych obserwacyjnych i wykorzystujące metody przestrzennej interpolacji (spacjalizacji) danych.

Zwiększana nieustannie moc obliczeniowa komputerów, dostęp do specjalistycznego oprogramowania oraz powiększające się zasoby baz danych, w tym dostępnych nieodpłatnie, sprawiają, że wykonanie map elementów klimatu wydaje się przedsięwzięciem stosunkowo łatwym. W konsekwencji, w domenie publicznej, ale także i pracach naukowych, zaczynają funkcjonować informacje przestrzenne, przedstawiające elementy klimatu (i wiele innych elementów środowiska geograficznego) w sposób nieprecyzyjny, a często wręcz nieprawidłowy. Oczywiście jest, że w procesie modelowania nie otrzymuje się wiernego odzwierciedlenia rzeczywistości, jednak dążenie do ograniczenia błędów aproksymacji wraz z rzetelną oceną wyników i prezentacją stopnia niepewności map powinno stanowić wymagany standard opracowań. Podstawową motywacją przyświecającą pracom prezentowanego cyklu była chęć rozwoju metodyki modelowania empirycznego tak, aby nadążać za rosnącymi oczekiwaniami co do precyzji informacji przestrzennej. Nie mniej ważna była dostrzegana potrzeba takiego uporządkowania procedury i procesu podejmowania decyzji, aby zachowując metodyczną poprawność, przeprowadzić interpolację przestrzenną elementu klimatu adekwatnie do zgromadzonego materiału obserwacyjnego i relacji przyczynowo-skutkowych determinujących rozkład tego elementu w danym obszarze badań. Osiągnięte na przykładach pola temperatury powietrza w dwóch obszarach badań oraz różnych skalach czasowych i przestrzennych rezultaty, odnoszące się do samej metodyki interpolacji, a także sposobów oceny i wizualizacji wyników modelowania, zostały przedstawione w cyklu publikacji, stanowiących podstawę wniosku o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego.

Transformacja dyskretnych, punktowych danych obserwacyjnych do informacji ciągłej przestrzennej jest jedną z podstawowych procedur dyscypliny nazywanej analizą przestrzenną. Metody umożliwiające przeprowadzenie takiej transformacji, mimo że bazują na różnych założeniach i koncepcjach teoretycznych, obejmowane są zwykle ogólną nazwą metod interpolacji przestrzennej. Termin ten jest powszechnie akceptowany w analizie przestrzennej i GIS (A10), choć nie zawsze przeprowadzana procedura i jej wyniki są zgodne ze ściśle matematycznym pojmowaniem terminu „interpolacja” (Szymanowski i in., 2006). Przestrzenną interpolację (bądź synonimicznie: aproksymację, predykcję, spacjalizację) można nazywać także modelowaniem pola zmiennej, choć należy pamiętać, że model empiryczny, opisując strukturę pola, nie zawsze musi prowadzić do wytworzenia informacji ciągłej przestrzennej (Szymanowski, Kryza, 2011).

Rozwój metodyki modelowania przestrzennego następuje równolegle do coraz większych oczekiwań ze strony klimatologii oraz wielu innych dyscyplin naukowych, co do uzyskania dokładnej, wysokorozdzielczej informacji klimatologicznej i meteorologicznej. Dotyczy to wszystkich elementów klimatu, jednak dominującą rolę pełnią tu temperatura powietrza i opady atmosferyczne. To właśnie te elementy są najczęściej poddawane dalszemu przetwarzaniu w modelowaniu, przykładowo, parametrów bioklimatologicznych, dyspersji zanieczyszczeń czy erozji glebowej, a także znajdują zastosowanie w wielu innych studiach środowiskowych. Precyzja klimatologicznej informacji

przestrzennej jest tu szczególnie istotna, gdyż jej brak może prowadzić do multiplikacji błędów na dalszych etapach przetwarzania i modelowania środowiskowego.

Obecnie w badaniach środowiskowych wykorzystywane jest kilkadziesiąt różnych technik interpolacji (Hengl, 2007; Li, Heap, 2008), co niejednokrotnie prowadzi do znacznych trudności w wyborze metody adekwatnej do danego przypadku. Wskazanie optymalnej metody powinno być zawsze poprzedzone odpowiednimi procedurami selekcji bądź studiami porównawczymi, często jednak pomijanymi w tworzeniu rozkładów przestrzennych i map.

Literatura interpolacji przestrzennej, nawet w odniesieniu do samej temperatury powietrza (prace od A1 do A10), jest bardzo szeroka, jednak nie pozwala na jednoznaczne rozwiązanie problemu wyboru metody optymalnej. W większości opracowań podejmujących to zagadnienie, jako najlepsze wskazywane są metody wielowymiarowe, zwłaszcza kombinowane, oparte na łączonych założeniach deterministycznych i stochastycznych. Wybór najczęściej dokonywany jest z pewnej wstępnie wytypowanej grupy poprzez wskazanie metody, której wyniki obarczone są najmniejszymi błędami. Założenie słuszne, co do zasady, jednak wstępny wybór metod jest najczęściej mocno subiektywny, intuicyjny bądź też oparty na wynikach innych opracowań, często nieadekwatnych do aktualnie analizowanego zbioru danych i obszaru badań. Problemu tego nie rozwiązano także w ramach najważniejszego projektu badawczego, który podejmował problematykę interpolacji przestrzennej w meteorologii i klimatologii, a mianowicie COST 719 *The Use of GIS in Climatology and Meteorology*. Projekt ten realizowany był w latach 2001–2006 i pozwolił na określenie grupy metod najbardziej przydatnych i najczęściej stosowanych w klimatologii oraz na udzielenie rekomendacji i zaleceń dla rozwoju metodyki przestrzennej interpolacji elementów klimatu. Prace projektu zostały podsumowane w trzech wydawnictwach monograficznych (Dobesch i in., 2007; Szalai i in., 2007; COST Action 719 *Final Report*, 2008), a także na konferencjach z cyklu pt. *Spatial Interpolation Techniques in the Meteorology and Climatology*, które odbyły się w 2004 r. oraz, już po zakończeniu projektu, w 2009 r. w Budapeszcie. Prace przeprowadzone w ramach projektu COST 719 pozwoliły na podsumowanie badań i udzielenie następujących rekomendacji:

- wybór metody uznano za kluczowy dla jakości rezultatów interpolacji przestrzennej, przy jednoczesnym podkreśleniu, iż nie ma jednej, uniwersalnej metody, która mogłaby być aplikowana do każdego zestawu danych, a strategia spacializacji zależy od wielu czynników, reprezentujących różne elementy i różne procesy w zmiennych skalach przestrzennych,
- wszystkie podstawowe założenia metodyczne stosowanego algorytmu powinny być dochowane, co wymaga gruntownej wiedzy teoretycznej, zarówno z zakresu stosowanej metody, jak i natury interpolowanego zjawiska i reprezentującego go zbioru danych,
- należy zawsze testować kilka metod lub przynajmniej kilka parametryzacji danej metody,
- zawsze należy przeprowadzić weryfikację modelu i ocenę stopnia niepewności rezultatów. Prezentacja wyników powinna być uzupełniana informacją o potencjalnych błędach i niepewności oszacowania (r. II.4, COST Action 719 *Final Report*, 2008).

W rozdziale „A look into the future” (r. II.5, COST Action 719 *Final Report*, 2008) raportu podkreślono także rolę modeli lokalnych i lokalnej parametryzacji, które w przekonaniu jego autorów powinny przynieść lepsze rezultaty niż stosowanie metody globalne.

Zagadnienia badawcze prezentowanego cyklu publikacji lokują się w przedstawionym powyżej szerszym kontekście, traktując ustalenia projektu COST 719 jako punkt wyjścia oraz dążąc do rozwinięcia i uściślenia zawartych w jego rezultatach idei i koncepcji metodologicznych interpolacji przestrzennej elementów klimatu. Do cyklu włączono 10 prac, w których podjęte zostały zagadnienia modelowania pola temperatury powietrza. Struktura przestrzenna temperatury powietrza stanowi kluczowy temat badań, które prowadzę od początku kariery naukowej. Problematykę tę podejmowałem dla różnych obszarów badawczych, zróżnicowanych uwarunkowań środowiskowych i skal czasowo-przestrzennych, między innymi na etapach przygotowania pracy magisterskiej (Piasecki, Szymanowski, 1995), rozprawy doktorskiej (Szymanowski, 2004) oraz podczas kierowania projektem badawczym MNiSW pt. *Modelowanie pola temperatury powietrza w Polsce w wybranych skalach przestrzennych i czasowych*, którego wyniki w dominującym stopniu są zawarte w prezentowanym cyklu publikacji.

W pracach cyklu przedstawiono wyniki modelowania pola temperatury dla dwóch obszarów badań: Wrocławia (A1 do A7) i Polski (A8 do A10), jako przykładów odmiennych uwarunkowań i skal przestrzennych. Dla Wrocławia analizowano przypadki występowania lokalnie warunkowanego zjawiska miejskiej wyspy ciepła (UHI), natomiast Polska stanowiła przykład obszaru, w którym nakładają się interakcje czynników środowiskowych, obserwowane w różnych skalach – od makroskali do skali lokalnej. Zależności przyczynowo-skutkowe mają kluczowe znaczenie dla stosowania wielowymiarowych metod interpolacji. Analizowane przypadki różniły się także rozdzielczością czasową – stopniem agregacji danych: od danych chwilowych dla Wrocławia (A1 do A7), przez średnie dobowe, miesięczne i roczne, aż do wieloletnich średnich miesięcznych i rocznych dla Polski (A8 do A10). Wprowadzenie zróżnicowanego stopnia agregacji danych termicznych przeprowadzono w celu weryfikacji możliwości zastosowania uniwersalnego systemu decyzyjnego dla selekcji optymalnej metody interpolacji.

Prezentowany cykl obejmuje 10 recenzowanych publikacji, przy czym oprócz 3 publikacji z czasopism JCR (A2, A7, A9) i jednej monografii (A10) włączono do niego także rozdziały z wydawnictw monograficznych (A1, A4), recenzowane artykuły konferencyjne (A5), w tym zawarte w bazie Web of Science (A6), oraz publikacje z czasopism listy B wykazu MNiSW (A3, A8). Zabieg ten pozwolił na pełne udokumentowanie przeprowadzonej pracy badawczej, w której zadania częściowe na każdym etapie były rozwiązywane w oparciu o studia przypadków publikowane w wydawnictwach nieimpaktowanych. Następnie dany etap prac był zamykany rozszerzoną, podsumowującą publikacją w czasopiśmie JCR (A2, A7, A9) lub w formie monografii (A10). Takie podejście, w mojej ocenie, dobrze nawiązuje do pojęcia „jednotematycznego cyklu publikacji” zastosowanego przez ustawodawcę (Ustawa 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.). W świetle tego dokumentu, oprócz tego, że publikacje, na podstawie których można wnioskować o uzyskanie stopnia doktora habilitowanego mają mieć charakter jednotematyczny, to powinny stanowić „cykl”, który może być rozumiany jako „seria zdarzeń (tu: publikacji) następujących po sobie w określonym porządku”.

Ponieważ do cyklu włączono jedynie prace z ostatnich 5 lat, powinny zostać one odniesione także do moich wcześniejszych prac z zakresu przestrzennej interpolacji temperatury powietrza.

Pierwsze modele przestrzenne miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu zostały przedstawione w samodzielnych i współautorskich artykułach naukowych w roku 2003 (Szymanowski, 2003; Dubicka, Szymanowski, 2003) oraz w rozprawie doktorskiej, która została opublikowana w formie monografii (Szymanowski, 2004). W pracach tych przedstawiono metodykę modelowania i mapy miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu. Pragnę podkreślić, że patrząc z perspektywy czasu opracowane wtedy modele oceniam jako odznaczające się pewnymi słabościami, zwłaszcza w związku z dopuszczeniem nadmiernej współliniowości zmiennych objaśniających. Fakt ten stanowił impuls do ponownego zajęcia się problemem modelowania przestrzennego temperatury powietrza. Pierwszym krokiem była redefinicja modelu, przedstawiona w publikacji zatwierdzonej do druku w 2004 r., która ukazała się trzy lata później (Szymanowski, Netzel, 2007). W latach 2006–2007 uczestniczyłem w pracach nad interpolacją temperatury powietrza w skali regionalnej (pd.-zach. Polska), w ramach których wykonano pierwsze analizy porównawcze rezultatów osiągniętych wybranymi metodami interpolacyjnymi (Kryza, Szymanowski, 2006; Szymanowski i in., 2006; Kryza i in., 2007). W tym okresie podjęto także pierwsze próby interpolacji pola temperatury dla Wrocławia za pomocą różnych, wstępnie wyselekcjonowanych metod i porównano ich wyniki (Szymanowski, Kryza, 2006; Szymanowski i in., 2006). Doświadczenia te uzyskały swoje podsumowanie w referacie zaprezentowanym na konferencji pt. *Klimat i bioklimat miast* w Łodzi w 2007 r. Publikacje stanowiące podsumowanie tego etapu włączono do przedstawianego cyklu (A1, A2).

Zagadnienia badawcze cyklu, które zostaną poniżej skrótowo omówione obejmują:

1. Analizę porównawczą wybranych metod stosowanych w interpolacji przestrzennej temperatury powietrza (prace A1 do A4 i A6 do A10),
2. Aplikację nowych algorytmów interpolacyjnych (A3, A4, A6 do A10),
3. Opracowanie podstaw metodycznych procedury selekcji optymalnej metody interpolacji z uwzględnieniem niestacjonarności procesu przestrzennego (A9, A10),
4. Tworzenie warstw zmiennych determinujących rozkład temperatury powietrza i ich aplikację w wielowymiarowych metodach interpolacji przestrzennej (A1 do A10),
5. Specyfikację i kalibrację modelu przestrzennego stosownie do przyjętych założeń metodycznych (A1 do A4 i A6 do A10),
6. Ilościową i jakościową walidację wyników modelowania (A1 do A4 i A6 do A10),
7. Wizualizację wyników i tworzenie map temperatury powietrza (A1 do A4 i A6 do A10).

Ad.1. Analiza porównawcza wybranych metod interpolacji przestrzennej temperatury powietrza

Spektrum metod używanych do przestrzennej interpolacji temperatury powietrza jest bardzo szerokie - stosowano w tym celu kilkadziesiąt metod, obejmujących zarówno podstawowe techniki deterministyczne i geostatystyczne, jak i różnorodne ich kombinacje (A10). Wykorzystywane były zarówno metody znane i stosowane w różnych dyscyplinach, jak i te, które rozwijano na potrzeby klimatologii, stosownie do natury modelowanych procesów i charakteru danych wejściowych (metoda gradientowa, *thin-plate splines* - TPS, AURELHY, PRISM, MISH; A10). W świetle literatury przedmiotu, najlepsze wyniki interpolacji elementów klimatu były uzyskiwane przy zastosowaniu metod wielowymiarowych, uwzględniających rolę czynników środowiskowych, zwłaszcza wysokości

bezwzględnej i położenia geograficznego. Do grupy tej należały przede wszystkim metoda regresji wieloczynnikowej (MLR) i oparty o nią kriging resztowy (MLRK, *residual kriging*, *regression-kriging*). Początkowe prace cyklu (A1, A2) prezentują wyniki interpolacji miejskiej wyspy ciepła (UHI) we Wrocławiu za pomocą trzech technik jednowymiarowych: metody odwrotnej odległości (IDW), funkcji sklepanych i krigingu zwyczajnego (OK) oraz dwóch wielowymiarowych: MLR i MLRK. Po raz pierwszy zastosowano w tych pracach metodę MLRK w odniesieniu do lokalnie kształtowanego pola temperatury, gdzie dominującej roli nie odgrywa wysokość, a czynniki pochodne pokrycia i użytkowania terenu. Uzyskane rezultaty wskazały na znaczne ograniczenia metod jednowymiarowych, zwłaszcza w obszarach ekstrapolacji, poza zasięgiem przestrzennym punktów danych. Podkreślono także negatywną cechę metody IDW – tendencję do tworzenia tzw. efektów oczkowych. Za najlepszą z analizowanych metod, a więc taką, która charakteryzowała się najmniejszymi błędami i jednocześnie była efektywnym ekstrapolatorem, uznano MLRK (A1, A2). Kluczowym elementem tego etapu było jednak wskazanie na możliwość występowania niestacjonarności procesu przestrzennego determinującego rozkład temperatury. Oznaczało to, iż zależność temperatury powietrza od poszczególnych czynników środowiskowych – zmiennych niezależnych w analizie regresji, może nie być stała w przestrzeni, jak to zakłada się w modelu MLR.

Ad. 2. Aplikacja nowych algorytmów interpolacji

Stwierdzenie zmiennych przestrzennie zależności temperatury od czynników środowiskowych oraz rekomendacje z opublikowanego w tym samym roku raportu końcowego akcji COST 719 (*COST Action 719 Final Report*, 2008) nakazały skierować prace w kierunku poszukiwania metody pozwalającej w sposób deterministyczny opisać takie niestacjonarne przestrzennie relacje. Naturalnym wyborem okazała się tu regresja ważona geograficznie (*geographically weighted regression* – GWR), metoda stosunkowo nowa i znajdująca wtedy pierwsze aplikacje, głównie z zakresu procesów ekonomicznych i społecznych. Założenia modelu GWR zostały opracowane przez C. Brunsdona, M. Charltona i A.S. Fotheringhama w końcu lat 90. XX w. i przedstawione w szeregu publikacji, z najważniejszym, książkowym podsumowaniem w roku 2002 (Fotheringham i in., 2002). W odróżnieniu od globalnej regresji MLR, GWR jest modelem lokalnym, którego specyfikacja odbywa się w ruchomym oknie. Metoda ta jest z założenia dedykowana procesom o charakterze niestacjonarnym. Kolejną kluczową cechą GWR, odróżniającą ją od globalnego MLR, a także od drugiego z modeli lokalnych regresji, MWR (*moving window regression*; np. Lloyd, 2007), jest to, że w GWR uwzględniony jest wpływ położenia punktów obserwacji na wielkość w punkcie estymacji. Zakłada się, że zgodnie z tzw. pierwszym prawem geografii (Tobler, 1970), większą rolę odgrywają obserwacje z punktów położonych bliżej miejsca estymacji. Zasada ta reprezentowana jest w modelu GWR poprzez system ważenia, opisujący za pomocą funkcji typu gaussowskiego malejącą z odległością siłę oddziaływania. W aplikacjach modelu GWR stosuje się w tym celu odpowiednie wagowe macierze sąsiedztwa (*spatial kernels*). Zastosowanie metody GWR do modelowania miejskiej wyspy ciepła przedstawiono w pracach A3, A4, A6 i A7, natomiast w modelowaniu pola temperatury w Polsce – w publikacjach od A8 do A10. W momencie podjęcia prac z metodą GWR w roku 2008 nie

były mi znane żadne aplikacje tego modelu w klimatologii, choć później uzyskałem dostęp do opublikowanej nieco wcześniejszej pracy z zakresu modelowania opadów (Lloyd, 2007).

W tym czasie metoda krigingu resztowego, opartego na globalnym modelu regresji (MLRK) była już metodą ugruntowaną i znajdującą szereg aplikacji w badaniach środowiska przyrodniczego (Hengl, 2007), w tym i w klimatologii (Ustrnul, Czekierda, 2003). Naturalną konsekwencją użycia lokalnej metody GWR wydawało się jej rozszerzenie o kriging reszt, co po raz pierwszy zaprezentowano w pracy A3. Koncepcja i nazwa tej metody, łącznie z akronimem GWRK była propozycją autorską. Później, bo w roku 2010, ukazała się publikacja Harrisa i in. (2010), której współautorami byli jedni z głównych twórców metody GWR – S. Fotheringham i M. Charlton. W opracowaniu tym, dla krigingu resztowego opartego na modelu regresji GWR użyto nazwy GWR-kriging z akronimem GWRK. Tak więc według mojej wiedzy, to w pracy A3 po raz pierwszy zastosowano metodę krigingu reszt opartego na modelu regresji ważonej geograficznie (GWRK).

Ad. 3. Opracowanie podstaw metodycznych procedury selekcji optymalnej metody interpolacji z uwzględnieniem niestacjonarności procesu przestrzennego

Analiza porównawcza modeli regresji, której metodyka zostanie przedstawiona w dalszej części autoreferatu (Ad. 5), wykazała, że w każdym z analizowanych 7 przypadków UHI (A7) i 69 przypadków pola temperatury dla Polski (A9, A10) model GWR jest statystycznie istotnie lepiej dopasowany do danych obserwacyjnych niż model MLR. Daje to każdorazowo podstawę do wnioskowania o niestacjonarnym charakterze badanego procesu przestrzennego. Dodatkowo, kriging reszt jest bardzo efektywną metodą interpolacji przestrzennej. W niektórych przypadkach MLRK może dawać wyniki zbliżone, choć w świetle przeprowadzonych badań, nigdy nie lepsze niż GWRK (A3, A7). Jednakże zachowując przyjęte założenia i poprawność metodyczną w modelowaniu części deterministycznej, za optymalną technikę krigingu resztowego w odniesieniu do temperatury powietrza we Wrocławiu i Polsce można uznać model GWRK (A7, A9, A10).

Czy jednak GWRK zawsze może być uznany za optymalny i użyty do wykonania przestrzennej interpolacji temperatury powietrza? Problem selekcji optymalnej metody modelowania jest jednym z wiodących wątków cyklu. Początkowo (A1, A2) przyjęto powszechnie stosowaną w literaturze przedmiotu zasadę, iż każdy przypadek powinien być traktowany indywidualnie, a metoda obarczona najmniejszymi błędami winna być uznana za optymalną. Tak więc to ocena ilościowa, np. za pomocą walidacji krzyżowej, oraz ocena wizualna wyników modelowania powinna decydować o wyborze najlepszej metody. Jednak wspomniana już mnogość metod i ich kombinacji, a także wyniki porównań (A1, A2), wskazujące na metody wielowymiarowe, a zwłaszcza kriging resztowy, dały impuls do poszukiwania bardziej uniwersalnego schematu postępowania. Założono, że u podstawy wyboru metody powinien leżeć charakter procesu przestrzennego, który znajduje swój wyraz w danych pomiarowych i ich relacjach z elementami środowiska geograficznego. Punkt wyjścia do opracowania takiego schematu stanowiło opublikowane przez Hengla (2007) drzewo decyzji dla selekcji optymalnego interpolatora typu BLUP (*best linear unbiased predictor*). W przypadku temperatury powietrza skoncentrowano się przy tym na jednej z gałęzi tego schematu, która twierdząco odpowiada na pytanie o istnieniu zależności środowiskowej (tzw. korelacji środowiskowej; Hengl, 2007)

modelowanego elementu. Wszystkie prace cyklu wskazują, że w każdym z analizowanych przypadków występują czynniki środowiskowe warunkujące rozkład temperatury, a zależność ta jest statystycznie istotna i może być wyrażona za pomocą wielowymiarowego modelu deterministycznego. W przypadku odpowiedzi negatywnej, co jednak dla temperatury powietrza należy uznać za mało prawdopodobne, wybór odbywałby się spośród metod jednowymiarowych, np. OK lub IDW, w zależności od stopnia autokorelacji przestrzennej analizowanej zmiennej (Hengl, 2007).

Z punktu widzenia analizy przestrzennej temperatura powietrza może być traktowana jako zmienna zregionalizowana. Koncepcja ta została zaproponowana przez Matherona (1963, 1971) dla podkreślenia pośrednich cech zmiennej zregionalizowanej pomiędzy zmiennymi losowymi i zmiennymi deterministycznymi. Zmienne zregionalizowane można uznać za klasę zmiennych losowych, składających się komponentów: strukturalnego, lokalnego i przypadkowego. Taki zintegrowany model został nazwany przez Matherona uniwersalnym modelem zmienności przestrzennej. Komponenty deterministyczny i stochastyczny (reszt modelu deterministycznego) zmienności mogą być modelowane oddzielnie, a jego matematycznym wyrazem może być kriging resztowy (np. A10), stanowiący generyczną postać modelu danych przestrzennych o charakterystyce BLUP – najefektywniejszego (o najmniejszej wariancji), liniowego, nieobciążonego predyktora (Stein, 1999).

Schemat Hengla (2007), adekwatnie do opisanych powyżej właściwości modelu GWR, został w mojej koncepcji rozszerzony o pytanie dotyczące stacjonarności procesu determinującego rozkład temperatury (A9, A10). Jeśli odpowiedź była pozytywna to część deterministyczną zmienności modelowano za pomocą GWR, jeśli negatywna, to stosowano MLR. Ostatnia decyzja według tego schematu zapadała po analizie reszt modelu regresji. Jeśli stwierdzona została autokorelacja przestrzenna reszt, pozwalająca na dopasowanie wariogramu teoretycznego różnego od czystego efektu samorodków, możliwe było rozszerzenie modelu regresji o komponent stochastyczny, do postaci MLRK lub GWRK (A9, A10). Metody i miary statystyczne, niezbędne do podjęcia sekwencji decyzji zostaną opisane w dalszej części referatu.

Ad. 4. Tworzenie warstw zmiennych determinujących rozkład temperatury powietrza i ich aplikacja w wielowymiarowych metodach interpolacji przestrzennej

Wszystkie wielowymiarowe metody interpolacji wymagają uwzględnienia w modelu dodatkowych zmiennych, nazywanych ogólnie środowiskowymi (Hengl, 2007). Z założenia, zmienne te powinny być istotnie skorelowane z interpolowanym elementem i odzwierciedlać rolę zmiennej środowiskowej w procesie fizycznym determinującym rozkład badanego elementu w przestrzeni. W przypadku metod regresji są to zawarte w modelu zmienne niezależne. Należy podkreślić, że do specyfikacji i kalibracji modelu wystarczająca jest informacja o wielkości zmiennych niezależnych w punktach obserwacji badanej zmiennej zależnej, jednak do wykonania przestrzennej interpolacji wymagane są wielkości zmiennych objaśniających w każdym punkcie interpolacji. W publikacjach cyklu ciągle rozkład przestrzenny temperatury powietrza i zmiennych środowiskowych wyrażony był ich wielkościami w regularnych sieciach *grid*, reprezentowanych w analizie przez model rastrowy o zadanej rozdzielczości przestrzennej. Dla Wrocławia i dla Polski stosowano kwadratowe komórki rastra w układzie UWPP1992 o rozdzielczości odpowiednio: 25 m i 250 m.

W pracach podejmujących modelowanie UHI we Wrocławiu początkowo (A1 do A4) wykorzystywano zestaw danych środowiskowych przygotowany na potrzeby realizacji pracy doktorskiej (Szymanowski, 2004). Obejmował on 4 zmienne opracowane na podstawie mapy pokrycia terenu i map topograficznych: współczynnik szorstkości, admitancję termiczną oraz udział powierzchni sztucznych i naturalnych w otoczeniu punktów danych i punktów estymacji. Dodatkowo do zbioru zmiennych włączono indeks wegetacji NDVI obliczony z danych satelitarnych Landsat TM oraz estymowaną emisję ciepła sztucznego (Chudzia, Dubicka, 1998), którą powiązano z klasami pokrycia terenu. W celu oddania wielkości zmiennych środowiskowych w otoczeniu danego punktu, a więc uwzględnienia roli tzw. obszaru źródłowego, posłużono się filtrami dolnoprzepustowymi w ruchomym oknie o zmiennej wielkości, od 50 do 1000 m (A2). W rezultacie każda ze zmiennych została sporządzona w kilku wariantach, co łącznie dawało kilkadziesiąt warstw, z których dokonywano selekcji zmiennych do modelu regresji. Spośród wymienionych zmiennych najczęściej do modeli były włączane: NDVI, współczynniki szorstkości i admitancji oraz emisja ciepła sztucznego (A1 do A4). Zmienne te w 7 analizowanych przypadkach UHI pozwoliły na wyjaśnienie od 66% do 81% zmienności temperatury za pomocą modelu MLR, a od 75% do 85% za pomocą modelu GWR (A2, A4).

W kolejnym etapie prac postawiono za cel sprawdzenie, na ile wprowadzenie nowych, precyzyjniej obliczonych zmiennych objaśniających może poprawić jakość przestrzennej predykcji. Przygotowanie nowych zmiennych było możliwe dzięki uzyskaniu dostępu do danych ze skaningu lidarowego i bazy 3D zabudowy Wrocławia. Na tej podstawie obliczono rozkład współczynników szorstkości, porowatości i odsłonięcia horyzontu fizycznego (SVF), a także przeprowadzono modelowanie dopływającego promieniowania słonecznego na powierzchnię poziomą i z uwzględnieniem pionowych ścian budynków (A5, A7). Zbiór zmiennych rozszerzono, przetwarzając zobrazenia satelitarne Landsat ETM+, z których obliczono warstwy: emisyjności, albedo i temperatury powierzchni, a oprócz NDVI obliczono dodatkowo indeksy wegetacji, uwzględniające rolę podłoża glebowego (SAVI) i zawartości wody w roślinach (NDMI). Mimo wysokiej korelacji z temperaturą powietrza każdej z obliczonych zmiennych (A5), ogólna poprawa wyjaśnienia zmienności temperatury w nowozdefiniowanych modelach nie przekraczała kilku procent. Jedynie w przypadku UHI z dnia 3.01.2002 r. zaobserwowano zwiększenie stopnia wyjaśnienia o 19%, głównie za sprawą wprowadzenia do modelu temperatury powierzchni (A6, A7). Ogólnie, nowe zmienne w modelach GWR pozwoliły na zwiększenie stopnia wyjaśnienia deterministycznej części zmienności temperatury do 79% - 88% (A7).

Pole temperatury we Wrocławiu jest determinowane głównie przez czynniki będące pochodnymi pokrycia i użytkowania terenu. Modelowanie pola temperatury dla Polski wymagało jednak przygotowania zestawu zmiennych, które odzwierciedlałyby oddziaływania w różnych skalach przestrzennych, będących konsekwencjami m.in. położenia geograficznego, wysokości, rzeźby i pokrycia terenu (A8 do A10). W zasobie potencjalnych predyktorów uwzględniono trzy grupy zmiennych:

- zmienne ogólnej tendencji przestrzennej, obejmujące warstwy współrzędnych oraz indeks odległości od morza,

- numeryczny model wysokości i jego warstwy pochodne: nachylenie, indeks wklęsłości/wypukłości, indeks fenowy i insolację,
- pokrycie terenu i jego pochodne: udział procentowy powierzchni naturalnych i sztucznych w otoczeniu punktu oraz znormalizowany indeks wegetacji NDVI.

Warstwy zmiennych zostały przygotowane technikami analiz przestrzennych z wykorzystaniem numerycznego modelu wysokości SRTM oraz baz pokrycia terenu CORINE Land Cover i USGS Land Cover. Dla części zmiennych przygotowano także warianty odzwierciedlające zróżnicowane oddziaływanie lokalne poprzez uśrednianie w ruchomym oknie kołowym o promieniu 1250, 2500 i 5000 m. Modele GWR, wyspecyfikowane i skalibrowane w oparciu o te zmienne pozwoliły, w zależności od przypadku, na wyjaśnienie od 39% do 97% wariancji temperatury (A10). Zgodnie z oczekiwaniami najniższe wielkości wyjaśnienia części deterministycznej były obserwowane dla przypadków o najniższym stopniu agregacji (średnie dobowe), zwłaszcza w sytuacjach, gdzie dominującą rolę odgrywały czynniki dynamiczne, np. adwekcje mas z przemieszczającymi się frontami atmosferycznymi. Pomimo zastosowania metody dedykowanej procesom niestacjonarnym, brak możliwości przygotowania warstw zmiennych oddających na przykład quasi-skokową zmianę temperatury w przemieszczającej się strefie frontu sprawiał, że pozostała część zmienności temperatury musiała być zawarta w komponencie stochastycznym modelu. Były to jednak przypadki jednostkowe – jedynie siedmiokrotnie na 69 analizowanych przypadków współczynnik determinacji modelu GWR był niższy niż 0.70 (A9). Wszystkie przygotowane zmienne były statystycznie istotne i zostały wprowadzone do przynajmniej kilku modeli. Zgodnie z oczekiwaniami najistotniejszym predyktorem była wysokość bezwzględna, choć co ciekawe, wystąpiły trzy przypadki średniej temperatury dobowej, w których nie była ona istotnie skorelowana z temperaturą i nie została wprowadzona do modelu. Oprócz wysokości, najczęściej do modelu wprowadzane były zmienne: współrzędna X, indeks odległości od morza i współrzędna Y, a najrzadziej indeks wklęsłości/wypukłości terenu – 6 razy (A9, A10).

Ad. 5. Specyfikacja i kalibracja modelu przestrzennego stosownie do przyjętych założeń metodycznych

Podstawowym założeniem przyjętym do budowy modeli regresji było całkowicie deterministyczne podejście do procesu przestrzennego – model regresji powinien być tak skonstruowany, aby zachowując poprawność metodyczną dało się wyjaśnić uwzględnione zależności za pomocą praw fizycznych. Założenie to wymuszało przestrzeganie określonych kryteriów na etapie specyfikacji i kalibracji, zarówno modeli MLR, jak i GWR. Poniżej opisane zostaną podstawowe techniki, miary i testy statystyczne wykorzystane w budowie modeli oraz pozwalające na udzielenie jednoznacznych odpowiedzi w odniesieniu do zaprezentowanego powyżej schematu wyboru optymalnej metody interpolacji.

Wprowadzanie zmiennych do modelu MLR przeprowadzono metodą regresji krokowej postępującej (A1 do A10), zakładając że powinny zostać wprowadzone jedynie zmienne silnie i istotnie skorelowane z temperaturą powietrza ($p < 0,05$). Ponieważ przygotowane zbiory potencjalnych predyktorów temperatury dla Wrocławia i Polski zawierały zmienne wzajemnie skorelowane,

każdorazowo przeprowadzano analizę współliniowości modelu za pomocą współczynnika inflacji wariancji VIF. Z modelu wykluczano zmienne o $VIF > 10$. W pełni deterministyczne podejście do modelu realizowano poprzez analizę znaku (zwrotu) współczynników regresji, który z założenia powinien być zgodny z zakładaną, dodatnią lub ujemną, korelacją zmiennej objaśniającej z temperaturą powietrza. Zmienne niespełniające tego warunku nie były wprowadzane do modelu. Szacowanie parametrów funkcji regresji było dokonywane metodą najmniejszych kwadratów. W modelu GWR stosowano dokładnie te same zmienne, które wprowadzono do MLR. Kalibracja modelu GWR odbywała się także w zgodzie z koniecznością zachowania możliwości fizycznej interpretacji modelu. W nawiązaniu do nieregularnego rozmieszczenia punktów pomiarowych, każdorazowo stosowano zmienną wielkość sąsiedztwa (*adaptive kernels*), która definiowana była nie miarą odległości, a liczbą punktów uwzględnianych w każdym lokalnym modelu. Aby lokalne modele miały sens statystyczny przyjęto ograniczenie wielkości lokalnego sąsiedztwa do 20 punktów w przypadku Wrocławia (206 punktów danych) i 25 punktów dla Polski (250 punktów danych), przy zachowaniu zasady, że liczba punktów powinna być kilkukrotnie (3 do 4 razy) większa od liczby zmiennych modelu (np. A7, A9). Badanie prowadzone nad zależnością dopasowania modelu od wielkości kernela wykazały, iż obserwowany jest wzrost ogólnego współczynnika determinacji i spadek wielkości kryterium informacyjnego Akaike (AIC) wraz z malejącą wielkością sąsiedztwa. Nie można jednak stosować automatycznie najmniejszego możliwego kernela, gdyż taki zabieg może prowadzić do wystąpienia lokalnej zmiany znaku współczynnika regresji na przeciwny od zakładanego. W związku z tym przyjęto nowatorskie metodycznie rozwiązanie określenia wielkości sąsiedztwa w modelu GWR: zdecydowano, że wielkość okna powinna być jak najmniejsza, ale taka, dla której w całej domenie przestrzennej nie jest obserwowana zmiana znaku żadnego parametru regresji (A4, A6 do A10).

Dopasowanie modeli MLR i GWR do danych obserwacyjnych oceniano za pomocą szeregu miar i testów. Porównywano takie statystyki, jak skorygowany współczynnik determinacji ($R^2_{adj.}$), błąd standardowy estymacji (STE) oraz skorygowane kryterium informacyjne Akaike (AICc). Dodatkowo stosowano analizę wariancji (ANOVA) dla reszt modeli regresji, za pomocą której sprawdzano, czy występuje istotna statystycznie poprawa dopasowania modelu GWR względem MLR, wyrażająca się zmniejszeniem sumy kwadratów reszt modelu (A6 do A10).

Rozszerzenie modelu o komponent geostatystyczny nie jest procedurą następującą automatycznie po specyfikacji równania regresji. Ma ona sens jedynie, gdy stwierdzona zostanie przestrzenna autokorelacja reszt części deterministycznej. W przeciwnym razie, przy braku autokorelacji, wariogram przyjmuje formę czystego efektu samorodków, a co za tym idzie, predykcja w każdym punkcie obszaru badań jest równa średniej z reszt regresji, która z założenia w modelu MLR jest równa zero. W modelu GWR, który nie spełnia kryterium nieobciążoności, średnia reszt jest różna, ale na tyle bliska zera (Fotheringham i in., 2002), iż można przyjąć, że modyfikacja predykcji przez kriging reszt jest zaniedbywalna przy braku autokorelacji.

Podstawową miarą autokorelacji przestrzennej stosowaną w pracach cyklu była statystyka I Morana. Początkowo wykorzystywano ją jako jedną z miar detekcji niestacjonarności procesu (A6, A7). W momencie rozpoczęcia prac nad schematem selekcji optymalnego predyktora, analiza

autokorelacji stała się podstawą decyzji o rozszerzeniu modelu regresji o komponent stochastyczny, a pytanie o przestrzenną autokorelację reszt włączono do drzewa decyzji (A9, A10). Dla Polski, istotną statystycznie, dodatnią autokorelację przestrzenną reszt regresji GWR, dającą podstawą do rozszerzenia modelu do postaci GWRK, stwierdzono w 54 na 69 analizowanych przypadków (A9, A10).

Modelowanie wariogramów dla temperatury we Wrocławiu (A1, A2) oraz dla reszt modeli regresji (A1 do A3, A5, A7) przeprowadzano w sposób automatyczny lub półautomatyczny. Użycie takich procedur optymalizacji parametrów wariogramu było jednak nieskuteczne w wielu przypadkach pola temperatury dla Polski, w związku z występowaniem braku struktury lub wręcz zmniejszaniem się semiwariancji dla początkowych klas odstępów (A9, A10). Tendencja ta wydaje się naturalna, gdy w obszarze badań występują obszary górskie, gdzie w niewielkich odległościach (metryka euklidesowa) położone są stacje o znacząco różnych wielkościach temperatury. W takich przypadkach model deterministyczny, estymowany metodą najmniejszych kwadratów, może nie być wystarczająco efektywny, w związku z czym możliwe jest wystąpienie w bliskim sąsiedztwie reszt o przeciwnych znakach i dużych wartościach bezwzględnych. W związku z powyższym, dopasowanie wariogramu teoretycznego do eksperymentalnego dla reszt modeli regresji pola temperatury w Polsce przeprowadzono techniką manualną. Najczęściej wykorzystywanym w tym celu modelem była funkcja eksponencjalna (rzadziej sferyczna lub gaussowska). W każdym z modeli uwzględniony był także efekt samorodków, tak więc kriging resztowy w tych przypadkach nie zachowywał charakteru interpolatora wiernego (A9, A10).

Ad.6. Ilościowa i jakościowa walidacja wyników modelowania

Ocena wyników interpolacji była elementem procedury, której poświęcono w cyklu szczególną uwagę. W moim przekonaniu kompleksowa ocena, zarówno modelu matematycznego, jak i uzyskanych za jego pomocą rozkładów przestrzennych – map analizowanych elementów, a także dostarczenie odbiorcy rzetelnej informacji o wielkości, miejscach i potencjalnych źródłach błędów oraz o stopniu niepewności oszacowania, powinno być warunkiem *sine qua non* opracowań interpolacyjnych. W studiach metodycznych o charakterze porównawczym analiza błędów służy między innymi do wyboru metody optymalnej, za którą na ogół uważa się metodę obarczoną najmniejszymi, w ujęciu ilościowym, błędami (A1, A2). Należy przy tym pamiętać, iż rzeczywista kwantyfikacja może być dokonana jedynie w miejscach pomiaru, co w klimatologii oznacza najczęściej kilkadziesiąt lub kilkaset punktów. Poza miejscami obserwacji, jeśli nie stosuje się czystych metod stochastycznych, ocena nosi w dużej mierze charakter subiektywny, bazujący na tzw. wiedzy eksperckiej i wizualnym oglądzie uzyskanych wyników. W szczególności pozwala ona na detekcję takich mało realistycznych efektów, jak: zerwania ciągłości przestrzennej, nadspodziewanie duże bądź małe wartości modelowane zmiennej, zwłaszcza w obszarach ekstrapolacji, silne tendencje kierunkowe lub regionalne oraz różnorodne artefakty, obrazujące częściej właściwości algorytmu interpolacyjnego bądź zmiennych objaśniających, a nie interpolowanej zmiennej (A10).

Choć inspekcja wizualna jest bardzo ważnym elementem oceny wyników, to kluczowe znaczenie przypisuje się jednak obiektywnej, ilościowej ocenie wyników, a ściślej błędów modelowania.

W prezentowanym cyklu podstawę oceny stanowiła walidacja krzyżowa (*cross-validation* - CV) typu *leave-one-out*, pozwalająca na oszacowanie wielkości błędów w każdym punkcie pomiaru, a poprzez iteracyjny charakter procedury, na jednoczesne traktowanie tego punktu jak lokalizacji nieoprobowanej. Metoda ta, choć obliczeniowo wymagająca, pozwala na pozostawienie w procesie modelowania całej populacji punktów z pomiarami w odróżnieniu od, na przykład, metody używającej zbioru kontrolnego, na rzecz którego traci się część populacji danych. Ma to kluczowe znaczenie w interpolacji temperatury, gdzie na ogół zbiór danych wejściowych jest niewielki (w sensie statystycznym).

Wielkości błędów CV dla różnych metod były w opracowaniach cyklu analizowane i porównywane za pomocą statystyk opisowych (wartości ekstremalne, skośność, kurtoza) i podstawowych miar syntetycznych, jak błąd średni, średni błąd bezwzględny, pierwiastek błędu średniokwadratowego (wszystkie prace, oprócz A5). Wielkości błędów były także umieszczane na mapach w celu analizy przestrzennego rozmieszczenia błędów, co pozwalało na rozpoznanie obszarów zwiększonej niepewności oszacowania temperatury. W późniejszym etapie (A7, A10) zaproponowano kwantyfikację tendencji w przestrzennym rozkładzie błędów CV, opartą na lokalnej mierze przestrzennej autokorelacji I_i Morana. Dodatkowo, istotnie statystycznie klastry wielkości podobnych (o wysokich lub niskich wielkościach błędu) oraz elementy odstające – istotnie różniące się od sąsiednich, zostały zidentyfikowane według tzw. moranowskiego wykresu rozproszenia i przedstawione na mapach za pomocą dedykowanych sygnatur (A7, A10). Metodycznie było to rozwiązanie nowatorskie, znacząco ułatwiające interpretację rozkładu przestrzennego błędów modelu.

Ad. 7. Wizualizacja wyników i tworzenie map temperatury powietrza

Zwieńczeniem procedury modelowania, a jednocześnie niezbędnym elementem oceny jakości, jest wizualizacja wyników przestrzennej interpolacji i opracowanie map. W większości publikacji cyklu (A1 do A4 i A6 do A9) interpolowana temperatura powietrza jest przedstawiona na mapach za pomocą skali skokowej lub ciągłej, w kolorze lub odcieniach szarości, zależnie od uwarunkowań i wytycznych wydawniczych. Dodatkowo na każdej mapie przedstawiane są błędy walidacji krzyżowej. Sygnatury opracowane zostały tak, aby możliwe było określenie wielkości błędu (proporcjonalnie do wielkości symbolu) i znaku błędu (barwa symbolu). Wielkości błędów bliskich zeru z reguły przedstawiano odrębną, szarą sygnaturą. Taki system prezentacji błędów CV pozwala na identyfikację obszarowych tendencji do przeszacowania/niedoszacowania wielkości temperatury przez model. W pracach A7 i A10 dodatkowo na mapach zaprezentowano za pomocą rozszerzonych sygnatur obiekty podobne i odmienne od sąsiadujących, zgodnie ze wspomnianym powyżej wykresem moranowskim.

W pracy A10, która ma formę monografii, a nie artykułu w czasopiśmie naukowym, możliwe było odmienne podejście do prezentacji kartograficznej. Od strony wizualnej mapy zostały przygotowane podobnie, jak we wcześniejszych pracach. Opracowana została jednak uniwersalna skala barwna, obejmująca zakres od -30°C do $+30^{\circ}\text{C}$, ze zmianą barwy co $0,5^{\circ}\text{C}$. Dało to możliwość porównywania map wszystkich 69 przypadków, niezależnie od zakresu temperatury, a więc niezależnie od pory roku i stopnia agregacji danych. Na mapach została zawarta informacja tekstowa opisująca właściwości modelu – metody, zmienne, dopasowanie oraz miary syntetyczne błędów CV. Mapy w monografii

zostały opublikowane w formie cyfrowej (format PDF), co oprócz sporządzenia wydruku, zapewniło możliwość korzystania z wybranych funkcjonalności map w oprogramowaniu GIS. Zachowują one georeferencję oraz pozwalają na dostęp do tabel atrybutowych warstw wektorowych. W tym przypadku zapewniono dostęp do informacji o wielkości modelowanej temperatury, wielkości błędu CV, wielkości lokalnej statystyki Morana oraz typie relacji przestrzennej błędów CV. Warstwy wektorowe i rastrowe tworzące dokument mapowy mogą być włączane/wyłączane w zależności od potrzeb (A10).

Za swoje najważniejsze osiągnięcia naukowe w odniesieniu do przedłożonego cyklu publikacji uważam:

1. W efekcie przeprowadzenia szeregu analiz porównawczych wyników przestrzennej interpolacji temperatury powietrza wykonanej różnymi metodami, wykazałem, iż metody wielowymiarowe, a szczególnie kombinowana metoda krigingu resztowego, pozwalają na uzyskanie znacząco lepszych wyników modelowania niż metody jednowymiarowe.
2. Zastosowanie stosunkowo nowej metody, regresji ważonej geograficznie – GWR do interpolacji przestrzennej temperatury powietrza. Testy przeprowadzone dla 7 przypadków miejskiej wyspy ciepła i 69 przypadków pola temperatury w Polsce wykazały, iż lokalny model regresji GWR w każdym przypadku był lepiej dopasowany niż globalny model regresji wieloczynnikowej, MLR. Taki wynik pozwala na wnioskowanie o niestacjonarnym charakterze procesu przestrzennego, a w konsekwencji wskazuje na wysoce prawdopodobną potrzebę zastąpienia tradycyjnie wykorzystywanego modelu MLR przez GWR. Zabieg ten powinien pozwolić na osiągnięcie lepszych wyników modelowania deterministycznej części zmienności przestrzennej temperatury powietrza.
3. Opracowanie nowatorskiej procedury metodycznej kalibracji modelu GWR, w tym wyznaczania optymalnej wielkości sąsiedztwa (*adaptive kernel*) przy zachowaniu możliwości wyjaśnienia procesu przestrzennego znanymi prawami fizyki.
4. Zastosowanie miary autokorelacji przestrzennej (statystyka I Morana) do podjęcia decyzji o możliwości wymodelowania dla reszt regresji wariogramu innego niż czysty efekt samorodków, a w konsekwencji możliwości rozszerzenia modelu regresji (GWR lub MLR) do postaci krigingu resztowego.
5. Opracowanie, w oparciu m.in. o drzewo decyzji Hengla i uniwersalny model zmienności Matherona, systemu selekcji optymalnej metody interpolacji, przy założeniu występowania możliwych do opisanie matematycznego korelacji środowiskowych i uwzględnieniu potencjalnej niestacjonarności procesu przestrzennego. System ten może być traktowany jako uniwersalny w odniesieniu do temperatury powietrza i, z dużą dozą prawdopodobieństwa, jako taki do innych elementów klimatu i zmiennych zdeterminowanych środowiskowo. Pozwala on na uproszczenie procedury doboru optymalnej metody interpolacji bez wykonywania pełnego, czasochłonnego wachlarza testów i walidacji rezultatów otrzymanych różnymi metodami.
6. Opracowanie i wdrożenie nowej metody interpolacji – krigingu reszt regresji ważonej geograficznie, GWRK. Ze względu na lepsze dopasowanie do obserwacji modelu GWR niż MLR, model GWRK w pracach cyklu zastąpił tradycyjnie stosowany dla temperatury kriging resztowy bazujący na

globalnym modelu regresji. Uniwersalność tego stwierdzenia w odniesieniu do innych elementów środowiska może być weryfikowana przez zastosowanie wspomnianego powyżej systemu selekcji optymalnego metody interpolacji przestrzennej.

7. Opracowanie metodyki przygotowania szeregu warstw zmiennych środowiskowych i przeprowadzenie testów ich przydatności do modelowania pola temperatury powietrza. Uzyskane wyniki i opracowane zmienne mogą być wykorzystane do modelowania przestrzennego innych elementów klimatu i środowiska geograficznego.
8. Opracowanie procedury oceny wyników modelowania bazującej na walidacji krzyżowej typu *leave-one-out*. Procedura, oprócz porównania miar syntetycznych, obejmuje nowatorską analizę rozkładu przestrzennego błędów wraz z detekcją elementów odstających i klastrów podobnych wielkości w oparciu o lokalną miarę autokorelacji przestrzennej.
9. Przygotowanie założeń wizualizacji wyników modelowania i map temperatury powietrza w formacie PDF. Taki sposób opracowania dokumentów kartograficznych umożliwia stosunkowo łatwą dystrybucję i dostęp do wyników bez specjalistycznego oprogramowania, jednocześnie zapewniając możliwość wykorzystania wybranych funkcjonalności oprogramowania GIS, w tym dostęp do wybranej informacji atrybutowej.

Spis literatury

Chudzia D., Dubicka M., 1998, *Przestrzenne zróżnicowanie emisji ciepła antropogenicznego we Wrocławiu*, Acta Universitatis Lodzensis, Folia Geographica Physica, 3, 295–305.

COST Action 719 Final Report, 2008, Tveito O.E., Wegehenkel M., van der Wel F., Dobesch H. (red.), *The use of Geographic Information Systems in climatology and meteorology*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ss. 246.

Dobesch H., Dumolard P., Dyras I. (red.), 2007, *Spatial interpolation for climate data: the use of GIS in climatology and meteorology*, ISTE Ltd, London, ss. 284.

Dubicka M., Szymanowski M., 2003, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu – struktura przestrzenna i czasowa* [w:] Błażejczyk K., Krawczyk B., Kuchcik M. (red.) *Postępy w badaniach klimatycznych i bioklimatycznych*, Prace Geograficzne, 188, 145–165.

Fotheringham A. S., Brunson C., Charlton M., 2002, *Geographically weighted regression: the analysis of spatially varying relationships*, Wiley, ss. 282.

Harris P., Fotheringham A.S., Crespo R., Charlton M., 2010, *The use of Geographically Weighted Regression for spatial prediction: an evaluation of models using simulated data sets*, Mathematical Geosciences, 42, 657–680.

Hengl T., 2007, *A practical guide to geostatistical mapping of environmental variables*, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg, ss. 143.

Kryza M., Szymanowski M., 2006, *Ocena wybranych metod interpolacji minimalnej temperatury powietrza*, Annales UMCS, Sec. B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 61, 227–235.

Kryza M., Szymanowski M., Wieczorek M., 2007, *Wybrane metody interpolacji w modelowaniu map ekstremalnej temperatury powietrza (na przykładzie południowo-zachodniej Polski)*, Przegląd Geofizyczny, 52(1), 61–82

Li J., Heap A.D., 2008, *A review of spatial interpolation methods for environmental scientists*, Geoscience Australia, Record, 2008/23, ss. 137.

Lloyd C.D., 2007, *Local models for spatial analysis*, CRC Press, Boca Raton, ss. 244.

Matheron G., 1963, *Principles of geostatistics*, Economic Geology, 58, 1246–1266.

Matheron G., 1971, *The theory of regionalised variables and its applications*, Les Cahiers du Centre de Morphologie Mathematique de Fontainebleau, 5, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, ss. 211.

Piasecki J., Szymanowski M., 1995, *Warunki termiczne w górnym odcinku doliny Kleśnicy w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Instytutu Geograficznego Ser. C: Meteorologia i Klimatologia II, 89–105.

Stein M.L., 1999, *Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging*, Series in Statistics. Springer, New York, ss. 247.

Szalai S., Bihari Z., Szentimrey T., Lakatos M. (red.), 2007, *COST Action 719: The use of Geographic Information Systems in climatology and meteorology*, Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, 25–29 October 2004, ss. 257.

Szymanowski M., 2003, *Modelling of the urban heat island*, Acta Universitatis Wratislaviensis [w:] Pyka J.L., Dubicka M., Szczepankiewicz-Szmyrka A., Sobik M., Błaś M. (red.) *Man and climate in the 20th century*, Studia Geograficzne, 75, 493–503.

Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*, Studia Geograficzne, 77, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, ss. 229.

Szymanowski M., Kryza M., 2006, *Evaluation of selected spatialisation techniques in urban heat island estimation*, Preprints of 6th International Conference on Urban Climate, Göteborg, Sweden, June 12th – 16th 2006, 435–438.

Szymanowski M., Kryza M., 2011, *Modele regresji i ich rozszerzenia w przestrzennej interpolacji danych* [w:] Żyszkowska W., Spallek W. (red.), *Główne problemy współczesnej kartografii 2011. Zastosowanie statystyki w GIS i kartografii*, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 174–196.

Szymanowski M., Netzel P., 2007, *Air temperature field modelling in Wrocław, Poland using GIS/GRASS system* [w:] Szalai S., Bihari Z., Szentimrey T., Lakatos M. (red.) *COST Action 719: The use of Geographic Information Systems in climatology and meteorology*, Proceedings from the Conference on Spatial Interpolation in Climatology and Meteorology, Budapest, 25–29 October 2004, ss. 257.

Szymanowski M., Kryza M., Wieczorek M., 2006, *Problemy przestrzennej interpolacji danych* [w:] Pawlak W., Spallek W. (red.), *Główne problemy współczesnej kartografii 2006. Świat techniki w kartografii*, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, 60–77.

Tobler W., 1970, *A computer movie simulating urban growth in the Detroit region*, Economic Geography, 46(2):234–240.

Ustrnul Z., Czekierda D., 2003, *Zróżnicowanie przestrzenne warunków termicznych powietrza Polski z wykorzystaniem GIS*, Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Warszawa, ss. 83.

5. Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo-badawczych (artystycznych)

Tytuł magistra uzyskałem w roku 1989 po obronie pracy magisterskiej pt. „Warunki termiczne górnego odcinka doliny Kleśnicy” wykonanej pod opieką dr J. Piaseckiego. Materiały do realizacji pracy zostały zgromadzone samodzielnie poprzez prowadzenie dwuletnich pomiarów meteorologicznych za pomocą sieci termohigrografów oraz uzupełniających badań patrolowych. Uzyskane materiały pozwoliły na szczegółową analizę dynamicznych zmian struktury pola temperatury w dolinie górskiej, kształtowanego przez procesy fenopochodne i katabatyczne spływy stokowe, prowadzące do tworzenia się zastoisk chłodnego powietrza. Rezultaty tych prac zostały podsumowane i opublikowane w roku 1995 (Piasecki, Szymanowski, 1995). W trakcie zbierania materiałów do pracy magisterskiej, realizowałem także badania monitoringowe klimatu Jaskini Niedźwiedziej.

Jeszcze w trakcie studiów na ostatnim roku podjąłem pracę w Instytucie Geograficznym Uniwersytetu Wrocławskiego, początkowo w laboratorium hydrochemicznym, a po roku jako pracownik inżynierjno-techniczny w Zakładzie Meteorologii i Klimatologii. Do moich głównych obowiązków należało prowadzenie obserwacji i pomiarów w obserwatoriach meteorologicznych na Szrenicy i we Wrocławiu. Na przełomie lat 1991/1992 uczestniczyłem w XVI Polskiej Wyprawie Antarktycznej w ramach projektu „Wymiana materii i energii pomiędzy lądem a oceanem w rejonie Zatoki Admiralicji na Wyspie Króla Jerzego” kierowanego przez prof. A. Kostrzewskiego. W drugiej połowie lat 90. brałem udział w reorganizacji i automatyzacji pomiarów meteorologicznych na Szrenicy (Migała, Szymanowski, 1999), w Kletnie i Jaskini Niedźwiedziej, a zwłaszcza we Wrocławiu (Drzeniecka i in., 2003). Uczestnictwo w programie badań klimatu miasta, realizowanego pod kierownictwem prof. M. Dubickiej od roku 1997, pozwoliło na ukierunkowanie moich zainteresowań naukowych i zgromadzenie odpowiedniego materiału badawczego. Zaowocowało to w latach 2000–2003 szeregiem publikacji, podejmujących głównie problematykę zjawiska miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu, jej struktury czasowo-przestrzennej oraz meteorologicznych i urbanistycznych uwarunkowań. Etap ten został zakończony przygotowaniem w 2003 r., pod opieką prof. M. Dubickiej, rozprawy doktorskiej pt. „Meteorologiczne i urbanistyczne uwarunkowania miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu”, a następnie jej publikacji w formie monografii (Szymanowski, 2004).

Moje główne zainteresowania naukowe koncentrują się wokół trzech podstawowych wątków badawczych:

1. Klimatu obszarów zurbanizowanych
2. Modelowania empirycznego elementów środowiska geograficznego, a zwłaszcza elementów klimatu
3. Modelowania fizycznych procesów atmosferycznych i elementów klimatu

Ad. 1. Badania klimatu obszarów zurbanizowanych bez wątpienia stanowią jeden z głównych obszarów moich zainteresowań naukowych. Ich wyniki zostały zaprezentowane w około 30 pracach, wliczając w to, oprócz czasopism naukowych, monografii i rozdziałów w monografiach, materiały konferencyjne i publikacje popularnonaukowe. Recenzowanych prac z tego zakresu opublikowano łącznie 18, w tym 5 w czasopismach tzw. listy filadelfijskiej. Prace podejmują kilka zasadniczych wątków, w tym dotyczących metodyki modelowania pola temperatury w mieście (prace w większości włączone do cyklu stanowiącego osiągnięcie naukowe z p.4 autoreferatu), zagadnienia miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu oraz Krakowie (Bokwa i in., 2008), czy też wilgotności powietrza we Wrocławiu (Dubicka i in., 2003).

Z okresu po obronie pracy doktorskiej, oprócz prac metodycznych podejmujących zagadnienie przestrzennej interpolacji, na podkreślenie zasługują wyniki opublikowane w trzech pracach dotyczących bezpośrednio cech klimatu obszarów zurbanizowanych. W artykule z 2005 r. (Szymanowski, 2005) podjąłem dyskusję na temat definicji zjawiska miejskiej wyspy ciepła oraz zasad jej wyznaczania z serii danych pomiarowych pochodzących z wielu stacji meteorologicznych, zarówno miejskich, jak i zlokalizowanych poza miastem. Przyczynkiem do podjęcia takiej dyskusji stało się zidentyfikowanie i omówienie, wraz z ich pogodowymi i synoptycznymi uwarunkowaniami,

krótkotrwałych epizodów dużych różnic temperatury w obszarze miasta, związanych głównie z przemieszczającymi się strefami frontów atmosferycznych. Adwekcje mas powietrza, z reguły chłodnych, prowadząc do modyfikacji zastanego układu termicznego w mieście, w automatycznych procedurach selekcji przypadków i analiz statystycznych, mogą być interpretowane jako epizody wyspy ciepła mimo, że nie mają typowej, radiacyjnej genezy i z reguły nie prowadzą do wykształcenia się charakterystycznej, koncentrycznej struktury przestrzennej pola temperatury. Ponieważ różnice temperatury w takich przypadkach sięgają maksymalnych intensywności wyspy ciepła o genezie radiacyjnej, podkreślono konieczność uważnej, zorientowanej na genezę, selekcji przypadków UHI, zwłaszcza do podsumowujących analiz statystycznych.

Uzyskany w 2010 r. dostęp do bazy 3D zabudowy Wrocławia pozwolił na opracowanie warstw parametrów aerodynamicznych (współczynnik szorstkości, przesunięcie płaszczyzny zerowej) w środowisku GIS z uwzględnieniem kierunku wiatru i powierzchni frontalnych budynków. Wyniki tego modelowania z jednej strony posłużyły jako jedna z podstawowych zmiennych determinujących UHI, a z drugiej strony pozwoliły na wyznaczenie potencjalnych korytarzy przewietrzania miasta. W tym celu, wspólnie z mgr A. Suderem, w którego przewodzie doktorskim jestem promotorem pomocniczym, opracowaliśmy nowatorską, analityczną metodę wyznaczania najbardziej prawdopodobnego przebiegu korytarzy na podstawie warstw parametrów aerodynamicznych i z uwzględnieniem kryteriów zdefiniowanych w studiach urbanistycznych. Wyniki prac opublikowano w czasopiśmie *Pure and Applied Geophysics* (Suder, Szymanowski, 2013).

W ostatnich dwóch latach kontynuowano, we współpracy z pracownikami Uniwersytetu Jagiellońskiego i IMGW, prace dotyczące klimatu Krakowa. Przeprowadzono kompleksową analizę pola temperatury powierzchni miasta w oparciu o zobrazowania satelitarne Landsat ETM+ (Walawender i in., 2013). Na podstawie wybranych scen satelitarnych, obejmujących różne fazy cyklu wegetacyjnego, przeprowadzono obliczenia wielkości temperatury powierzchni z uwzględnieniem korekty atmosferycznej i zdolności emisyjnej podłoża. Porównywalność wyników z różnych pór roku zapewniono poprzez zastosowanie nowatorskiej metody standaryzacji, uwzględniającej obszarowo liczone odchylenie standardowe i średnią ze wszystkich komórek rastrowych obszaru badań. Otrzymane wartości odniesiono do klas pokrycia terenu, a następnie metodami analiz przestrzennych wyznaczono regiony miasta, które niezależnie od pory roku, są zawsze ponadprzeciętnie ciepłe lub chłodne.

Współpraca w ramach tego zespołu autorskiego jest w dalszym ciągu kontynuowana. Do druku przygotowywana jest publikacja podejmująca problematykę kształtowania się miejskiej wyspy ciepła w Krakowie ze szczególnym akcentem na rolę rzeźby terenu w tym procesie. Opracowano w tym celu metodykę opartą o analizę skupień (k -średnich i Warda), umożliwiającą typologizację według przebiegu temperatury na wszystkich stacjach dla każdej analizowanej nocy (typ nocy) i podobieństwa tego przebiegu pomiędzy stacjami (typ przebiegu). Analiza prowadzona jest z uwzględnieniem panujących warunków pogodowych (zachmurzenie, wiatr) i stanu miejskiej warstwy granicznej (dane sodarowe).

W moim przekonaniu większość przedstawionych prac z zakresu klimatu miasta, których byłem autorem bądź współautorem, oprócz aspektu poznawczego, ma także znaczący potencjał aplikacyjny.

Osiągnięte wyniki, zwłaszcza dotyczące struktury przestrzennej pola temperatury powietrza i powierzchni, czy też właściwości aerodynamicznych i korytarzy przewietrzania, mogą służyć do modelowania różnorodnych procesów środowiska miejskiego, np. dyspersji zanieczyszczeń i warunków bioklimatycznych, a w konsekwencji mogą stanowić ważną informację w podejmowaniu decyzji urbanistycznych i planowaniu przestrzennym miasta.

Ad. 2. Drugim obszarem badawczym, znajdującym wyraz w znacznej części prac mojego dorobku naukowego jest problematyka **modelowania empirycznego elementów środowiska geograficznego, a zwłaszcza elementów klimatu**. Tworzenie modeli i generowanie ciągłej informacji za pomocą metod przestrzennej interpolacji jest także wiodącym wątkiem przedstawionego cyklu publikacji stanowiących podstawę ubiegania się o stopień doktora habilitowanego. Z zakresu modelowania temperatury powietrza do cyklu nie zostały włączone wcześniejsze prace dotyczące interpolacji temperatur ekstremalnych w południowo-zachodniej Polsce, które powstały głównie we współpracy z dr hab. M. Kryzą (Kryza, Szymanowski, 2006; Kryza i in., 2007). Doświadczenia metodyczne zdobyte w tym czasie w znaczącym stopniu przyczyniły się do rozwinięcia metodyki modelowania pola temperatury, co znalazło swój wyraz w trakcie realizacji grantu MNiSW nr N N306 155038 pt. *Modelowanie pola temperatury powietrza w Polsce w wybranych skalach przestrzennych i czasowych*, którym kierowałem, i w konsekwencji – w pracach cyklu.

Jednakże podejmowane przeze mnie zagadnienia interpolacji przestrzennej nie dotyczyły wyłącznie temperatury powietrza. W pierwszych pracach z tego zakresu wykonano geostatystyczne modelowanie pola opadów w Masywie Śnieżnika w trakcie epizodu opadowego, który doprowadził do powodzi w lipcu 1997 roku (Piasecki i in. 1997, 1998). Do modelowania przestrzennego sum opadu powróciłem w ostatnim czasie w trakcie realizacji dwóch projektów badawczych. W obydwu przypadkach posłużyłem się już metodyką selekcji interpolatora opisaną w pracach cyklu dla temperatury powietrza, a przez to częściowo potwierdziłem aplikowalność i uniwersalność systemu podejmowania decyzji. W ramach projektu KLAPS przeprowadziłem modelowanie sum rocznych opadu dla domeny projektu (pogranicze polsko-saksońskie) w wybranych latach, z których otrzymane rozkłady stanowiły niezbędny element modelowania depozycji zanieczyszczeń za pomocą modelu FRAME. W projekcie kierowanym przez dr A. Latochę (N N306 384539) wykonałem modelowanie opadów i temperatury powietrza dla ziemi kłodzkiej na przełomie XIX i XX w. Wyniki tych prac przygotowywane są do publikacji. W roku 2005 opublikowano także model rozkładu współczynnika erozyjności opadu w Polsce, który był pierwszą próbą wielowymiarowej interpolacji tego wskaźnika (Licznar, Szymanowski, 2005).

W okresie po uzyskaniu stopnia doktora byłem współautorem szeregu prac dotyczących modelowania przestrzennego różnych elementów i wskaźników środowiskowych. Do najważniejszych należy zaliczyć prace dotyczące grubości pokrywy lodowej i hipsometrii podłoża w Jaskini Demianowskiej na Słowacji (Strug i in., 2006), numerycznych modeli wysokości terenu (Wieczorek i in., 2010), stężenia NO_x w Polsce (Kryza i in., 2011). Na podkreślenie zasługują także prace dotyczące modelowania rozkładu wybranych wskaźników agroklimatologicznych, jak SAT (*sum of active temperatures*) i GDD (*growing degree-days*), które wykonano dla potrzeb oceny możliwości

uprawy winorośli w Polsce (Szymanowski i in., 2007; Białobrzaska i in., 2010). Prace te są obecnie kontynuowane w ramach projektu KLAPS dla pogranicza polsko-saksońskiego. Wskaźniki SAT i GDD stanowią w projekcie ważne indykatory obrazujące zmiany klimatu, a jednocześnie wskazują na alternatywne możliwości adaptacyjne w rolnictwie. W ramach tych prac przygotowana została także nowatorska metodyka kwantyfikacji trendów i ich istotności statystycznej w sieci *grid* o wysokiej rozdzielczości przestrzennej. Procedura wykorzystuje funkcje lokalne rastrowej analizy przestrzennej w oparciu o przygotowane wcześniej mapy wskaźnika dla każdego roku analizowanego wielolecia. Wyniki tych prac są obecnie przygotowywane do publikacji. W ostatnim czasie zakończono także studium metodyczne wykonania map wskaźnika kontynentalizmu Ewerta dla Polski, prowadzone wspólnie z dr hab. M. Kryzą i mgr P. Bednarczykiem z UMCS w Lublinie – wyniki znajdują się w końcowej fazie przygotowania do publikacji.

Opracowane i opublikowane modele przestrzenne i mapy wielu elementów klimatu znajdują także zastosowania w innych dyscyplinach naukowych i praktyce. Interesującym polem badawczym jest tu wspomniane wyznaczanie potencjalnych obszarów uprawy winorośli w kontekście obserwowanych zmian klimatu (Szymanowski i in., 2007, Białobrzaska i in., 2010, 2011). Pokrewna tematyka z zakresu uprawy winorośli w małych brytyjskich winnicach została podjęta we współpracy z dr D. Greenem z University of Aberdeen. Na jej potrzeby opracowałem procedurę analityczną, obejmującą kompleksową analizę środowiskową, bazującą na danych glebowych oraz pierwotnych i wtórnych atrybutach terenu z wykorzystaniem analizy skupień i krigingu wskaźnikowego (Green, Szymanowski, 2012ab).

Prace, które prowadziłem nad zmianami pola temperatury w Polsce znalazły także zastosowanie w botanice, w analizie zmian siedliskowych chronionego gatunku paproci wodnej, gałuszki kulecznicy (Szczęśniak i in., 2013). Obecnie biorę udział w pracach dotyczących rozmieszczenia porostów epifitycznych we Wrocławiu i ich związków z elementami środowiska miejskiego, a zwłaszcza z miejską wyspą ciepła. Prace te prowadzone są we współpracy z prof. E. Fudali i dr hab. L. Żołnierzem z Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu.

Rozwijana dla potrzeb interpolacji przestrzennej metoda regresji ważonej geograficznie znalazła także zastosowanie w budowie modelu rozmieszczenia sklepów w przestrzeni miejskiej Wrocławia (Illicki i in., 2011).

Ad. 3. Trzecim z głównych obszarów moich zainteresowań naukowych jest **fizyczne modelowanie elementów klimatu i procesów klimatycznych**. Należy tu zaliczyć zwłaszcza prace podejmujące modelowanie dopływu promieniowania słonecznego za pomocą narzędzia *r.sun*, zaimplementowanego w GIS GRASS, oraz modelowanie różnych elementów klimatu i procesów atmosferycznych za pomocą mezoskalowego modelu WRF (*Weather Research and Forecasting*). Prace te realizowane są głównie we współpracy z dr hab. M. Kryzą. Estymacja rozkładu potencjalnego promieniowania słonecznego dla Wrocławia, wykonana dla potrzeb analizy miejskiej wyspy ciepła, wykorzystywała nowatorską metodykę bazującą na obliczeniach orientacji, wysokości i zasłonień ścian budynków do szacowania sum energii dopływającej do miasta (prace cyklu: A5 i A7). W pracach dotyczących promieniowania słonecznego na Spitsbergenie (rejon fjordu Hornsund) podjęto

problematykę parametryzacji zachmurzenia dla modelowania promieniowania rzeczywistego. Prace miały charakter pionierski, a przeprowadzone testy wykazały wysoką zgodność wartości modelowanych z pomiarami (Kryza i in., 2010, 2011). Uzyskane wyniki pozwoliły także na podjęcie modelowania przestrzennej ablacji na lodowcu Werenskjolda według formuły Chodakowa (Migała i in., 2012).

Jeśli chodzi o modelowanie przy użyciu WRF, to mój udział w tych pracach dotyczy głównie weryfikacji wyników uzyskanych przy różnorodnych parametryzacjach modelu (artykuł złożony do *Atmospheric Research*, w recenzji), jak i porównania wyników modelowania fizycznego (WRF) i empirycznego (interpolacja przestrzenna). W tym ostatnim przypadku obliczenia dla temperatury powietrza w Polsce zostały już przeprowadzone – materiał zostanie wkrótce zaprezentowany na konferencji naukowej i przygotowany do publikacji. Modelowanie z wykorzystaniem WRF jest także istotnym elementem w trzech obecnie realizowanych projektach, których jestem wykonawcą: BLOWRF, podejmującym problematykę modelowania warunków bioklimatycznych w Polsce, HydroProg zajmującym się kombinowanymi prognozami hydrologicznymi oraz rozpoczynającym się projekcie APIS, w którym WRF będzie wykorzystywany wieloaspektowo, głównie w modelowaniu stężenia zanieczyszczeń i warunków biometeorologicznych.

Do najważniejszych osiągnięć naukowych z opisanych powyżej obszarów badawczych zaliczam:

1. Opracowanie typologii struktury termicznej doliny górskiej na przykładzie doliny Kleśnicy w Masywie Śnieżnika wraz z opisaniem scenariuszy zmian termiki podczas tzw. cyklu fenowego.
2. Kwantyfikację meteorologicznych i urbanistycznych uwarunkowań miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu wraz z identyfikacją silnych, krótkotrwałych modyfikacji pola temperatury o genezie adwekcyjnej.
3. Opracowanie metodyki analitycznego wyznaczania potencjalnych korytarzy przewietrzania miasta na przykładzie Wrocławia.
4. Opracowanie metodyki wyznaczania regionów termicznych obszaru zurbanizowanego w oparciu o termalne dane satelitarne i jej aplikacja dla Krakowa.
5. Wykonanie dla różnych obszarów badań interpolacji przestrzennej szeregu elementów klimatu i środowiska, w tym: temperatur ekstremalnych powietrza i termicznych wskaźników agrometeorologicznych, opadów atmosferycznych i wskaźnika erozyjności opadu, stężenia NO_x i innych. Aplikacje wyników tych analiz przestrzennych w innych dyscyplinach badawczych i praktycznych, np. w botanice w celu badania zmian zasięgu siedlisk gałuszki kulecznicy, czy w rolnictwie dla wyznaczania obszarów uprawy winorośli w skali regionalnej i mikroskali.
6. Modelowanie dopływu promieniowania słonecznego do rzeczywistej powierzchni terenu o urozmaiconej rzeźbie (Spitsbergen) oraz skomplikowanej geometrii zabudowy (Wrocław). W pierwszym przypadku model rozszerzono do warunków rzeczywistych (z parametryzacją zachmurzenia), co pozwoliło na wykonanie modelowania ablacji na lodowcu Werenskjolda.

Spis literatury

- Białobrzaska M., Kryza M., Szymanowski M., 2010, *Thermal suitability of Poland for wine-growing in extreme years in comparison to other Central European countries*, Acta Agrophysica 2010(6), 34–44.
- Białobrzaska M., Szymanowski M., Kryza M., 2011, *Delineation of potential viticulture areas in south-western Poland*, Proceedings 17th International Symposium GiESCO, Asti-Alba (CN), Italy, 29 August – 2 September 2011, 83–86.
- Bokwa A., Sikora S., Szymanowski M., 2008, *Topoclimatic diversity of air temperature in Cracow* [w:] Kłysik K., Wibig J., Fortuniak K. (red.) *Klimat i bioklimat miast*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 35–44.
- Drzeniecka A., Dubicka M., Netzel P., Pyka J.L., Rosiński D., Sikora S., Szymanowski M., 2003, *System of the meteorological measurements in the city of Wrocław climate researches* [w:] Pyka J.L., Dubicka M., Szczepankiewicz-Szmyrka A., Sobik M., Błaś M. (red.) *Man and climate in the 20th century*, Studia Geograficzne, 75, 599–608.
- Dubicka M., Rosiński D., Szymanowski M., 2003, *The influence of the urban environment on the air humidity in Wrocław* [w:] Pyka J.L., Dubicka M., Szczepankiewicz-Szmyrka A., Sobik M., Błaś M. (red.) *Man and climate in the 20th century*, Studia Geograficzne, 75, 504–527.
- Green D.R., Szymanowski M., 2012, *Grape expectations: 'terroir' explained – collecting, characterising and analysing spatio-temporal data in a small vineyard*, GIS Professional, 48, 16–19.
- Green D.R., Szymanowski M., 2012, *Monitoring, mapping and modelling the vine and vineyard: collecting, characterising and analysing spatio-temporal data in a small vineyard*, Proceedings of IXth International Terroir Congress, 25 – 29 June 2012, Dijon-Reims, France, vol.2, (8) 35–38.
- Illicki D., Janc K., Kryza M., Szymanowski M., 2011, *Cechy rozmieszczenia sklepów w przestrzeni wielkomiejskiej na przykładzie Wrocławia – zastosowanie regresji ważonej geograficznie*, Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Oeconomica 253, 253–268.
- Kryza M., Szymanowski M., 2006, *Ocena wybranych metod interpolacji minimalnej temperatury powietrza*, Annales UMCS, Sec. B: Geographia, Geologia, Mineralogia et Petrographia, 61, 227–235.
- Kryza M., Szymanowski M., Dore A.J., Werner M., 2011, *Application of a land-use regression model for calculation of spatial pattern of annual NO_x air concentrations at national scale: a case study for Poland*, Procedia Environmental Sciences, 7, 98–103.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., 2011, *Zastosowanie modelu r.sun do określania dobowych sum promieniowania rzeczywistego na lodowcu Werenskjolda (SW Spitsbergen)*, Prace i Studia Geograficzne 47, 435–442.
- Kryza M., Szymanowski M., Migala K., Pietras M., 2010, *Spatial information on total solar radiation: Application and evaluation of the r.sun model for the Wedel Jarsberg Land, Svalbard*, Polish Polar Research, 31, 17–32, DOI: 10.4202/ppres.2010.02.
- Kryza M., Szymanowski M., Wieczorek M., 2007, *Wybrane metody interpolacji w modelowaniu map ekstremalnej temperatury powietrza (na przykładzie południowo-zachodniej Polski)*, Przegląd Geofizyczny, 52(1), 61–82.
- Licznar P., Szymanowski M., 2005, *Preliminary results of rainfall erosivity mapping for Poland* [w:] Hřebíček J., Ráček J. (red.) *Enviroinfo Brno 2005. Informatics for Environmental Protection. Networking Environmental Information*, 2, Proceedings of the 19th International Conference "Informatics for Environmental Protection", 7-9 September 2005, Brno, Czech Republic, 633–640.
- Migala K., Kryza M., Szymanowski M., Puczek D., 2012, *Spatial model of ablation: Khodakov formula combined with temperature lapse rate and GIS based model of total radiation: a case study from Spitsbergen*, Klimatologija i Glaciologija Sibiri: meždunarodnaja naučno-praktičeskaja konferencija, 16-20 Oktjabrja 2012 r., Tomsk, Nacionalnyj Issledowatel'skij Tomskij Gosudarstvennyj Universitet, 14–16.
- Migala K., Szymanowski M., 1999, *AWS measurement in the extremal climate conditions of the high Sudetes, Poland*, Proceedings of the 2nd International Conference on Experiences with Automatic Weather Stations, 27-29 September 1999 Vienna, Austria.

Piasecki J., Szymanowski M., 1995, *Warunki termiczne w górnym odcinku doliny Kleśnicy w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego*, Acta Universitatis Wratislaviensis, Prace Instytutu Geograficznego Ser. C Meteorologia i Klimatologia II, 89–105.

Piasecki J., Szymanowski M., Řehak J., 1997, *Opady atmosferyczne w lipcu 1997 roku w Masywie Śnieżnika Kłodzkiego. Inicjacja powodzi w regionie*, Materiały Forum Naukowo – Technicznego „Powódź 1997”, Ustroń k. Wisły, 10-12 września 1997, t. 2, IMGW, Warszawa, 171–179.

Piasecki J., Szymanowski M., Řehak J., 1998, *Precipitations in the Śnieżnik Kłodzki Massif in July 1997 – the beginning of the flood*, Proceedings of the 2nd European Conference on Applied Climatology: ECAC 98 ; 19–23 October 1998, Vienna, Austria.

Strug K., Piasecki J., Szymanowski M., Sawiński T., Zelinka J., 2006, *Quantitative characteristics of the bottom ice in the Demänovská Ice Cave (Slovakia)* [w:] Bella, P. (red.) *Výskum, využívanie a ochrana jaskýň, zborník referátov*, 5. vedecká konferencia, Demänovská Dolina 26. – 29. 09. 2005, Liptovský Mikuláš, 167–174.

Suder A., Szymanowski M., 2013 (online first), *Determination of ventilation channels in urban area: a case study of Wrocław (Poland)*, Pure and Applied Geophysics, ss. 11, DOI: 10.1007/s00024-013-0659-9.

Szczęśniak E., Rosadziński S., Spalek K., Szymanowski M., Kreitschitz A., Kruk J., Śliwiński M., Kamiński R., 2013, *Current distribution of *Pilularia globulifera* L. in Poland – changes of geographical range and habitat preferences*, Acta Societatis Botanicorum Poloniae, 82, 37–46, DOI: 10.5586/asbp.2012.021.

Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*, Studia Geograficzne, 77, Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego, ss. 229.

Szymanowski M., 2005, *Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland*, Theoretical and Applied Climatology, 82, 207–224.

Szymanowski M., Kryza M., Smaza M., 2007, *A GIS approach to spatialize selected climatological parameters for wine-growing in Lower Silesia, Poland*, “Bioclimatology and natural hazards” International Scientific Conference: Proceedings, Zvolen-Polana 17-20 September 2007, CD-ROM.

Walawender J.P., Szymanowski M., Bokwa A., Hajto M.J., 2013 (online first), *Land surface temperature patterns in the urban agglomeration of Kraków (Poland) derived from LANDSAT-7/ETM+ data*, Pure and Applied Geophysics, ss. 28, DOI 10.1007/s00024-013-0685-7.

Wieczorek M., Szymanowski M., Lupa P., 2010, *Modelowanie wysokości terenu technikami interpolacji przestrzennej* [w:] Żyszkowska W., Spallek W. (red.) *Główne problemy współczesnej kartografii 2010. Numeryczne modele terenu w kartografii*, Uniwersytet Wrocławski, Wrocław, s. 97–109.