

**Mariusz Szymanowski*,
Maciej Kryza****

Uniwersytet Wrocławski,
Wydział Nauk o Ziemi i Kształtowania Środowiska,
50–137 Wrocław, pl. Uniwersytecki 1

**ZASTOSOWANIE REGRESJI WAŻONEJ GEOGRAFICZNIE
DO INTERPOLACJI PRZESTRZENNEJ MIEJSKIEJ
WYSPY CIEPŁA WE WROCŁAWIU**

**Application of the geographically weighted regression
for spatial interpolation of the urban heat island
in Wrocław (SW Poland)**

Summary. Geographically weighted regression (GWR), was used here for spatial interpolation of two selected cases of the urban heat island measured in Wrocław (SW Poland). The GWR algorithm was extended with spatial interpolation of the local regression residuals (GWRK). It was shown that the GWRK outperforms GWR, as well as other widely used interpolation procedures, including multiple regression models and residual kriging.

Słowa kluczowe: regresja ważona geograficznie, interpolacja, miejska wyspa ciepła
Key words: geographically weighted regression, interpolation, urban heat island

WSTĘP

Miejska wyspa ciepła (UHI), wyrażająca się wzrostem temperatury powietrza postępującym w kierunku centralnych części miasta, powstaje w wyniku oddziaływania czynników fizycznych związanych z przekształcaniem środowiska naturalnego w procesach urbanizacyjnych, głównie poprzez zmiany właściwości radiacyjnych, termicznych i aerodynamicznych przestrzeni miejskiej

* Zakład Kartografii, e-mail: mariusz.szymanowski@uni.wroc.pl

** Zakład Klimatologii i Ochrony Atmosfery, e-mail: maciej.kryza@uni.wroc.pl

(Oke 1987). Występowanie UHI jest szczególnie wyraźne w warunkach bezchmurnego nieba i przy małych prędkościach wiatru, a informacje o jej natężeniu i strukturze przestrzennej są istotnym elementem procedur planistycznych i stanowią informację wejściową np. przy modelowaniu dyspersji zanieczyszczeń atmosferycznych i zarządzaniu jakością powietrza.

Jedną z głównych metod stosowanych w meteorologii i klimatologii w celu określenia przestrzennej zmienności stanu atmosfery, w tym temperatury powietrza, jest interpolacja danych pomiarowych gromadzonych w punktach pomiarowych (Tveito i in. 2008). Ze względu na silny związek interpolowanych elementów meteorologicznych np. z wysokością czy klasą użytkowania terenu, szczególnie istotne w uprzestrzennianiu temperatury powietrza, także w warunkach UHI, mają algorytmy wielowymiarowe (AW). Pozwalają one na zastosowanie w procesie interpolacji dodatkowych zmiennych objaśniających, aproksymujących rzeczywiste procesy fizyczne kształtujące interpolowane zjawisko. Wcześniejsze prace wykazały, że AW pozwalają na uzyskanie bardziej rzeczywistych obrazów przestrzennej zmienności UHI w porównaniu do powszechnie stosowanych metod jednowymiarowych (Szymanowski 2004, Vicente-Serrano i in. 2005, Szymanowski, Kryza 2009). Dotyczy to szczególnie metod opartych na regresji wieloczynnikowej (MLR), wraz z jej rozszerzeniem o kriging reszt (tzw. kriging resztowy, RK). Zarówno w przypadku MLR, jak i RK, wątpliwości metodyczne w przypadku takich zjawisk, jak UHI budzi przyjęcie założenia stacjonarności procesu przestrzennego. Uzasadnione wydaje się być stosowanie w takim przypadku metod opartych na lokalnych modelach regresji, tzw. regresji ważonej geograficznie (GWR).

Celem pracy jest uzyskanie przestrzennego rozkładu temperatury powietrza w wybranych przypadkach UHI we Wrocławiu, z zastosowaniem regresji ważonej geograficznie (GWR) wraz z jej rozszerzeniem o kriging reszt (GWRK), oraz weryfikacja wyników na podstawie oceny krzyżowej, pozwalającej na ilościowe wykazanie poprawy (lub jej braku) wyniku interpolacji względem wcześniej stosowanych metod (MLR i RK).

OBSZAR BADAŃ

Wrocław (powierzchnia 293 km², liczba ludności około 640 tys.) jest położony w SW Polsce na wysokości około 120 m n.p.m. Zabudowa miasta jest rozmieszczona wzdłuż głównej rzeki – Odry. 31,4% powierzchni miasta zajmują tereny zabudowy mieszkaniowej i przemysłowej. Na pozostałą część składają się miejskie tereny zieleni (36,6%), rolnicze z nieużytkami (28,9%) oraz wody powierzchniowe (3,1%). Mało zróżnicowana rzeźba terenu i czytelną strukturą urbanistyczną czynią z Wrocławia cenny obszar badań i we-

ryfikacji modeli względnie niezaburzonego klimatu miasta. Zjawisko UHI ma tu charakter typowy, co do intensywności i struktury przestrzennej, dla kilkuset tysięcy miast umiarkowanych szerokości geograficznych (Szymanowski 2004, 2005).

DANE I METODY

Pomiary meteorologiczne wykonano z zastosowaniem dwóch mobilnych stacji meteorologicznych, mierzących temperaturę powietrza na standardowej wysokości 2 m n.p.g. w wyznaczonych 206 punktach referencyjnych. Sesje pomiarowe prowadzono w godzinach nocnych, podczas największej intensywności UHI. Zmiana temperatury w trakcie trwania sesji została skorygowana na podstawie rejestracji z 4 automatycznych stacji meteorologicznych, które rozmieszczono, uwzględniając wpływ zróżnicowanego pokrycia terenu na przebieg temperatury. Do analizy wybrano dwa przypadki UHI, stwierdzone podczas pogody radiacyjnej (bezczmurne lub słabo zachmurzone niebo, prędkość wiatru poza miastem nieprzekraczająca 4 ms^{-1}) w dniach 22 maja 2001 i 3 stycznia 2002. W pierwszym przypadku największa różnica temperatury między punktami pomiarowymi wynosiła $8,3^\circ\text{C}$, w drugim $9,0^\circ\text{C}$.

Zmienne niezależne (objaśniające, predyktory), zastosowane w pracy do interpolacji, zostały podzielone na 4 zasadnicze grupy:

1. Pochodne informacji o użytkowaniu terenu: szorstkość (obliczona z zastosowaniem formuły Lettau), udział powierzchni sztucznych i seminaturalnych w danym gridzie, admitancja termiczna.
2. Pochodne zobrażeń satelitarnych Landsat ETM+: albedo, indeksy wegetacji NDVI, NDMI i SAVI, emisyjność oraz temperatura powierzchni.
3. Pochodne bazy urbanistycznej 3D: szorstkość (wg formuły Bottemy), porowatość, wskaźnik zasłonięcia horyzontu (*sky-view factor*), dobowe sumy promieniowania słonecznego (obliczone modelem r.sun).
4. Emisja ciepła sztucznego, obliczona na podstawie inwentaryzacji zużycia energii.

Istotnie statystycznie zmienne zostały wybrane metodą regresji krokowej. Uzyskane modele regresji weryfikowano pod kątem nadmiarowości predyktorów oraz fizycznej interpretowalności uzyskanych równań.

Wybrane dwa przypadki UHI zostały poddane interpolacji przestrzennej z zastosowaniem metody regresji ważonej geograficznie (GWR) oraz jej rozszerzenia (GWRK) polegającego na uwzględnieniu reszt regresji, powstających przy interpolacji GWR. GWRK jest podejściem nowym, wcześniej nie stosowanym w opracowaniach klimatologicznych, a nawiązującym do idei znanej z modeli globalnych (tzw. kriging resztowy; Ustrnul, Czekierda 2003).

Regresja ważona geograficznie jest wyrażona jako:

$$y_i = \beta_0(u_i, v_i) + \sum_k \beta_k(u_i, v_i) x_{ik} + \varepsilon_i \quad (1)$$

gdzie: (u_i, v_i) to współrzędne i -tego punktu, $\beta_k(u_i, v_i)$ jest realizacją funkcji $\beta_k(u, v)$ w punkcie i .

Współczynniki regresji (β) nie są stałe, jak w przypadku globalnych modeli regresji, lecz zmienne w przestrzeni (dopasowane lokalnie). Istotą GWR jest konstrukcja lokalnych modeli regresji opartych na macierzy sąsiedztwa (ang. *spatial kernel*) z zastosowaniem funkcji wagowej (ang. *kernel function*). Macierz sąsiedztwa zawiera punkty pomiarowe, na podstawie których w danym miejscu przestrzeni geograficznej został zdefiniowany lokalny model regresji. Wagi zmniejszają się wraz z odległością punktu danych od punktu regresji, a zależność ta może być przybliżona różnymi funkcjami, z których przyjęto rekomendowaną w literaturze funkcję gaussowską (Fotheringham i in. 2002). Nierównomierne rozmieszczenie punktów pomiarowych w analizowanych przypadkach zdecydowało o wyborze zmiennej macierzy sąsiedztwa (Szymanowski, Kryza 2010). Wielkość optymalnej macierzy sąsiedztwa określono, porównując miary statystyczne dla modeli GWR opartych na tych samych zmiennych objaśniających: odchylenia standardowego reszt regresji (σ) i skorygowanego kryterium informacyjnego Akaike (AICc) oraz analizując estymowane parametry regresji (β) zgodnie z przyjętym założeniem fizycznej interpretowalności.

Rozszerzenie regresji ważonej geograficznie o kriging reszt (GWRK) polega na przestrzennej interpolacji reszt regresji, uzyskanych lokalnym modelem GWR, i dodaniu ich do finalnej mapy pola temperatury GWR. Pozwala to na uwzględnienie części stochastycznej interpolowanego zjawiska, nie wyjaśnionej zastosowanym zbiorem zmiennych niezależnych. Przestrzenną interpolację reszt regresji wykonano stosując kriging zwykły.

Wyniki GWR i GWRK zostały ocenione ilościowo z zastosowaniem procedury oceny krzyżowej (ang. *cross-validation*) oraz porównane z uzyskanymi metodą regresji wieloczynnikowej (MLR) i jej rozszerzenia o kriging reszt regresji (RK). Szczegółowy opis metodyki MLR i RK zawiera praca Szymanowskiego i Kryzy (2009). Do budowy modeli globalnych MLR i RK zastosowane zostały te same zmienne objaśniające, co dla GWR i GWRK. Wszystkie algorytmy interpolacyjne, wraz z procedurą oceny krzyżowej, zostały zrealizowane z zastosowaniem programu GIS GRASS oraz pakietu statystycznego R.

WYNIKI

W przypadku UHI z dnia 22 maja 2001 wybrano 5 istotnych statystycznie predyktorów: emisję ciepła antropogenicznego, wskaźnik porowatości, SAVI,

dobową sumę promieniowania, obliczoną przez model r.sun, oraz szorstkość, obliczoną wg metody Bottemy. W przypadku 03 stycznia 2002 stwierdzono istotność statystyczną w odniesieniu do trzech zmiennych objaśniających: emisji ciepła antropogenicznego, albedo oraz temperatury powierzchni, określonej na podstawie zdjęcia Landsat. Zgodnie z przyjętymi założeniami kierunki zależności, wyrażone znakiem współczynników β , były interpretowalne fizycznie, co pozwoliło m.in. na ekstrapolację znalezionych zależności.

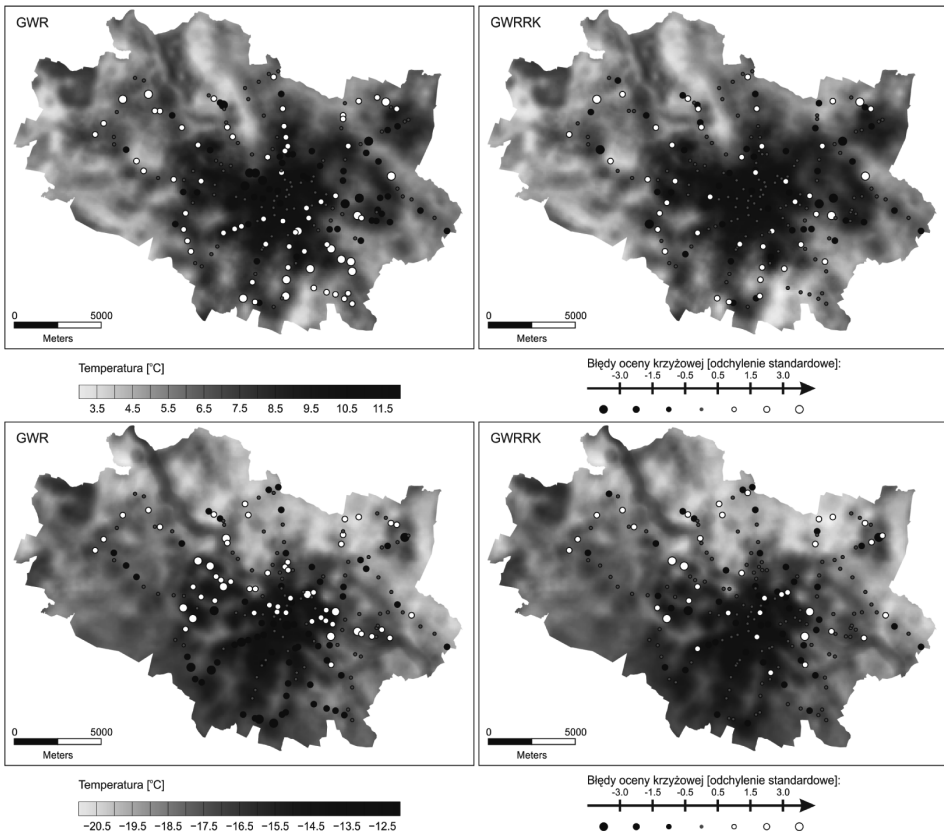
Żaden z porównywanych algorytmów nie wykazuje tendencji do przeszacowania lub niedoszacowania interpolowanego zjawiska, o czym świadczy wielkość BIAS bliska zero (tab. 1). W obu przypadkach GWRK ma najniższą średnią wielkość błędu, wyrażona przez MAE i RMSE. W przypadku 03 stycznia 2002 r. wyniki interpolacji GWR wykazują wyraźną regionalną tendencję do przeszacowania (w części N miasta) bądź niedoszacowania (w części S) pola temperatury.

Tabela 1. Wyniki oceny krzyżowej dla globalnych i lokalnych modeli regresji z i bez interpolowanymi resztami regresji (BIAS – średnia z różnic między estymacją a obserwacją, MAE – średni błąd absolutny, RMSE – pierwiastek średniego błędu kwadratowego)

Table 1. Cross-validation results for global and local regression models with and without regression residuals

Przypadek	Metoda	BIAS	MAE	RMSE	Min	Max
22 maja 2001 r.	GWR	0,08	0,68	0,86	-2,60	2,20
	GWRK	0,00	0,51	0,66	-1,78	1,72
	MLR	0,00	0,75	0,95	-3,10	2,55
	RK	0,00	0,52	0,66	-1,65	1,76
3 stycznia 2002 r.	GWR	0,00	0,56	0,70	-1,48	2,19
	GWRK	0,00	0,42	0,55	-1,91	1,91
	MLR	0,00	0,63	0,78	-1,64	2,27
	RK	0,00	0,44	0,58	-1,72	1,91

Przestrzenny rozkład temperatury powietrza, modelowany z zastosowaniem GWR i GWRK przedstawiono na ryc. 1. Charakterystyczna dla GWRK, zarówno w przypadku z maja jak i stycznia, jest niższa temperatura na obrzeżach miasta. W obu przypadkach UHI wykazano, z zastosowaniem testu t-studenta dla obserwacji zależnych, istotne statystycznie różnice między rozkładem przestrzennym modelowanym za pomocą GWR i GWRK na poziomie istotności $< 0,05$.



Ryc. 1. Przestrzenny rozkład temperatury powietrza 22.05.2001 (górny rząd) i 03.01.2002 (dolny).

Fig. 1. Spatial patterns of air temperature for two selected UHI cases (22.05.2001 – top row, 02.01.2002 – bottom)

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W pracy zastosowano metodę regresji ważonej geograficznie wraz z jej rozszerzeniem o kriging reszt modelu lokalnego do przestrzennego modelowania dwóch przypadków miejskiej wyspy ciepła we Wrocławiu. Wyniki zostały poddane ocenie krzyżowej, co pozwoliło na wyliczenie statystyk ilościowo charakteryzujących błęd interpolacji. Stwierdzono, że metoda regresji ważonej geograficznie, rozszerzona o kriging reszt (GWRK), daje mniejsze błędy interpolacji UHI niż GWR, MLR i RK. Wcześniejsze prace wykazały, że metody MLR i RK sprawdzają się lepiej niż proste interpolatory jednowymiarowe. Zaznaczyć należy, że GWRK nie był do tej pory stosowany w opracowaniach klimatologicznych, m.in. z tego względu, że jest algorytmem stosunkowo nowym

i nie zaimplementowanym bezpośrednio w systemach GIS oraz współpracujących z nimi pakietach statystycznych. W pracy algorytm został zrealizowany za pomocą specjalnie przygotowanych skryptów, korzystających z możliwości systemu GIS GRASS oraz pakietu statystycznego R.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2010–2012 jako projekt badawczy nr N N306 155038.

Literatura

- Fotheringham A.S., Brundson C., Charlton M., 2002, *Geographically weighted regression*. John Wiley & Sons.
- Oke T.R., 1987, *Boundary layer climates*. 2nd ed. Methuen, London.
- Tveito O.E., Wegehenkel M., van der Wel F., Dobesch H., 2008, *The use of geographic information systems in climatology and meteorology*. Final Report, COST Action 719. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Szymanowski M., 2004, *Miejska wyspa ciepła we Wrocławiu*. Studia Geogr., 77. Wyd. UWr., Wrocław.
- Szymanowski M., 2005, *Interactions between thermal advection in frontal zones and the urban heat island of Wrocław, Poland*. Theor. Appl. Climatol., 82, 207–224.
- Szymanowski M., Kryza M., 2009, *GIS-based techniques for urban heat island spatialization*. Climate Res., 38, 171–187.
- Szymanowski M., Kryza M., 2010, *Przestrzenna interpolacja temperatury powietrza we Wrocławiu z zastosowaniem lokalnych i globalnych modeli regresji*. [w:] *Klimat Polski na tle klimatu Europy*, Seria: Studia i Prace z Geografii i Geologii, 16, 189–203.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2003, *Zróźnicowanie przestrzenne warunków termicznych powietrza Polski z wykorzystaniem GIS*. IMGW, Warszawa.
- Vicente-Serrano S.M., Cuadrat-Prats J.M., Saz-Sánchez M.A., 2005, *Spatial patterns of the urban heat island in Zaragoza (Spain)*. Climate Res., 30, 61–69.