

## ROLA ZMIENNYCH OBJAŚNIAJĄCYCH W INTERPOLACJI PRZESTRZENNEJ WYBRANYCH ELEMENTÓW KLIMATU<sup>1</sup>

### THE ROLE OF EXPLANATORY VARIABLES IN SPATIAL INTERPOLATION OF SELECTED CLIMATE ELEMENTS

Ewa Łupikasza<sup>1</sup>, Zbigniew Ustrnul<sup>2</sup>, Danuta Czekierda<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Wydział Nauk o Ziemi, Uniwersytet Śląski

<sup>2</sup> Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński

<sup>3</sup> Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział w Krakowie

**Słowa kluczowe: analiza przestrzenna, klimatologia, GIS, metody interpolacji**  
Keywords: spatial analysis, climatology, GIS, interpolation methods

### Wprowadzenie i cel pracy

Jak wynika z większości współczesnych opracowań meteorologicznych i klimatologicznych, gdzie dokonuje się przestrzennej oceny poszczególnych elementów pogody, jednym z ważniejszych zagadnień jest ich dokładna wizualizacja i interpolacja (np. Chapman, Thornes, 2003; COST 719, 2006). Problem precyzyjnej interpolacji, a w zasadzie tzw. spacjalizacji (lub „przestrzenizacji”), o której już wspomniano w literaturze (Ustrnul, Czekierda, 2006; Dobesh, Dumolard, Dyras, 2007), polega nie tylko na wyborze najwłaściwszej metody, ale na uwzględnieniu dodatkowych zmiennych objaśniających. Ich uwzględnienie w wybranych metodach na ogół pozwala na osiągnięcie znacznie bardziej precyzyjnych wyników analizy przestrzennej. Wiadomo przecież, że rozkład poszczególnych elementów meteorologicznych w dużym stopniu zależy od warunków lokalnych, które można w określony sposób sparametryzować i uwzględnić w modelu spacjalizacji. Zachodzi tylko pytanie, które zmienne objaśniające w największym stopniu wpływają na rozkłady poszczególnych elementów biorąc pod uwagę rozpatrywaną zarówno skalę przestrzenną jak i czasową. Innymi słowy, jakie zmienne objaśniające są najlepszymi predyktorami analizowanej zmiennej objaśnianej. Oczywiście można w tym przypadku postawić kolejne pytanie o konieczność i efektywność stosowania poszczególnych predyktorów. Może się bowiem okazać, że w pewnych przypadkach uwzględnienie niektórych, wspomnianych zmiennych niewiele poprawi wyniki lub nawet je pogorszy. By wybrać i zastosować te zmienne należy mieć dobre rozeznanie przyczynowo-skutkowe o wpływie poszczególnych elementów, głównie środowiska, na kształ-

---

<sup>1</sup>Praca została częściowo wykonana dzięki środkom finansowym na naukę w latach 2006–2008 jako projekt badawczy Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego nr COST/2/2006.

towanie rozpatrywanych pól meteorologicznych. W meteorologii i klimatologii za najczęściej stosowane zmienne uważa się wysokość nad poziomem morza, długość i szerokość geograficzną, odległość od zbiorników wodnych, rodzaj pokrycia terenu, wysokość względną, ekspozycję i nachylenie stoków. Zmiennych tych można wymienić jeszcze więcej, w zależności od rozpatrywanego obszaru oraz skali przestrzennej i czasowej.

W prezentowanej pracy podjęto zagadnienie roli tych zmiennych w interpolacji przestrzennej warunków klimatycznych Polski. Wykorzystano wyniki dotychczasowych prac oraz wyniki nowe, uzyskane z obliczeń przeprowadzonych na współczesnych jednorodnych seriach danych meteorologicznych. Zwrócono uwagę na dwa przewodnie elementy klimatu, jakimi są temperatura powietrza i opady atmosferyczne, a także na zachmurzenie nieba. Ten ostatni element jest ostatnio uważany za kluczowy przy rozpatrywaniu bilansu promieniowania i przede wszystkim globalnego ocieplenia.

W artykule przedstawiono wyniki dotychczasowych badań prowadzonych przez autorów, również z uwzględnieniem wniosków wynikających z innych prac oraz literatury. Znaczna ich część została uzyskana dzięki udziałowi współautora, profesora Zbigniewa Ustrnula, w międzynarodowej akcji Unii Europejskiej COST 719 „The use of Geographic Information Systems in climatology and meteorology”, zakończonej w 2006 roku.

## **Materiały i metody**

W opracowaniu wykorzystano dobowe, miesięczne i sezonowe wartości średniej temperatury powietrza, analogiczne sumy opadów atmosferycznych oraz wartości stopnia zachmurzenia ogólnego nieba. Wszystkie dane uwzględnione w analizie obejmowały obszar Polski oraz standardowy w badaniach klimatologicznych okres 1961–1990. Dodatkowo w przypadku temperatury powietrza wykorzystano dane z 50-lecia 1951–2000. Liczba uwzględnionych w opracowaniu stacji meteorologicznych była niestety różna, w zależności od elementu meteorologicznego i dostępności do danych meteorologicznych. W przypadku temperatury powietrza były to 73 stacje, natomiast analiza opadów atmosferycznych została wykonana z uwzględnieniem 203 punktów, a zachmurzenia 54. W tym ostatnim przypadku wzięto pod uwagę tylko stacje synoptyczne.

Każdy z uwzględnionych elementów meteorologicznych charakteryzuje się odmiennym zakresem zmian wartości oraz wzorcem rozkładu przestrzennego. Oznacza to, że rozpatrywane zbiory danych różnią się pod względem struktury statystycznej, która jest ważną cechą wpływającą na przydatność poszczególnych metod do analizy przestrzennej. Badane elementy meteorologiczne różnią się także pod względem zależności przestrzennych, to znaczy podobieństwa wartości parametru w zależności od odległości pomiędzy punktami, które są najsilniejsze w przypadku temperatury powietrza, zaś najsłabsze w przypadku zachmurzenia ogólnego nieba. Ponadto, każdy z uwzględnionych elementów meteorologicznych kształtowany jest, co prawda przez podobne czynniki lokalne, ale ich wpływ na przestrzenną zmienność jest różny w zależności od elementu. Najlepiej rozpoznane i zarazem najwyraźniej zarysowane są zależności zachodzące pomiędzy warunkami lokalnymi i temperaturą powietrza. Czynniki lokalne w silny sposób wpływają również na wysokość opadów atmosferycznych, choć związek ten jest bardzo skomplikowany i w różnych obszarach kształtuje się odmiennie. Najbardziej problematycznym jest wybór czynników lokalnych wpływających na przebieg stopnia zachmurzenia nieba.

W opracowaniu wykorzystano szeroką gamę metod interpolacji przynależnych zarówno do grupy deterministycznych jak i geostatystycznych. Przegląd ich oraz krótką charakterystykę można znaleźć w literaturze (np. Namysłowska-Wilczyńska, 2006).

W pracy wykorzystano kilka zmiennych objaśniających, przy czym najczęściej była to wysokość nad poziomem morza. W przypadku temperatury powietrza sprawdzono ponadto jak w roli zmiennej objaśniającej sprawdza się długość oraz szerokość geograficzna, czyli parametry opisujące położenie geograficzne punktów pomiarowych. Oczywiście autorzy sprawdzali też przydatność innych zmiennych środowiskowych, jak na przykład wysokość względną, jednak w stosunkowo dużej skali, jaką reprezentuje Polska parametr ten okazał się nieprzydatny.

Ocenę wpływu zmiennych objaśniających na wyniki analizy przestrzennej zastosowanych w poszczególnych metodach przeprowadzono na podstawie następujących statystycznych wskaźników błędu interpolacji:

- średni błąd interpolacji M (ang. *Mean Prediction Error*),
- pierwiastek kwadratowy średniego błędu interpolacji RMS (ang. *Root Mean Square Prediction Error*),
- średni błąd standardowy krigingu ASE (ang. *Average Kriging Standard Error*),
- średni standaryzowany błąd krigingu MSE (ang. *Mean Standardized Prediction Error*)
- pierwiastek kwadratowy ze średniego błędu standaryzowanego krigingu RMSSE (ang. *Root Mean Square Standardized Prediction Error*).

Za najistotniejszy wskaźnik dokładności uzyskanych wyników przyjęto, zalecany zwykle błąd RMSE. Dodatkowo w celu potwierdzenia poprawności walidacji dokonanej na podstawie RMSE, pomiędzy pomierzonymi oraz oszacowanymi wartościami zachmurzenia obliczono prostą miarę współzależności zmiennych, jaką jest współczynnik korelacji.

## Temperatura powietrza

Temperatura powietrza, będąc tzw. przewodnim i jednocześnie ciągłym elementem klimatu, jest najlepiej rozpoznaną jego charakterystyką. Z tego też względu stanowi dobrą podstawę do prac badawczych mających na celu wypracowanie nowych metod oceny jej zmienności przestrzennej. W literaturze polskiej jak i zagranicznej można już znaleźć wiele przykładów map prezentujących przestrzenne zróżnicowanie rozpatrywanego elementu, które zostały skonstruowane z wykorzystaniem narzędzi GIS (np. Auer i in., 2000; Dobesch, Tveito, Bessemoulin, 2001; Müller-Westermeier, Kreis, Dittmann, 1999, Brown, Comrie, 2002; Chapman, Thornes, 2003; Quiel, Sobik, Rosiński, 2003; Ustrnul, Czekierda, 2006, Dobesh, Dumolard, Dyras, 2007). W zdecydowanej większości wymienionych prac, przy konstrukcji poszczególnych map wykorzystano metody uwzględniające dodatkowe zmienne objaśniające. Pozwoliły one na bardzo precyzyjną interpolację wymienionego elementu.

Również w przypadku obszaru Polski i temperatury powietrza wykorzystano dodatkowe zmienne objaśniające (Ustrnul, Czekierda, 2005; Ustrnul, 2006). Po wielu próbach okazało się, że uwzględnienie informacji odnoszącej się do wysokości nad poziomem morza oraz długości i szerokości geograficznej w skali mezoklimatycznej oraz z uwzględnieniem danych miesięcznych i sezonowych daje w pełni satysfakcjonujące rezultaty. Problem powstał tylko, którą z metod wykorzystujących powyższe zmienne najlepiej jest zastosować. Ze względu

na bardzo wysokie i istotne współczynniki korelacji pomiędzy temperaturą powietrza a wysokością n.p.m. oraz długością i szerokością geograficzną ( $r > -0,95$ ) rozpatrzono metodę regresji prostoliniowej jednokrotnej (uwzględniającej wysokość nad poziomem morza), wielokrotnej (dodatkowo biorącej pod uwagę długość i szerokość geograficzną) oraz kriging resztowy, w którym do modelu również zastosowano wszystkie 3 zmienne objaśniające. Wszystkie miary walidacji jednoznacznie potwierdziły najlepszą przydatność krigingu resztowego, aczkolwiek metoda regresji wielokrotnej również okazała się niewiele gorszą, a jednocześnie znacznie łatwiejszą do zastosowania. Ilustrację wszystkich trzech metod prezentuje rysunek 1.

Warto w tym miejscu podkreślić, że we wszystkich tych metodach stosuje się zmienne objaśniające. W pierwszym etapie pracy służą one do wyznaczenia równań regresji, które pozwalają na zastosowanie do wizualizacji dwóch najbardziej efektywnych metod spacializacji warunków termicznych: metody regresyjnej oraz metody krigingu resztowego (ang. *residual kriging*). W metodzie regresyjnej równania te służą do wyliczenia zmiennej objaśnianej (temperatury powietrza) w poszczególnych punktach siatki gridowej. W metodzie krigingu resztowego, bardziej precyzyjnej, równania te służą tylko wyznaczeniu ogólnego tła, na które

**Tabela 1.** Wyniki walidacji modelu z zastosowaniem zmiennej objaśniającej (typów cyrkulacji *Grosswetterlagen*), ocena na podstawie danych niezależnych (r – współczynnik korelacji, RMSE – średni błąd kwadratowy)

Miesiąc	P	r	RMSE [°C]	Miesiąc	P	r	RMSE [°C]
Styczeń	Bez uwzględnienia typu	0,86*	0,68	Lipiec	Bez uwzględnienia typu	0,89*	0,57
	Wa	0,98*	0,37		Wa	0,82*	0,53
	Wz	0,98*	0,39		Wz	0,79*	0,57
	Ws	0,97*	0,38		SWz	0,83*	0,61
	Ww	0,96*	0,41		NWa	0,91*	0,57
	SWa	0,87*	0,71		NWz	0,86*	0,60
	SWz	0,94*	0,48		HM	0,83*	0,67
	NWz	0,99*	0,39		BM	0,85*	0,62
	HM	0,94*	0,51		HNz	0,91*	0,43
	BM	0,89*	0,69		HB	0,87*	0,61
	Nz	0,90*	0,69		TrM	0,81*	0,63
	HNa	0,93*	0,44		NEz	0,90*	0,41
	TrM	0,89*	0,69		HFa	0,97*	0,32
	HNFz	0,83*	0,73		HNFa	0,91*	0,45
SEa	0,97*	0,41	TB	0,93*	0,44		
Sa	0,95*	0,45	TrW	0,83*	0,49		

Objaśnienia:

P – parametr (średnia dobową temperaturą), r – współczynnik korelacji, RMSE – średni błąd kwadratowy;

\* oznacza istotne statystycznie współczynniki korelacji na poziomie 0,001

nakłada się dane pomiarowe tworząc tzw. reszty w punktach pomiarowych. Po ich uwzględnieniu stosuje się już zwykły kriging.

Metoda krigingu resztowego, czy też metody wyłącznie regresyjne, są oczywiście mało precyzyjne w przypadku wykorzystywania danych o wyższej rozdzielczości czasowej, np. dobowej. Dlatego poszukiwano innych zmiennych, które w lepszy sposób mogłyby wyjaśniać zmienność przestrzenną zmiennej dobowej. Zgodnie ze stanem wiedzy na temat cyrkulacyjnych uwarunkowań temperatury powietrza i niektórymi sugestiami w literaturze (Trigo, DaCamara, 2000; Tveito, Ustrnul, 2003; Ustrnul, 2006) wzięto pod uwagę typy cyrkulacji atmosferycznej, wykorzystując dobrze znaną w Europie klasyfikację *Grosswetterlagen* (Gerstengarbe, Werner, 1993). Otrzymano dość ciekawe wyniki, które w większości przypadków potwierdziły zasadność ich stosowania jako dodatkowej zmiennej objaśniającej. Jednakże w niektórych sytuacjach, gdzie nie notuje się wyraźnej adwekcji powietrza, użycie informacji o typie cyrkulacji pogarsza wyniki spacji. W takich przypadkach należy poszukiwać innych zmiennych. Uzyskane wyniki walidacji zastosowanego modelu z typami cyrkulacji prezentuje tabela 1.

## Opady atmosferyczne

Opad atmosferyczny, najbardziej zmienny w czasie i przestrzeni element meteorologiczny, jak wcześniej wspomniano, odznacza się skomplikowanymi i niejednoznacznymi związkami z elementami środowiska geograficznego. Spośród wielu czynników, decydujących o przestrzennym zróżnicowaniu wysokości opadów atmosferycznych, do grupy najistotniejszych zalicza się wysokość nad poziomem morza (Sobolewski, 2001; Bac-Bronowicz, 2004; Łupikasa, 2007). W przypadku opadów atmosferycznych szczegółowe analizy przeprowadzono na podstawie ich sum rocznych oraz sum w sezonie letnim i zimowym, czyli okresach w których rozpatrywany element klimatu najbardziej różni się pod względem struktury statystycznej. Uzyskane rezultaty w przypadku wszystkich badanych charakterystyk opadowych sugerują, że uwzględnienie wysokości nad poziomem morza jako zmiennej objaśniającej w istotny sposób poprawia wyniki analizy przestrzennej. Wartości błędu RMSE dla wszystkich rozpatrywanych w pracy metod cokrigingu były wyraźnie mniejsze niż w przypadku analogicznych metod krigingu, jak również stosowanych metod deterministycznych. Algorytmem dającym najlepsze wyniki analizy przestrzennej opadów atmosferycznych w Polsce okazał się cokriging zwykły oraz uniwersalny, o czym świadczą identyczne dla obydwu wymienionych metod wartości błędu RMSE (tab. 2). Należy przy tym zaznaczyć, że RMSE dla pozostałych metod z grupy cokrigingu (prosty i rozłączny) był tylko nieznacznie wyższy, co oznacza, że ich zastosowanie do prezentacji przestrzennego rozkładu tego elementu klimatu w Polsce jest również uzasadnione. Powyższą walidację przeprowadzoną na podstawie RMS potwierdzają zarówno wartości współczynnika korelacji wyznaczone pomiędzy wysokością opadów pomierzonych i oszacowanych za pomocą algorytmów interpolacji, jak i wykreślone mapy pola opadów atmosferycznych w Polsce (rys. 2).

Na rysunku 2 zaprezentowano mapy rozkładu opadów atmosferycznych, które wykonano przy zastosowaniu najlepszych spośród metod deterministycznych oraz geostatystycznych. Różnice w przebiegu izolinii wykreślonych za pomocą algorytmów geostatystycznych zauważalne są w obszarach położonych na obrzeżach Niziny Wielkopolskiej. Ponadto mapa wykonana za pomocą najlepszej metody deterministycznej (RBF), co prawda oddaje w ogół-

**Tabela 2.** Wyniki analizy przestrzennej średnich rocznych sum opadów w Polsce (1961–1990)

Metoda interpolacji		M	RMS	ASE	MS	RMSS	Współczynnik korelacji	
Deterministyczne	IDW	3,1730	82,45	–	–	–	0,858*	
	GP	0,3065	97,55	–	–	–	0,794*	
	LP	0,4229	89,55	–	–	–	0,831*	
	RBF	-0,1831	77,47	–	–	–	0,875*	
Geosty- styczne	kriging	OK	1,9500	76,76	79,77	0,01843	0,9628	0,879*
		SK	1,6420	76,29	67,22	-0,000788	1,202	0,880*
		UK	1,9500	76,76	79,77	0,01843	0,9628	0,879*
		DK	1,7350	77,44	114,3	0,002126	0,8132	0,877*
	cokri- ging	OCok	0,6119	52,29	62,23	0,003075	0,9562	0,945*
		SCok	0,2789	52,65	43,39	0,001979	1,328	0,945*
		UCok	0,6119	52,29	62,23	0,003075	0,9562	0,945*
		DCok	0,2789	52,65	43,39	0,001979	1,328	0,945*

Objaśnienia:

– oznacza, że statystyka błędu interpolacji nie jest obliczana dla danej metody

\* oznacza istotne statystycznie współczynniki korelacji na poziomie 0,001

wyróżnione szarym tłem wartości oznaczają najlepsze wyniki interpolacji w obrębie każdej z wykorzystanych grup metod

objaśnienia symboli:

IDW – odwrócone odległości wazone, GP – wielomianów globalna, LP – wielomianów lokalna, RBF – radialne funkcje bazowe, OK – zwykły kriging, SK – prosty kriging, UK – uniwersalny kriging, DK – rozłączny kriging, OCok – zwykły cokriging, SCok – prosty cokriging, UCok – uniwersalny cokriging, DCok – rozłączny cokriging

nich zarysach zasadnicze cechy przestrzennej zmienności opadów w Polsce, nie mniej jednak przebieg izolinii wydaje się być zbyt skomplikowany.

Warto także zauważyć, że wartości RMSE, mimo iż wskazują na znaczną poprawę precyzji interpolacji po zastosowaniu zmiennej objaśniającej (wysokość nad poziomem morza) to ogólny przebieg izolinii na mapach wykonanych za pomocą odpowiadających sobie metod krigingu i cokrigingu różni się jedynie w szczegółach. Choć nie wpływają one na ogólny obraz pola meteorologicznego tego elementu w Polsce, to mają istotne znaczenie podczas analizy przestrzennej opadów w mniejszych skalach przestrzennych. Opisane w artykule badania, jak również doświadczenia innych badaczy (Stach, Tamulewicz, 2003) sugerują, że analizując rolę dodatkowych zmiennych objaśniających w interpolacji opadów atmosferycznych, związki pomiędzy cechami środowiska i wielkością tego elementu powinno się definiować lokalnie.

Podsumowując można stwierdzić, że wysokość nad poziomem morza jest bez wątpienia trafnie dobraną zmienną objaśniającą przestrzenne zmiany opadów atmosferycznych w Polsce. Jednakże znaczna zmienność opadów atmosferycznych bez wątpienia związana jest nie tylko z wyniesieniem punktu nad poziom morza, ale w znacznym stopniu także z innymi czynnikami środowiskowymi. Z tego względu w dalszych badaniach nad rolą zmiennych objaśniających w interpolacji opadów powinno się uwzględnić również inne cechy opisujące środowisko geograficzne w skali lokalnej, spośród których do najistotniejszych zalicza się ekspozycję, szczególnie w obszarach o zróżnicowanej rzeźbie terenu jak również czynnik cyrkulacyjny.

## Zachmurzenie

Do oceny roli zmiennych objaśniających w interpolacji zachmurzenia ogólnego nieba wykorzystano średnie roczne oraz średnie miesięczne wartości omawianego elementu klimatu, dobrane tak aby zbiory danych różniły się pod względem struktury statystycznej. Wyselekcjonowano miesiące o największym (czerwiec) i najmniejszym (luty) zakresie zmian przestrzennych zachmurzenia w Polsce. Do porównania wyników interpolacji wartości rocznych wzięto styczeń, czyli miesiąc, w którym zachmurzenie odznacza się podobnym zakresem zmian w porównaniu z wartościami rocznymi, lecz innym wzorcem rozkładu przestrzennego.

Okazuje się, że w każdym z badanych przedziałów czasowych najlepsze wyniki uzyskano na drodze interpolacji innymi metodami (tab. 3). Oznacza to, że sezonowa zmienność struktury pola zachmurzenia ogólnego ma wpływ na efektywność poszczególnych algorytmów estymacji. Zastosowanie zmiennej objaśniającej, którą na wstępie analiz była również wysokość nad poziomem morza nie zawsze pozytywnie wpływa na precyzję estymacji rozpatrywanego elementu klimatu. Sytuacja ta związana jest z jednej strony z tym, że zachmurzenie jest elementem pogody i klimatu kształtowanym przede wszystkim przez czynniki atmosferyczne, a wpływ podłoża (warstwy czynnej) ma tutaj drugorzędne znaczenie.

**Tabela. 3.** Wyniki analizy przestrzennej średnich rocznych wartości zachmurzenia w Polsce (1961–1990)

Metoda interpolacji		M	RMS	ASE	MS	RMSS	Współczynnik korelacji	
Deterministyczne	IDW	0,001992	0,22224	–	–	–	0,521*	
	GP	0,004509	0,2114	–	–	–	0,621*	
	LP	0,008984	0,2052	–	–	–	0,631*	
	RBF	0,0005894	0,2308	–	–	–	0,460*	
Geosty- styczne	kriging	OK	-0,000519	0,2343	0,2352	-0,005035	0,9928	0,434*
		SK	0,0065710	0,2224	0,2276	0,02702	0,9765	0,519*
		UK	-0,0005187	0,2343	0,2352	-0,005035	0,9928	0,518*
		DK	0,0011580	0,2232	0,1989	0,002584	1,122	0,514*
	cokri- ging	OCok	-0,0007375	0,2221	0,2392	-0,005921	0,9421	0,518*
		SCok	0,0041830	0,1898	0,2244	0,01404	0,8477	0,702*
		UCok	-0,0007375	0,2221	0,2392	-0,005921	0,9421	0,434*
		DCok	-0,0039040	0,2528	0,2088	-0,0235	1,219	0,251*

Objaśnienia:

– oznacza, że statystyka błędów interpolacji nie jest obliczana dla danej metody

\* oznacza istotne statystycznie współczynniki korelacji na poziomie 0,001

wyróżnione szarym tłem wartości oznaczają najlepsze wyniki interpolacji w obrębie każdej z wykorzystanych grup metod

objaśnienia symboli:

IDW – odwrócone odległości wazone, GP – wielomianów globalna, LP – wielomianów lokalna, RBF – radialne funkcje bazowe, OK – zwykły kriging, SK – prosty kriging, UK – uniwersalny kriging, DK – rozłączny kriging, OCok – zwykły cokriging, SCok – prosty cokriging, UCok – uniwersalny cokriging, DCok – rozłączny cokriging

Biorąc pod uwagę wartości roczne zachmurzenia i wartości zachmurzenia w czerwcu, wyraźną poprawę wyników analizy przestrzennej przeprowadzonej za pomocą metod geostatystycznych (niższe wartości RMSE) uzyskano po zastosowaniu zmiennej objaśniającej tj. wysokości nad poziomem morza. W tabeli 3, dla przykładu zestawiono wartości statystycznych wskaźników błędu interpolacji dla średniego rocznego stopnia zachmurzenia w Polsce. Najlepsze wyniki estymacji wartości rocznych daje cokriging prosty, natomiast w przypadku wartości czerwcowych najlepiej sprawdza się cokriging rozłączny (rys. 3).

Wykorzystanie zmiennej objaśniającej nie wpływa pozytywnie na analizę przestrzenną zachmurzenia w lutym oraz w styczniu (za wyjątkiem cokrigingu rozłącznego). Co więcej, najlepsze rezultaty interpolacji zachmurzenia w wymienionych miesiącach dają dwie spośród metod deterministycznych, a mianowicie IDW (styczeń) i RBF (luty) (rys. 3), mniej przydatne okazują się w tym przypadku metody geostatystyczne z rodziny zarówno krigingu jak i cokrigingu. Większa przydatność metod deterministycznych niż geostatystycznych do interpolacji zachmurzenia w wymienionych przedziałach czasowych jest właściwością specyficzną, niespotykaną podczas badań innych elementów klimatu. Prawdopodobnie jest to wynikiem słabo zaznaczonych związków przestrzennych i nikłym wpływem podłoża na kształtowanie tego elementu klimatu.

Odpowiedź na pytanie o rolę zmiennych objaśniających w spacjiacji wymaga prowadzenia dalszych prób i poszukiwań. Dysponując danymi dobowymi można tylko polecić wykorzystanie dodatkowej, wejściowej zmiennej objaśniającej tj. typów cyrkulacji. Ponieważ decydują one w dużym stopniu o rozkładzie zachmurzenia, ich przydatność powinna być bezsporna w tego typu analizach. Pierwsze próby takiego postępowania zaprezentowano na rysunku 4, pokazującej wybrane przykłady przestrzennego zróżnicowania zachmurzenia w Polsce w styczniu w typach cyrkulacji atmosferycznej.

## Podsumowanie i wnioski

Przygotowanie meteorologicznych i klimatycznych map jest dość trudnym zadaniem. Wymaga ono dokładnego rozpoznania rozpatrywanych pól meteorologicznych przez poznanie ich struktury oraz fizycznych procesów odpowiedzialnych za ich kształtowanie, które w dużym stopniu jest zależne od środowiska geograficznego. Jednocześnie standardowe dane meteorologiczne pochodzą tylko z określonych punktów, które na ogół mają bardzo nieregularną i niereprezentatywną przestrzennie lokalizację. Dlatego przy analizie przestrzennej należy wykorzystywać dodatkowe zmienne objaśniające (predyktory), które przy spacjiacji i wizualizacji pól meteorologicznych są bardzo pomocne. Istnieje cały szereg tych zmiennych, które w mniejszym lub większym stopniu mogą objaśniać rozkłady przestrzenne poszczególnych elementów. Najczęściej za taki predyktor uważana jest wysokość nad poziomem morza. Jej wpływ można zauważyć na rozkład kilku elementów, a w przypadku ciśnienia atmosferycznego pełni ona rolę zasadniczą, co jest wykorzystywane w codziennej praktyce meteorologicznej od wielu lat.

Przy analizie różnych elementów klimatu nie ma jednej uniwersalnej metody interpolacji przestrzennej. Każdy element i skala wymagają indywidualnego podejścia, przy czym wykorzystywane są różne dodatkowe zmienne objaśniające. Oprócz wysokości nad poziomem morza, w meteorologii i klimatologii najczęściej brana jest pod uwagę wysokość względna, ekspozycja stoków, użytkowanie ziemi i powiązana z nim tzw. szorstkość terenu, oddalenie od zbiorników wodnych. Większość z wymienionych zmiennych można stosunkowo łatwo pozyskać z cyfrowych map terenu.



Dotychczasowe wyniki badań potwierdzają, że w przypadku temperatury powietrza i jej wartości średnich miesięcznych oraz sezonowych najbardziej precyzyjną metodą jest kriging resztowy, w którym jako główna zmienna objaśniająca wykorzystywana jest wysokość nad poziomem morza. Metoda ta może być również z powodzeniem stosowana w przypadku sum sezonowych opadów atmosferycznych. Jednakże okazuje się, że zmienna ta w przypadku tego elementu klimatu zwykle zwiększa precyzję przestrzennej zmienności pola opadów, ale efektywność takiego postępowania zależy od wielkości rozpatrywanego obszaru. Im większy obszar tym uwzględnienie wysokości nad poziomem morza znacznie poprawia wyniki interpolacji. Oczywiście w rozważaniach bierze się pod uwagę warunki klimatu umiarkowanego, przejściowego o charakterystycznym reżimie opadowym. W mniejszych obszarach konieczne jest uwzględnienie innych zmiennych, w tym przede wszystkim ekspozycji stoków i wysokości względnej. Dobór zmiennych powinien być jednak w każdym wypadku niezależnie dobrany i przetestowany. Zastosowanie wysokości nad poziomem morza jako zmiennej objaśniającej ma też na ogół pozytywny wpływ na precyzję interpolacji sezonowych wartości zachmurzenia ogólnego nieba.

Zastosowanie typów cyrkulacji, jako głównych predyktorów, na ogół poprawia wyniki spacji dobowych wartości większości elementów klimatu. Jednakże, zastosowanie typów bezadwekcyjnych może znacznie pogorszyć rezultaty i w takim wypadku użycie typów cyrkulacji jest zupełnie bezcelowe. Należy wówczas poszukiwać i rozważyć zastosowanie innych zmiennych objaśniających (np. typ mas powietrza, struktura pionowa powietrza, wskaźniki chwiejności, itp.).

Przedstawione w artykule wyniki mogą być wskazówką do dalszych analiz i badań nad przestrzenną interpolacją różnych pól meteorologicznych, a także innych pokrewnych elementów. Jednocześnie, w ocenie autorów potwierdzają się opinie, że zagadnienie interpolacji przestrzennej jest bardzo złożone i zależy przede wszystkim od charakteru rozpatrywanego elementu a także od skali przestrzennej i czasowej.

### Literatura

- Adamczyk R., Ustrnul Z., 2007: Rola cyrkulacji atmosferycznej w kształtowaniu zachmurzenia ogólnego na obszarze Polski, *Annales UMCS*, Sec. B., w druku.
- Auer I., Böhm R., Mohnl H., Potzmann R., Schöner W., 2000: OKLIM – Digital Climatology of Austria 1961–1990, Proceedings of 3<sup>rd</sup> European Conference on Applied Climatology (ECAC 2000), Pisa, Italy, CD-ROM.
- Bac-Bronowicz J., 2003: Methods of the visualisation of precipitation based on various observation measurement periods in GIS, [W:] Man and climate in the 20<sup>th</sup> century, *Studia Geograficzne* 75, Wyd. Uniwersytetu Wrocławskiego, Wrocław, s. 559–563.
- Brown D. P., Comrie A. C., 2002: Spatial modeling of winter temperature and precipitation in Arizona and New Mexico, USA, *Climate Research*, Vol. 22, pp. 115–128.
- Chapman L., Thornes J.E., 2003: The use of geographical information systems in climatology and meteorology, *Progress in Physical Geography*, Vol. 27, No. 3, pp. 313–330.
- COST 719 Final Report, 2006: Chapter 2: Spatialisation of the climatological and meteorological information by the support of GIS (red. O.E. Tveito), Brussels.
- Dobesch H., Dumolard P., Dyras I. (eds), 2007: Spatial interpolation for Climate Data, *ISTE – Geographical Information Systems series*, London – Newport Beach, p. 284.
- Gerstengarbe, F.W., Werner, P.C., 1993: Katalog der Grosswetterlagen Europas nach Paul Hess und Helmuth Brezowsky 1881–1992. – Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 113, Offenbach am Main.
- Lupikasza E., 2007: Metody analiz przestrzennych w badaniu zmienności opadów w Europie, *Roczniki Geomatyki*, Tom V, Zeszyt 1, s. 71–80, PTIP Warszawa.
- Müller-Westermeier, G., Kreis, A., Dittmann, E., 1999: Klimaatlas Bundesrepublik Deutschland, Teil 1, Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main.

- Namysłowska-Wilczyńska B., 2006: Geostatystyka – Teoria i zastosowania, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław, 356 s.
- Quiel F., Sobik M., Rosiński D., 2003: Spatial analysis of air temperature trends in Europe with the use of GIS, [W:] Man and climate in the 20<sup>th</sup> century, Studia Geograficzne 75, Wyd. Uniw. Wrocławskiego, Wrocław, pp. 541-550.
- Sobolewski W., 2001: Numeryczna mapa opadów atmosferycznych dla dorzecza Wisły, Uniwersytet Gdański, *Rocz. Fizycznogeograficzny*, t. VI, s. 79-84.
- Stach A., Tamulewicz J., 2003: Wstępna ocena przydatności wybranych algorytmów przestrzennej estymacji miesięcznych i rocznych sum opadów na obszarze Polski, [W:] Kostrzewski, Szpikowski (red.) – Funkcjonowanie geoekosystemów zlewni rzecznych, Tom 3, Instytut Badań Czwartorzędu i Geoekologii UAM, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań, s. 87-111.
- Trigo, R.M., DaCamara, C.C., 2000: Circulation weather types and their influence on the precipitation regime in Portugal, *International Journal of Climatology*, 20, pp. 1559-1581.
- Tveito, O. E., Ustrnul, Z., 2003: A review of the use of large-scale atmospheric circulation classification in spatial climatology, DNMI, *KLIMA*, No. 10, Oslo.
- Ustrnul Z., 2006: Spatial differentiation of air temperature in Poland using circulation types and GIS, *International Journal of Climatology*, 26, pp. 1529-1546.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2005: Application of GIS for the development of climatological air temperature maps: an example from Poland, *Meteorol. Appl.*, 12, pp. 43-50.
- Ustrnul Z., Czekierda D., 2006: Metody analizy przestrzenno-czasowej w badaniach klimatologicznych (na przykładzie Polski), *Roczniki Geomatyki*, Tom IV, Zeszyt 2, s. 147-156, PTIP, Warszawa.

#### Summary

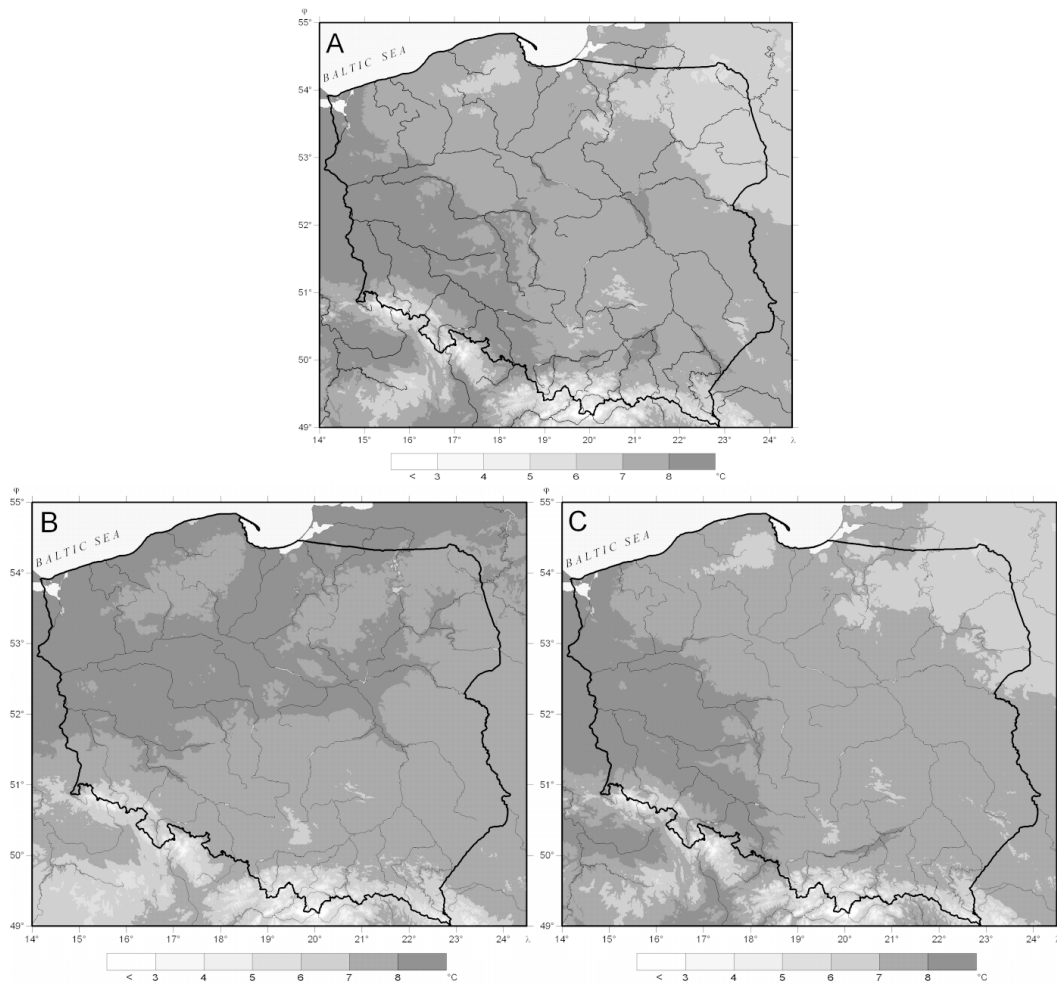
*In the paper, the problem of application of explanatory variables in the spatialisation methods is presented. The analysis was performed for the territory of Poland with respect to 3 main climate parameters: air temperature, precipitation totals and general cloudiness. Elaboration of meteorological/climatological maps is a complicated task. It requires careful and detailed analysis of respective element fields and thorough knowledge of physical processes connected with the complexity of geographical environment. Simultaneously, the application of additional explanatory variables (such as altitude, aspect, land use, relative height, etc.) is highly recommended.*

*There is no one universal spatialisation method and one explanatory variable relevant for different climatological problems and for different spatial and temporal scales. Each element and resolution requires individual approach. It was found that residual kriging is the best solution for monthly and seasonal means of air temperature and precipitation totals. Spatialisation of the precipitation totals is particularly difficult due to its highly temporal and spatial differentiation. However, for both elements and also for cloudiness the application of altitude usually improves spatialisation results. It is especially recommended for seasonal values and for larger areas. The application of circulation types – as the main predictor – usually improves spatialisation of the daily values for most climatic elements. However, the use of some non-advective types does not improve results. Maybe the application of some additional explanatory parameters should be considered (e.g. humidity, vertical profiles, air masses types, etc).*

dr Ewa Łupikasza  
ewa.lupikasza@us.edu.pl  
tel. 032 291 83 81

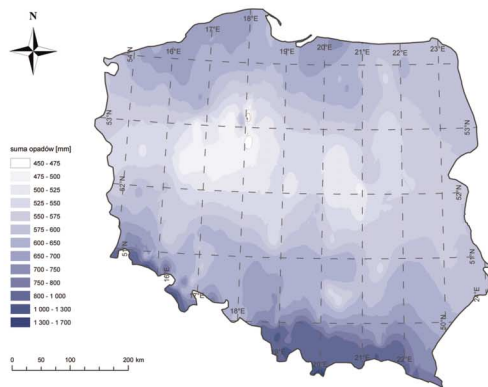
dr hab. Zbigniew Ustrnul, prof. UŚ  
ziustrnul@cyf-kr.edu.pl

mgr Danuta Czekierda  
danuta.czekierda@imgw.pl

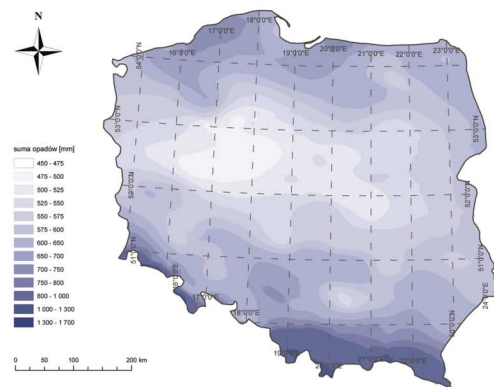


**Rys. 1.** Średnia roczna temperatura powietrza w Polsce wg 3 różnych metod spacjiacji:  
 A – kriging resztowy, B – regresja prosta, C – regresja wielokrotna

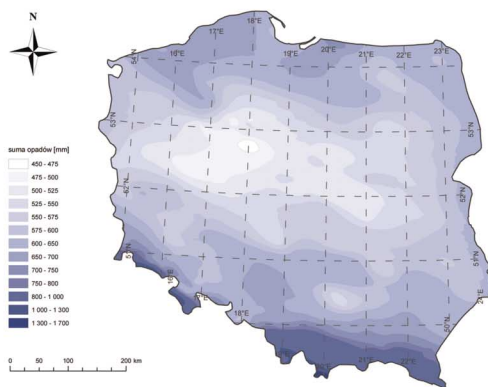
metoda interpolacji: RBF



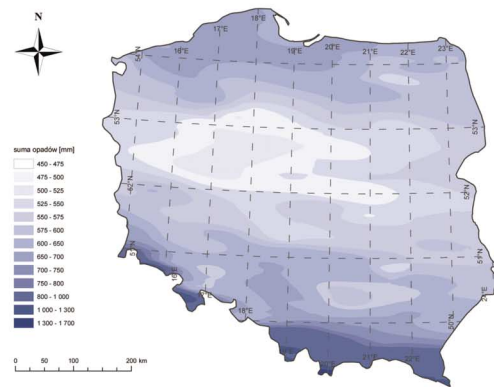
metoda interpolacji: kriging prosty



metoda interpolacji: cokriging prosty

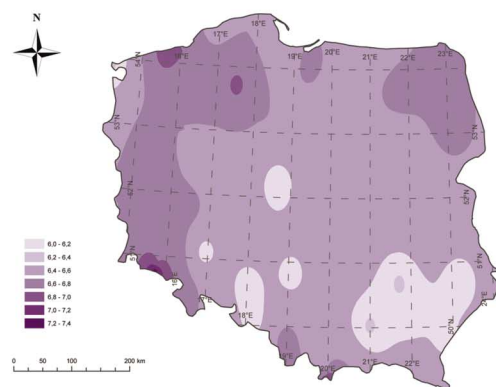


metoda interpolacji: cokriging zwykły

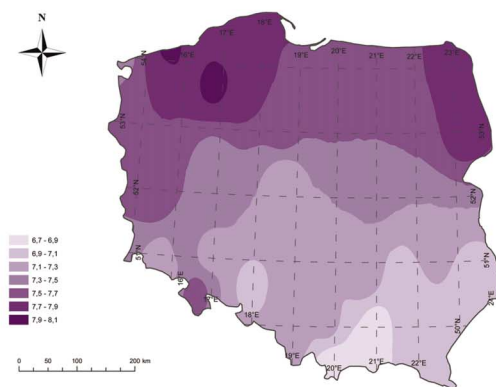


Rys. 2. Średnie roczne sumy opadów atmosferycznych [mm]

okres: rok  
metoda interpolacji: cokriging prosty



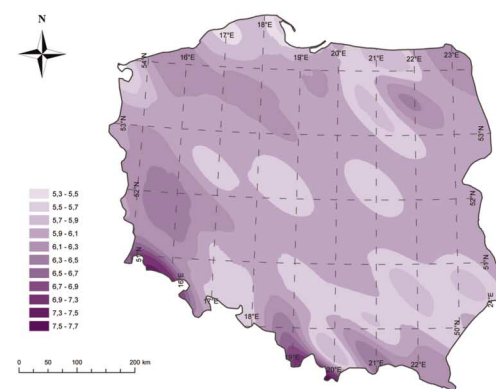
okres: styczeń  
metoda interpolacji: IDW



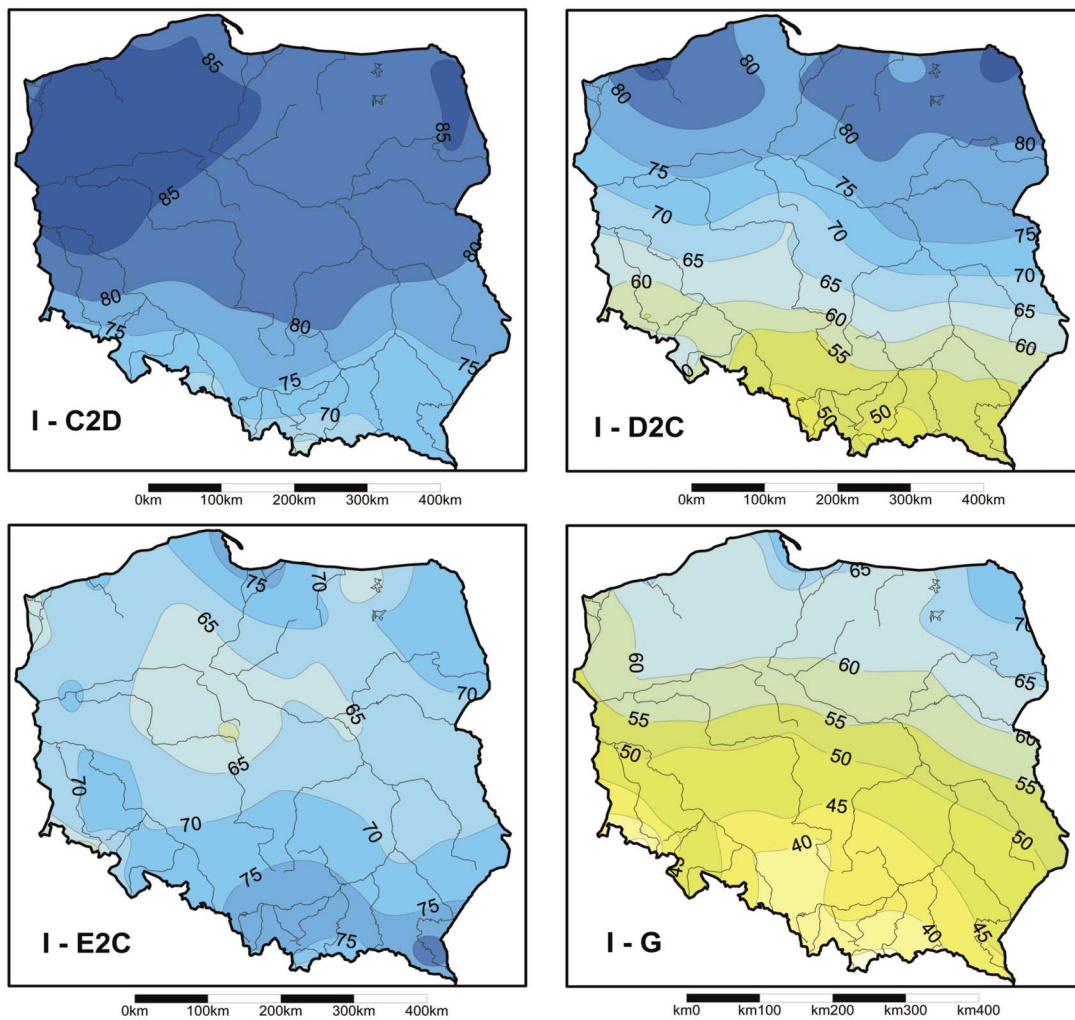
okres: luty  
metoda interpolacji: RBF



okres: czerwiec  
metoda interpolacji: cokriging rozłączny



Rys. 3. Średnie roczne oraz miesięczne (styczeń, luty, czerwiec) zachmurzenie ogólne (oktany)



Rys. 4. Średnie dobowe zachmurzenie w styczniu [%] w wybranych typach cyrkulacji wg klasyfikacji Osuchowskiej-Klejn (za Adamczyk, Ustrnul, 2007)