

**Robert Twardosz\*, Marta Cebulska\*\*,  
Robert Szczepanek\*\***

**ZASTOSOWANIE METODY 2D RST DO OPRACOWANIA  
ROZKŁADU PRZESTRZENNEGO ROCZNYCH SUM OPADÓW  
ATMOSFERYCZNYCH W DORZECZU GÓRNEJ WISŁY**

**Application of 2D RST method for spatial distribution of annual  
precipitation determination in the Upper Vistula Basin**

**Summary.** Spatial distribution of annual precipitation is important element of engineering hydrology. To prepare precipitation maps for larger areas, proper methods of spatial interpolation and long-term precipitation records are needed. For analysed Upper Vistula Basin, 403 such representative stations with records for years 1952–1981 have been chosen and verified. Regularized Spline with Tension method of interpolation have been selected (2D version) to interpolate spatial distribution of annual precipitation in Soła watershed, and cross-validation method for results verification.

**Słowa kluczowe:** interpolacja opadu, opad średni, GRASS, v.surf.rst.

**Key words:** precipitation interpolation, mean precipitation, GRASS, v.surf.rst.

**WPROWADZENIE**

Celem pracy jest próba zastosowania metody 2D RST (*ang. Regularized Spline with Tension*) do opracowania rozkładu przestrzennego rocznych sum opadów atmosferycznych na potrzeby projektowania inżynierskiego w dorzeczu górnej Wisły. O częstości i ilości opadów na tym obszarze decydują, oprócz czynników cyrkulacyjnych, urozmaicona rzeźba terenu i wysokość nad poziomem morza (Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991). To powoduje, że w opra-

---

\* Uniwersytet Jagielloński, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Klimatologii, 30–387 Kraków, ul. Gronostajowa 7, e-mail: r.twardosz@uj.edu.pl

\*\* Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, 31–155 Kraków, ul. Warszawska 24, e-mail: marta.cebulska@iigw.pl, robert.szczepanek@iigw.pl

cowywaniu rozkładu przestrzennego opadów konieczne jest uwzględnienie informacji o opadzie z dużej liczby stacji meteorologicznych i posterunków opadowych, najlepiej z długich serii chronologicznych, reprezentujących różne jednostki fizycznogeograficzne.

W dokumentacji klimatograficznej opadów – jak dotąd – słabo reprezentowane są Karpaty, chociaż zasoby danych meteorologicznych są pokaźne w odniesieniu do całego obszaru (Cebulska i in. 2007). Zmienność przestrzenna opadów w Polsce była przedmiotem wielu opracowań. Do pionierskiego opracowania w tym zakresie należy *Geograficzne rozmieszczenie opadów atmosferycznych w krajach karpackich* E. Romera z 1895 r. Podstawą tego opracowania były roczne opady z 238 stacji, z czego 124 stanowiły stacje z Galicji z okresu 1876–1890. W okresie powojennym ukazał się atlas opadów opracowany przez Wiszniewskiego (1953). Z atlasu tego wciąż korzystają inżynierowie; odczytują z niego opady średnie miesięczne i roczne. Podstawą opracowania tego atlasu były średnie opady z lat 1891–1930. Drugą ważną pozycją jest *Atlas hydrologiczny Polski* pod red. Stachy'ego (1987), z którego inżynierowie odczytują m. in. maksymalne opady dobowe o prawdopodobieństwie 1%, 10% i 50%. Podstawą opracowania tych map były maksymalne sumy dobowe opadów z lat 1951–1975. W *Atlasie klimatycznym Polski* pod red. Wiszniewskiego (1973) jest przedstawiony m.in. rozkład przestrzenny opadów średnich miesięcznych wyznaczonych z lat 1931–1960 i 1951–1960. Jest także mapa rocznych opadów w dorzeczu górnej Wisły wykreślona na podstawie średnich rocznych opadów z lat 1951–1970 (Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991). W ostatnim, najnowszym opracowaniu Lorenc z roku 2005, do opracowania rozkładu przestrzennego opadów w Polsce wykorzystano dane ze stacji synoptycznych. Z obszaru dorzecza górnej Wisły zostały wykorzystane dane opadowe tylko z 11 stacji.

Opracowanie rozkładu przestrzennego opadów na potrzeby zastosowań inżynierskich wymaga doboru takiej metody interpolacji, która będzie możliwa do zastosowania w obszarach przylegających, gwarantując zapewnienie ciągłości pola opadów. Metoda interpolacji, przy maksymalnej prostocie, powinna zapewniać rezultaty przynajmniej porównywalne z podobnymi opracowaniami w świecie w zakresie błędów interpolacji. Ze względu na zbyt duży subiektywizm oraz złożoność metod geostatystycznych, zdecydowano się w tej pracy zastosować metody krzywych sklepanych. Proste implementacje metody krzywych sklepanych pozwoliły Ninyeroli i in. (2007) uzyskać w przypadku średnich rocznych opadów na obszarze Półwyspu Iberyjskiego średni błąd kwadratowy (RMSE) rzędu 138 mm. Bardziej zaawansowaną metodę krzywych sklepanych (RST) zaproponowali Mitasova i Mitas (1993). Metoda ta została zastosowana z powodzeniem do opracowania przestrzennego rozkładu opadów na obszarze Słowacji (Hofierka i in. 2002), a autorzy uzyskali stosunkowo niewielki błąd RMSE, rzędu 90 mm.

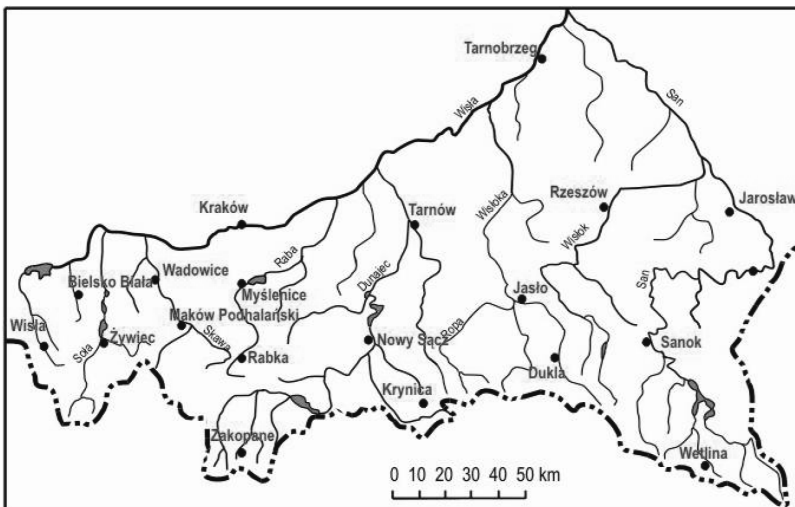
W tej pracy autorzy podjęli próbę zastosowania metody 2D RST do opracowania rozkładu przestrzennego opadów, z uwzględnieniem największej liczby stacji z możliwie najdłuższego okresu. Weryfikacja danych opadowych została przeprowadzona w odniesieniu do całego dorzecza górnej Wisły. Przestrzenny obraz opadów został natomiast zobrazowany na przykładzie dorzecza Soły.

## MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE I METODY

**Dane opadowe.** W pracy dokonano weryfikacji wielu materiałów źródłowych z publikowanymi rocznymi opadami atmosferycznymi w dorzeczu górnej Wisły. Korzystano z następujących publikacji:

- publikacja Hellmanna (1906),
- *Sprawozdania Komisji Fizjograficznej PAU*,
- *Materiały do Klimatografii Galicji*,
- *Jahrbuch Hydrographischen Zentralbureaus k. k. Ministerium für öffentliche Arbeiten*,
- roczniki: hydrograficzne, meteorologiczne, opadowe,
- materiały do bilansu wodnego Polski oraz
- materiały publikowane Głównego Urzędu Statystycznego.

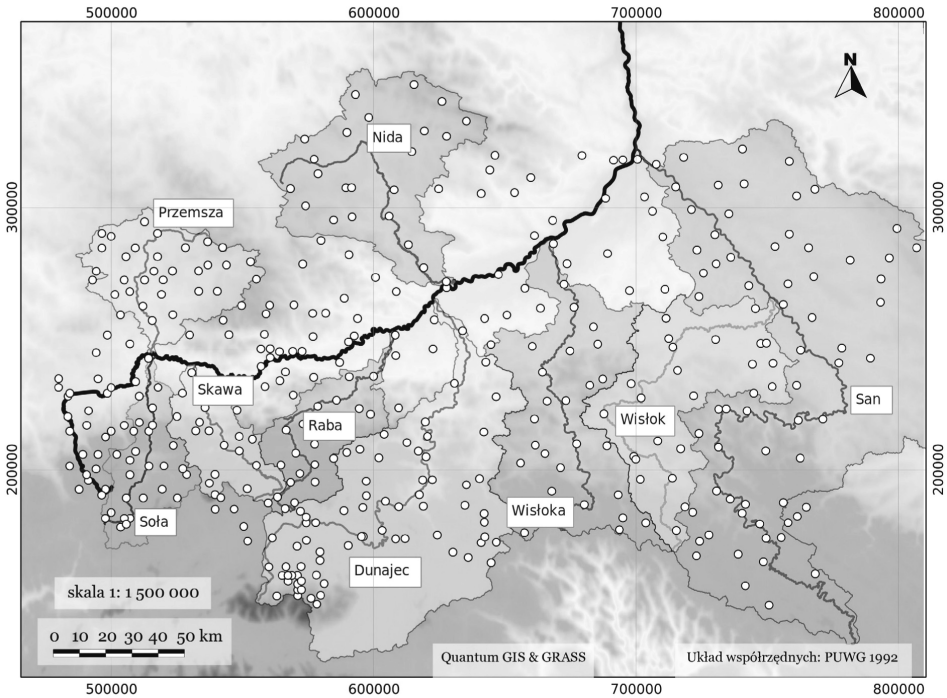
Na podstawie tak wielu materiałów utworzono jednorodną bazę danych sum opadów rocznych obejmującą ciągi chronologiczne z 19 stacji meteorologicznych z lat 1881–2009 (ryc. 1).



Ryc. 1. Stacje opadowe w dorzeczu górnej Wisły z danymi dostępnymi od 1881 r.

Fig. 1. Precipitation stations in the Upper Vistula River Basin offering records since 1881

W okresie powojennym służba meteorologiczna w Polsce dysponowała największą siecią stacji i posterunków opadowych, z których wyniki były publikowane. Od lat 1980. zaprzestano publikowania wyników z obserwacji meteorologicznych, a liczba stacji ulegała zmniejszaniu. Spośród 583 stacji meteorologicznych i posterunków opadowych wybrano 403 stacje równomiernie rozmieszczone w dorzeczu z kompletnymi ciągami chronologicznymi z lat 1952–1981 (ryc. 2).



Ryc. 2. Posterunki opadowe z seriami pomiarowymi z lat 1952–1981

Fig. 2. Precipitation posts with series from the period 1952–1981

Dokonano oceny średnich opadów rocznych w latach 1952–1981 na tle średnich opadów w okresie 1881–2009, co pozwoliło dokonać oceny reprezentatywności okresu 1952–1981 do opracowania przestrzennego opadów.

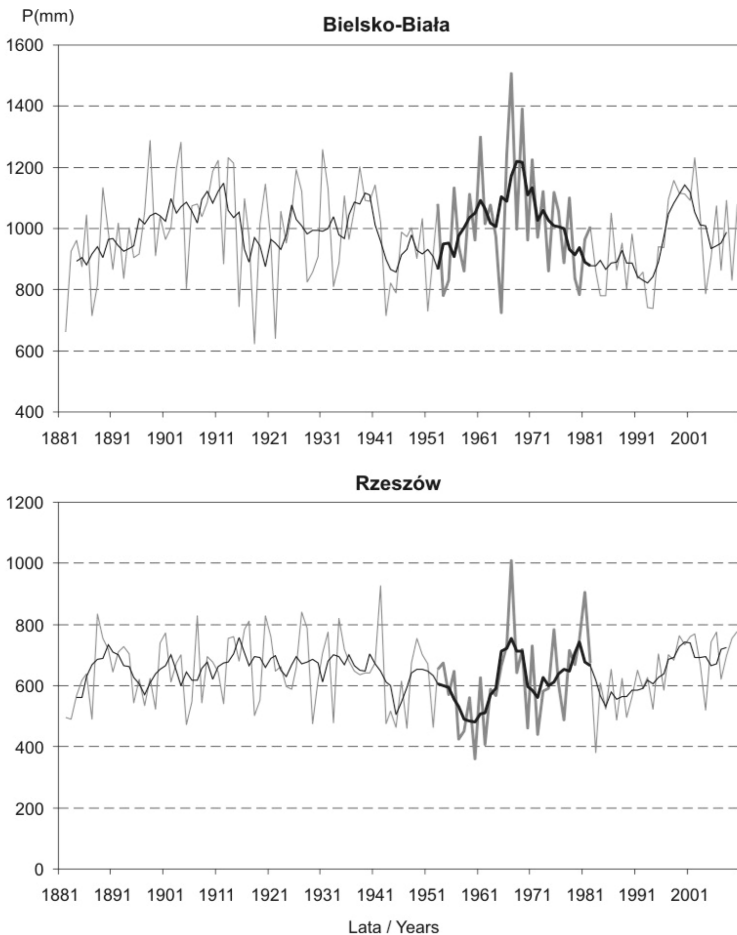
**Metoda interpolacji przestrzennej opadów.** Do opracowania rozkładu przestrzennego opadów zastosowano metodę Regularized Spline with Tension (Mitasova, Mitas 1993, Hofierka i in. 2002) w wersji 2D. Jest to czteroparametrowa metoda krzywych sklejanych. Parametrami podlegającymi optymalizacji w tej metodzie są:

- wymuszenie (*tension*)  $\phi$ ,
- wygładzenie (*smoothing*)  $\omega$ ,

- skalowanie (*vertical scaling*)  $c$ ,
- anizotropia (*anisotropy*).

Opierając się na rezultatach uzyskanych przez innych autorów, przyjęto obszary zmienności poszczególnych parametrów optymalizacji. Procedura interpolacyjna była prowadzona z wykorzystaniem modułu *v.surf.rst* programu GRASS GIS.

Optymalizację parametrów prowadzono, wykorzystując metodę wzajemnej weryfikacji (*ang. cross-validation*) (Hofierka i in. 2002). W dorzeczu Soły uzyskane optymalne wartości parametrów wyniosły:  $\phi = 45$ ,  $\omega = 0$ , skalowanie = 0, anizotropia = 0.

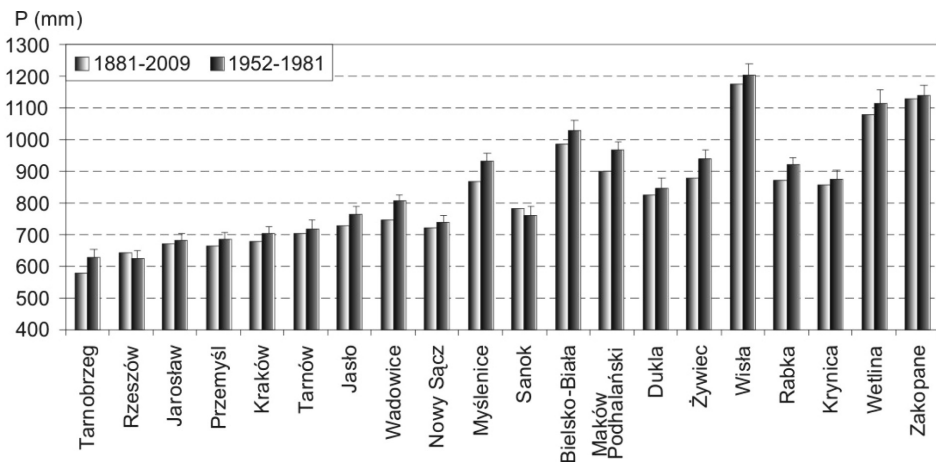


**Ryc. 3.** Wieloletni przebieg rocznych sum opadów (z 5-letnimi średnimi konsekwentnymi) w Bielsku-Białej i Rzeszowie

**Fig. 3.** Long-term variation of annual precipitation totals (with 5-year moving averages) in Bielsko-Biała and Rzeszów

## WYNIKI

Jak pokazują wyniki badań Cebulskiej i in. (2007), zmienność opadów rocznych w dorzeczu górnej Wisły nie wykazuje istotnych statystycznie trendów zmian wieloletnich, co wynika m.in. z ich dużej zmienności czasowej. Wyraźnie natomiast rysują się krótkookresowe fluktuacje z naprzemian występującym nadmiarem i niedoborem opadów, co dobrze ilustruje przebieg rocznych opadów ukazany na przykładzie Bielska-Białej i Rzeszowa (ryc. 3). W przyjętym do analizy przestrzennego rozkładu opadów okresie 1952–1981 występowały zarówno małe sumy opadów, szczególnie w latach 1950., jak i duże sumy opadów w pojedynczych latach okresu 1960–1980 (ryc. 4).

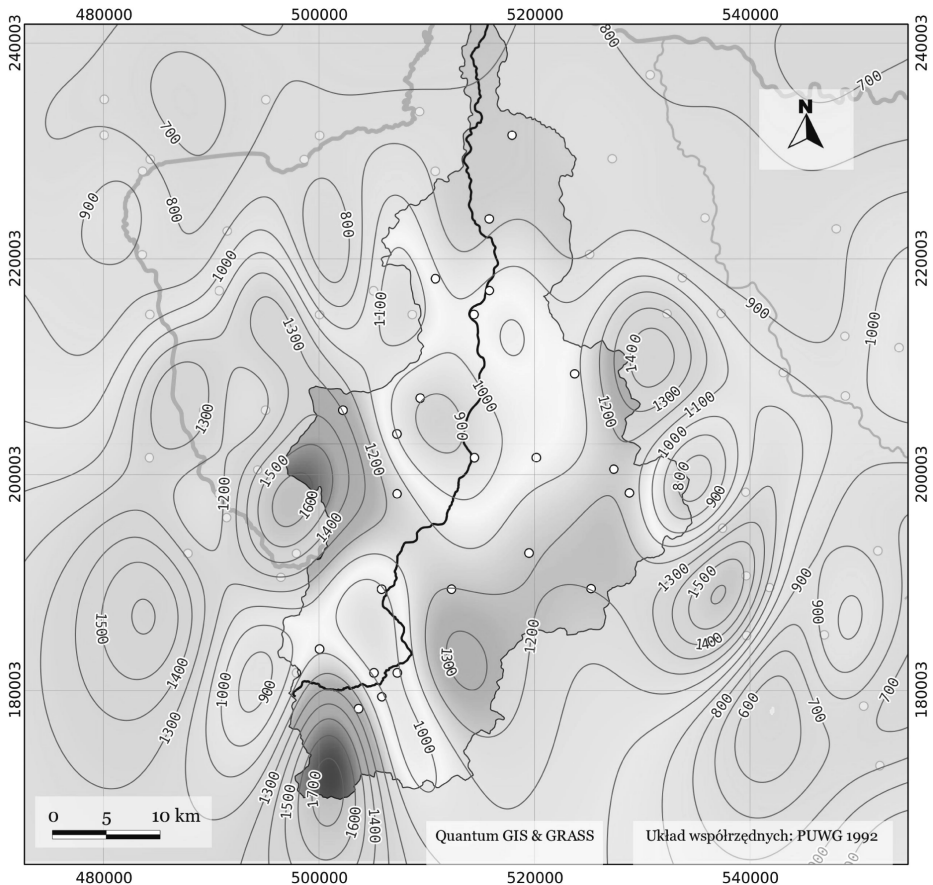


Ryc. 4. Średnie sumy opadów w okresie 1881–2009 i 1952–1981

Fig. 4. Average precipitation totals in the period 1881–2009 and 1952–1981

Wyznaczone średnie roczne sumy opadów w latach 1952–1981 na większości stacji są wyższe od średniej z lat 1881–2009, a tylko w Rzeszowie i Sanoku niższe. Różnice średnich opadów na żadnej nie przekraczają jednak progu istotności statystycznej.

Przestrzenny rozkład średnich rocznych opadów w dorzeczu Soły uzyskano na podstawie danych z 23 stacji zlokalizowanych na obszarze dorzecza oraz 45 stacji na obszarach bezpośrednio przylegających. Do interpolacji przestrzennej opadów wykorzystano opisaną wcześniej metodę 2D RST. Wyniki interpolacji zwizualizowano w postaci map rozkładu przestrzennego w programie Quantum GIS. Pomimo nieuwzględnienia w przyjętej metodzie informacji o ukształtowaniu terenu, uzyskano przestrzenny obraz opadów w dorzeczu Soły zbliżony do oczekiwanego (ryc. 5). Rozkład opadów nawiązuje do ukształtowania



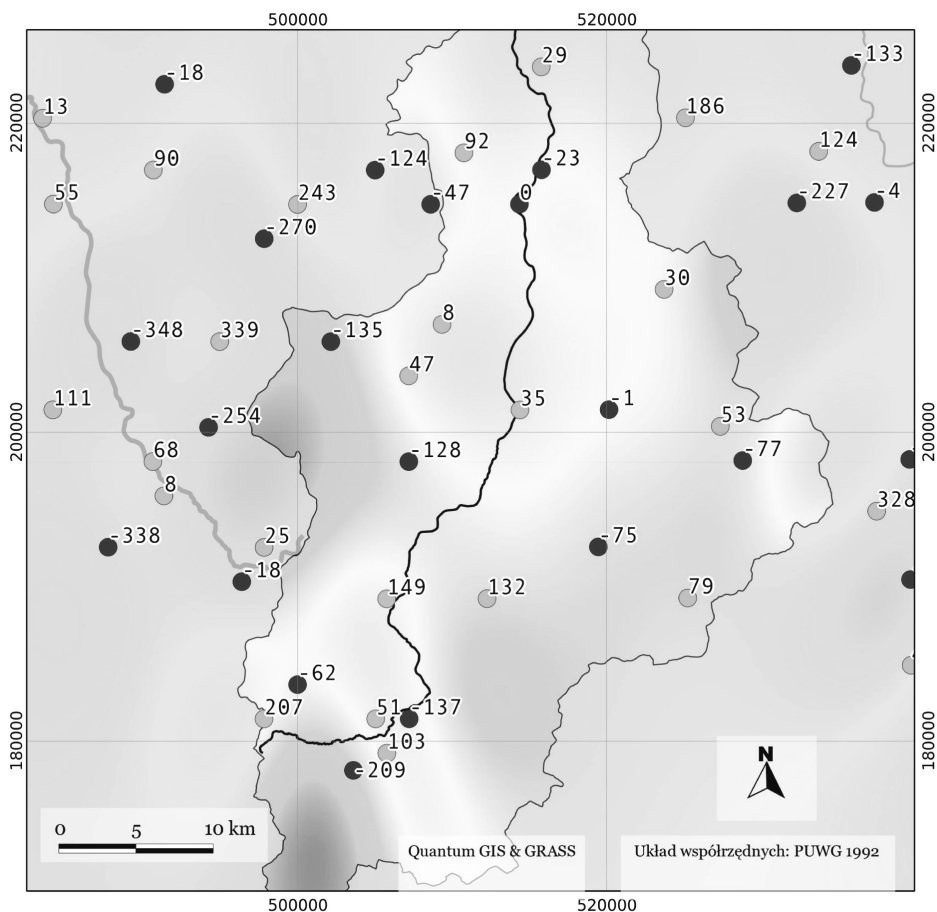
**Ryc. 5.** Rozkład średnich sum opadów rocznych w dorzeczu Soły obliczony metodą 2D RST

**Fig. 5.** Spatial distribution of average annual precipitation totals in Sola basin for 2D RST method

dorzecza, z wyjątkiem obszarów nadgranicznych. Jest to spowodowane brakiem informacji o opadach ze Słowacji.

W dorzeczu Soły w wyniku optymalizacji parametrów uzyskano najmniejszy średni błąd kwadratowy RMSE równy 98 mm. Jest to wynik porównywalny z wynikiem uzyskanym przez Hofierkę i in. (2002). Wartości błędów oszacowania rozkładu przestrzennego wysokości opadu, obliczone metodą wzajemnej weryfikacji na poszczególnych stacjach dorzecza Soły, nie przekroczyły 210 mm (ryc. 6).

Skrajne wartości błędów oszacowania wysokości opadów uzyskano na obszarach najwyżej położonych oraz na tych obszarach, gdzie na blisko położonych stacjach opady średnie znacząco się różniły.



**Ryc. 6.** Błędy oszacowania wysokości opadu (mm) uzyskane metodą wzajemnej weryfikacji

**Fig. 6.** Precipitation depth estimation errors (mm) for cross-validation verification method

## PODSUMOWANIE

Okres 1952–1981 można uznać za reprezentatywny do analizy średnich rocznych opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły.

Spśród 583 stacji opadowych wybrano 403 równomiernie rozmieszczone na obszarze całego dorzecza.

Zastosowana metoda 2D RST przestrzennej interpolacji opadów atmosferycznych została pozytywnie zweryfikowana. Uzyskany dla metody 2D RST średni błąd kwadratowy RMSE (98 mm) w dorzeczu Soły jest porównywalny z wynikami autorów metody uzyskanymi w przypadku opadów na Słowacji.



Dalsze prace będą zmierzały do uwzględnienia rzeźby terenu w modelowaniu pola opadów przy wykorzystaniu metody 3D RST.

## Literatura

- Cebulska M., Twardosz R., Cichocki J., 2007, *Zmiany rocznych sum opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły w latach 1881–2030*. [w:] K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych*, Inst. Geogr. i Gosp. Przest. UJ, Kraków, 383–390.
- Hellmann G., 1906, *Die Niederschläge in den Norddeutschen Stromgebieten*, Zweiter Band, Tabellen I. Berlin, Dietrich Reimer.
- Hofierka J., Parajka J., Mitasova H., Mitas L., 2002, *Multivariate Interpolation of Precipitation Using Regularized Spline with Tension*. Transactions in GIS, 6(2): 135–150.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*. Zakład Dynamiki Środowiska i Bioklimatologii UŁ, Łódź, 25–57.
- Lorenc H. (red.), 2005, *Atlas klimatu Polski*. IMGW, Warszawa.
- Mitasova H., Mitas L., 1993, *Interpolation by regularized spline with tension: I, Theory and implementation*. Mathematical Geology, 25, 641–655.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat*. [w:] I. Dynowska i M. Maciejowski (red.) *Dorzecze górnej Wisły*, Wyd. Nauk. PWN, 68–84.
- Niedźwiedz T., Twardosz R., 2004, *Long-term variability of precipitation at selected stations in Central Europe*. Global Change, IGBP, 11, 73–100.
- Ninyerola M., Pons X., Roure J.M., 2007, *Monthly precipitation mapping of the Iberian Peninsula using spatial interpolation tools implemented in a Geographic Information System*. Theor. Appl. Climatol., 89, 195–209.
- Roczniki Głównego Urzędu Statystycznego*, 1981–2009, Warszawa.
- Romer E., 1895, *Geograficzne rozmieszczenie opadów atmosferycznych w krajach karpackich*. Rozprawy Akademii Umiejętności, Wyd. Mat.-Przyr., 29, 266–282.
- Stachý J. (red.), 1987, *Atlas hydrologiczny Polski*. Wyd. Geol., Warszawa.
- Twardosz R., 2007, *Obserwacje opadów atmosferycznych w Galicji w latach 1792–1919*. [w:] M. Miętus, J. Filipiak, A. Wyszowski (red.), *200 lat regularnych pomiarów i obserwacji meteorologicznych w Gdańsku*. Monografie IMGW, Warszawa.
- Twardosz R., Cebulska M., 2010, *Observations and Measurements of Precipitation in the Polish Province of Galicia in the Nineteenth Century*. [w:] R. Przybylak i in. (red.), *The Polish Climate in the European Context: An Historical Overview*. Springer Science + Business Media B.V., 457–471.
- Wiszniewski W., 1953, *Atlas opadów atmosferycznych w Polsce, 1891–1930*. PIHM, Wyd. Kom., Warszawa.
- Wiszniewski W., 1973, *Atlas klimatyczny Polski*. IMGW, PPWK, Warszawa.