

## Zmiany rocznych sum opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły w latach 1881-2030

Changes of annual precipitation totals  
in the Upper Vistula River Basin, 1881-2030

Marta Cebulska<sup>1</sup>, Robert Twardosz<sup>2</sup>, Janusz Cichocki<sup>3</sup>

**Zarys treści:** W artykule przeanalizowano zmiany rocznych sum opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły na podstawie danych z 9 stacji opadowych w okresie 1881-2005. O zmienności opadów na tym urozmaiconym obszarze decydują głównie mezoskalowe procesy atmosferyczne. Opracowana prognoza zmian ilości opadów zakłada ich spadek do 2015 r., a następnie wzrost do około 2030 r.

**Słowa kluczowe:** sumy roczne opadów, trend, prognoza opadów, dorzecze górnej Wisły

**Key words:** annual precipitation totals, trend, precipitation projection, Upper Vistula River Basin

### Wprowadzenie

Na warunki opadowe w dorzeczu górnej Wisły wpływa, oprócz czynników cyrkulacyjnych, urozmaicona rzeźba terenu i wysokość nad poziomem morza (Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991). To powoduje, że w badaniach zmienności czasowej opadów w tym regionie konieczne jest uwzględnienie znacznej liczby 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. Regionalnym seriom czasowym przypisuje się duże znaczenie w badaniach zmienności klimatu (Jones, Hulme 1996). Duża zmienność przestrzenna opadów oraz wpływy innych czynników komplikują bowiem próby połączenia globalnego ocieplenia (IPCC 2001) z opadami. Prognozy opadów z modeli globalnej cyrkulacji atmosfery (GCM) są obciążone większym

<sup>1</sup> Wydział Inżynierii Środowiska, Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków, e-mail: marta.cebulska@iigw.pl

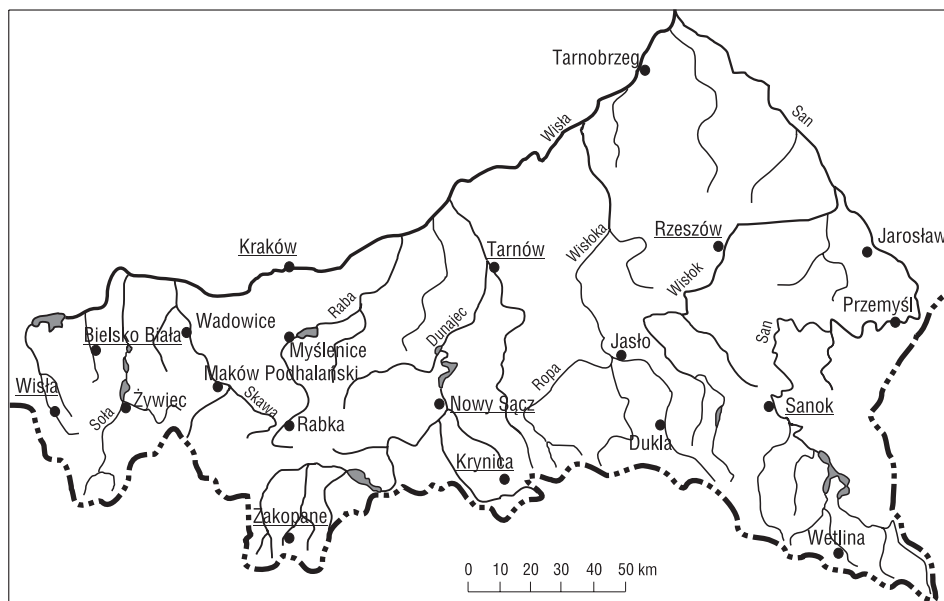
<sup>2</sup> Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej, Uniwersytet Jagielloński, e-mail: r.twardosz@uj.edu.pl

<sup>3</sup> Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej, Oddział w Krakowie, e-mail: Janusz.Cichocki@imgw.pl

błędem aniżeli prognozy temperatury powietrza, zwłaszcza w skali regionalnej (Bradley i in. 1987). Istotne jest zatem prowadzenie monitoringu zmian opadów we wczesnym etapie globalnego ocieplenia. Do realizacji takiego zadania konieczne staje się użycie wieloletnich serii chronologicznych. Uzyskane w ten sposób informacje mogą stać się podstawą formułowania dokładniejszych prognoz regionalnego zróżnicowania zmian klimatycznych.

Wyniki najnowszych badań wskazują, że w skali globalnej występuje tendencja rosnąca opadów (New i in. 2001), w Polsce natomiast obserwowanemu wzrostowi temperatury powietrza towarzyszyła tendencja spadkowa rocznych sum opadów w odniesieniu do obszaru nizinnego (Kozuchowski, Żmudzka 2003). Na podstawie modelu klimatycznego HadCM2 GS przewiduje się, że wraz z postępującym ociepleniem nastąpi wzrost opadów atmosferycznych w naszej strefie (Kozuchowski 2004). Autor ten jednak zastrzegł, że opracowany scenariusz odznacza się wielką niepewnością.

Celem pracy jest określenie zmian rocznych opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły na podstawie danych z 9 stacji opadowych (ryc. 1) w okresie 1881-2005 oraz próba podania prognozy opadów do 2030 r. Zmienność czasowa opadów w Polsce była przedmiotem wielu opracowań. Wykaz starszych prac wraz z obszernym ich omówieniem znajdujemy w publikacji K. Kozuchowskiego (1985). W nowszych opracowaniach tematykę zmienności opadów podjęli m.in. K. Kozuchowski i E. Żmudzka (2003),



Ryc. 1. Stacje opadowe w dorzeczu górnej Wisły z danymi dostępnymi od 1881 roku. Dane z podkreślonych stacji zostały wykorzystane w opracowaniu

Fig. 1. Precipitation stations in the Upper Vistula River Basin offering records since 1881. Records from the underlined stations have been used in this paper

J. Degirmendzić i in. (2004), K. Kozuchowski (2004), T. Niedźwiedz i R. Twardosz (2004) oraz Ch.D. Schönwiese i J. Rapp (1997) w odniesieniu do całej Europy.

## **Tworzenie bazy danych i testowanie jednorodności opadów**

Do realizacji celu konieczne było utworzenie obszernej i wiarygodnej bazy danych, obejmującej możliwie wszystkie długie serie opadów z dorzecza górnej Wisły, oraz sprawdzenie jakości danych i korekta ewentualnych błędów.

Najstarsze dane opadowe do 1890 r. z Europy Środkowej zostały opublikowane przez G. Hellmanna (1906) oraz w *Sprawozdaniach Komisji Fizjograficznej AU* i w *Materiałach do klimatografii Galicji*. Dane opadowe z lat 1895-1912 były publikowane w wydawnictwach austriackich *Jahrbuch Hydrographischen Zentralbureaus k.k. Ministerium für öffentliche Arbeiten*. Następnie korzystano z roczników Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego (obecnie IMGW), tj. hydrograficznych, meteorologicznych, opadowych oraz materiałów do bilansu wodnego Polski. Dane z niektórych stacji z okresu współczesnego, po 1982 r., uzyskano z materiałów Głównego Urzędu Statystycznego oraz bezpośrednio z Oddziału IMGW w Krakowie.

Na podstawie tak wielu materiałów autorzy utworzyli bazę danych sum opadów rocznych z 8 stacji w dorzeczu górnej Wisły z lat 1881-2005 (ryc. 1), a z dalszych 10 stacji do 1982 r. Dane z Krakowa dostępne od 1812 r. zostały zestawione i zweryfikowane przez R. Twardosza (1999).

W dalszej kolejności ciągi rocznych sum opadów poddano analizie jednorodności statystycznej. Do tego celu wykorzystano parametryczny test Bartletta, oparty na analizie wariancji wielu próbek. Zastosowanie tego testu wymaga określenia ewentualnych punktów zerwania jednorodności badanego ciągu, jak również badana seria pomiarowa powinna podlegać rozkładowi normalnemu. To drugie założenie oparto m.in. na wcześniejszych badaniach K. Kozuchowskiego (1985), który stwierdził, że roczne sumy opadów w Polsce mają rozkład zbliżony do normalnego. Wyniki przeprowadzonej analizy jednorodności wykazały, że wszystkie ciągi opadów można uznać za jednorodne na przyjętym poziomie istotności  $p=5\%$ .

## **Wyniki analizy sum rocznych opadów w latach 1881-2005**

Przebieg sum rocznych opadów atmosferycznych poddany został analizie pod kątem występowania możliwych trendów liniowych. Do oszacowania istotności statystycznej wartości trendu zastosowano test t studenta (Domański 1990, Pruchnicki 1987). Uzyskane wyniki wskazują (tab. 1), że na poszczególnych stacjach występują różne znaki trendów zmian opadów, które są najczęściej słabe i nieistotne statystycznie. Przyczyny tego należy upatrywać w dużej zmienności sum opadów na obszarze dorzecza górnej Wisły (tab. 1) w porównaniu do części nizinnej kraju (współczynnik zmienności równy 11%; Kozuchowski 2004). Oznacza to, że tylko duże zmiany w wysokości opadów mogą wykazywać istotność statystyczną. Na znak i wielkość trendu duży wpływ wywiera długość analizowanej serii oraz to, że opady wykazują przejawy zmian cyklicznych (m.in.

Tab. 1. Charakterystyki statystyczne rocznych opadów wraz z wartością trendu (1881-2005)

Table 1. Statistical characteristics of annual precipitation totals with trend value (1881-2005)

Stacja Station	Średnia (mm) Average (mm)	Współczynnik zmienności (%) Variability coefficient (%)	Trend (mm/100 lat) Trend (mm/100 year)
Wisła	1176 ± 15	14,9	17,85
Bielsko-Biała	988 ± 14	16,4	-2,95
Zakopane	1127 ± 16	15,9	-7,02
Nowy Sącz	718 ± 10	15,7	6,40
Krynica	855 ± 12	15,9	25,20
Tarnów	701 ± 12	19,0	33,88
Sanok	779 ± 13	19,4	-1,15
Rzeszów	639 ± 10	18,6	-8,87
Kraków	679 ± 9	15,6	-26,47

Do wilgotnych lat zaliczyć można także przełom XIX i XX w. Na całym obszarze górnej Wisły występował wzrost opadów w ostatniej pentadzie XX w., a we wschodniej jego części – reprezentowanej przez Rzeszów i Sanok – wzrost ten zaznaczył się już od połowy lat 80. XX w., co dobrze koresponduje m.in. z charakterem zmian opadów we Lwowie (Niedźwiedz, Twardosz 2004). Z kolei przebieg opadów w pierwszej pentadzie XXI stulecia może wskazywać na zmianę tendencji opadów w najbliższych latach w kierunku spadku. W przebiegu sinusoidalnym uśrednionych wartości pojawia się powtarzalność wartości maksymalnych na niektórych stacjach (Bielsko-Biała, Kraków, Tarnów) około 30 lat (koniec lat 1930. i 1960.), co prawdopodobnie związane jest z okresowo zmienną aktywnością Słońca.

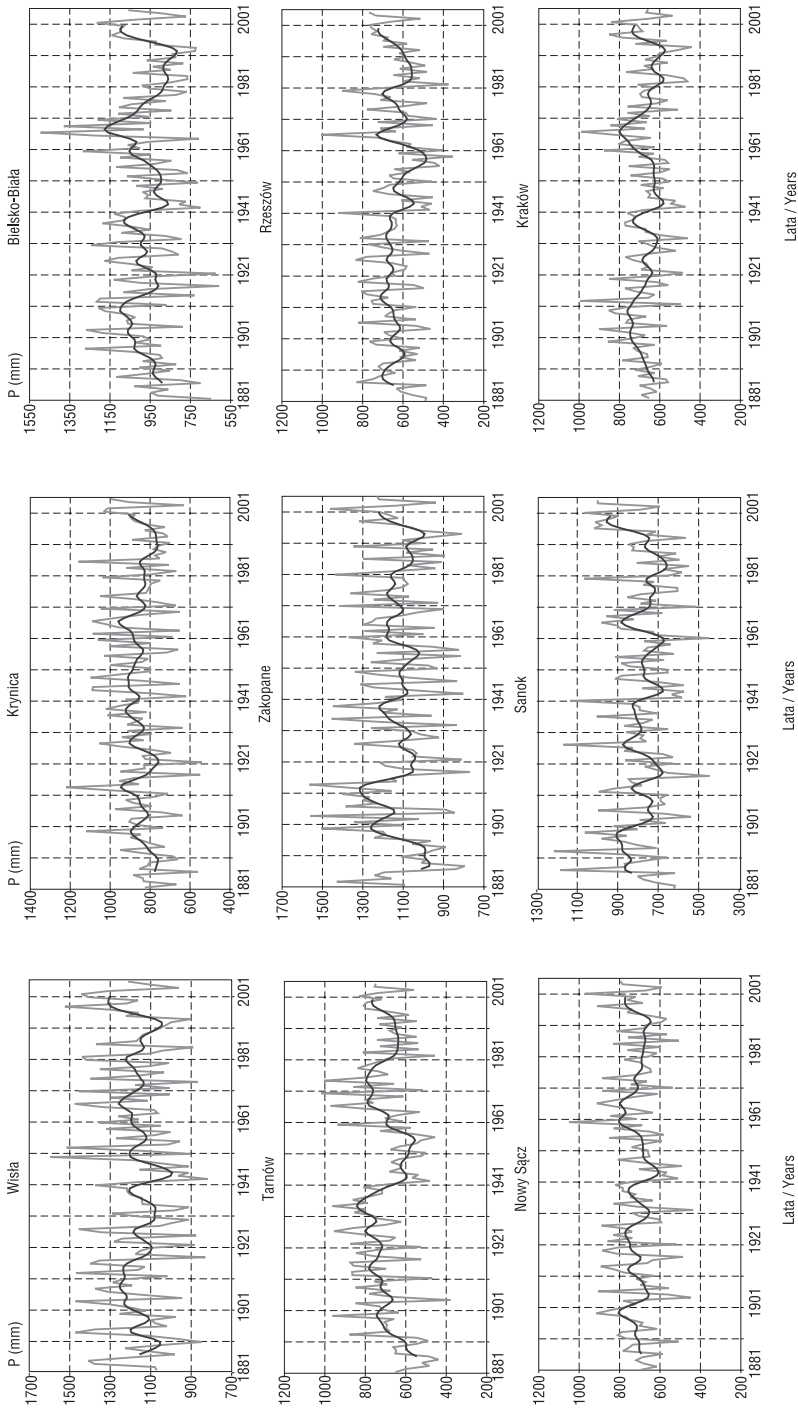
Sumy roczne opadów na poszczególnych stacjach skorelowano między sobą, co pozwoliło na określenie stopnia współzależności opadów na obszarze dorzecza górnej Wisły. W większości przypadków wartości współczynnika korelacji mieszczą się w przedziale od 0,5 do 0,7, co wskazuje na stosunkowo dobrą korelację w przebiegu opadów tego tak zmiennego elementu klimatu (tab. 2). Mocny związek korelacyjny (współczynnik korelacji od 0,7 do 0,9; za A. Byczkowskim 1996) występuje pomiędzy ciągami opadów w Krakowie i Bielsku-Białej oraz Rzeszowie i Sanoku. Niektóre wartości współczynników korelacji są mniejsze od 0,5 (np. Bielsko-Biała i Rzeszów), co wskazuje na słabszą współzależność korelowanych opadów. Dotyczy to serii stacji pomiarowych zlokalizowanych w dużej odległości od siebie i w zróżnicowanych warunkach fizycznogeograficznych.

## Próba określenia prognozy zmian opadów do 2030 roku

Podstawą wyznaczenia prognozy zmian opadów do 2030 r. była seria opadów z Krakowa, która ma najdłuższy jednorodny ciąg chronologiczny, dostępny od 1812 r.

Koźuchowski 1985; Twardosz, Cebulka 2005). Jak słusznie zauważył K. Koźuchowski (2004), w przypadku opadów mamy do czynienia raczej z nieregularnymi fluktuacjami i przemieszczaniem się nadmiarów i niedoborów opadów aniżeli z trwałym ich trendem.

Analiza wieloletniego przebiegu opadów na poszczególnych stacjach wygładzonego 11-letnim filtrem Gaussa (Schönwiese 1992) wykazała, że na wszystkich stacjach wystąpiły bardzo wysokie opady w latach 60. oraz początku lat 70. XX w. (ryc. 2). Fakt ten należy wiązać z maksimum aktywności cyklonalnych typów cyrkulacji atmosferycznej nad południową Polską w tym okresie (Niedźwiedz, Twardosz 2004).



Ryc. 2. Roczne sumy opadów w latach 1881-2005 (linia szara; linią pogrubioną zaznaczono wartości usrednione 11-letnim filtrem Gaussa)  
 Fig. 2. Annual precipitation totals over the 1881-2005 period (grey line; thick-line curve smoothed by 11-year Gauss pass-filter)

Tab. 2. Współczynniki korelacji między sumami rocznych opadów (1881-2005) na poszczególnych stacjach (istotne na poziomie  $p=0,05$ )Table 2. Correlation coefficients between annual precipitation totals (1881-2005) at individual stations (significant at  $p=0.05$ )

Stacja Station	Wisła	Bielsko-Biała	Zakopane	Nowy Sącz	Krynica	Tarnów	Sanok	Rzeszów	Kraków
Wisła	-	0,69	0,65	0,55	0,62	0,47	0,56	0,48	0,66
Bielsko-Biała	0,69	-	0,59	0,61	0,53	0,60	0,44	0,45	0,79
Zakopane	0,65	0,59	-	0,70	0,69	0,56	0,55	0,59	0,59
Nowy Sącz	0,55	0,61	0,70	-	0,71	0,59	0,56	0,61	0,60
Krynica	0,62	0,53	0,69	0,71	-	0,52	0,59	0,60	0,43
Tarnów	0,47	0,60	0,56	0,59	0,52	-	0,63	0,54	0,59
Sanok	0,56	0,44	0,55	0,56	0,59	0,63	-	0,66	0,52
Rzeszów	0,48	0,45	0,59	0,61	0,60	0,54	0,66	-	0,49
Kraków	0,66	0,79	0,59	0,60	0,43	0,59	0,52	0,49	-

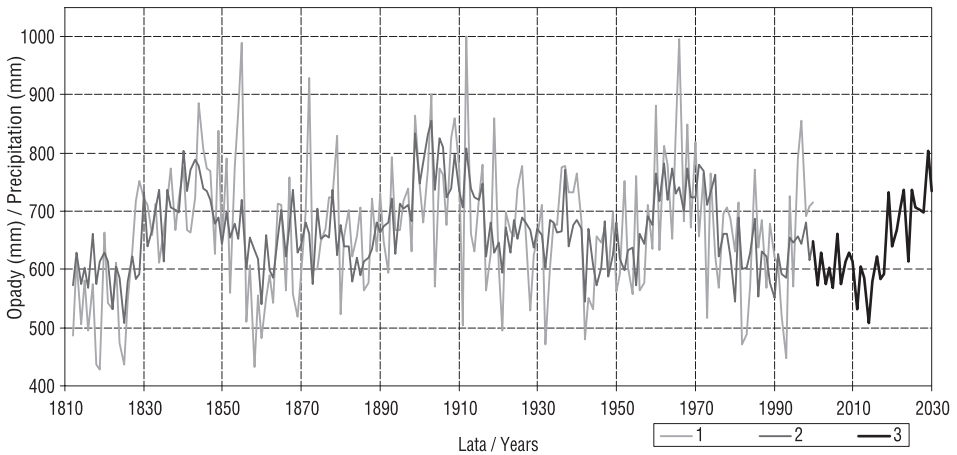
W dodatku przebieg opadów w Krakowie dobrze koreluje z przebiegiem opadów na innych stacjach w dorzeczu górnej Wisły (tab. 2).

Roczne sumy opadów z lat 1812-2000 poddano analizie harmoniczej, która polega na wykorzystaniu wielomianu trygonometrycznego Fouriera do opisu szeregu czasowego wykazującego zmienność okresową. Pozwala ona uzyskać składowe harmoniczne, w odniesieniu do których możliwe jest określenie amplitudy, przesunięcia fazowego oraz cyklu. Metodę tę autorzy opisali we wcześniejszych pracach (Cebulka 2002; Twardosz, Cebulka 2005), w której dokonali weryfikacji zgodności wartości opadów w latach 1981-2000 uzyskanych jako interferencja cykli istotnych statystycznie (na przyjętym poziomie 10%) na podstawie metody Fouriera z wartościami obserwowanymi opadów.

Na rycinie 3 przedstawiono rozkład opadów w latach 1812-2000, a także wartości opadów wyznaczonych na podstawie harmonik istotnych statystycznie na poziomie 0,05 oraz prognozę opadów do 2030 r. obliczoną jako interferencja cykli istotnych statystycznie. Od 2001 r. rysuje się trend malejący wielkości opadów, co potwierdza podobny trend wartości prognozowanych, który może utrzymywać się do 2015 r. W świetle przyjętej metody wynika, że w latach 2016-2030 można oczekiwać tendencji wzrostowej ilości opadów.

## Podsumowanie i wnioski

Opady w dorzeczu górnej Wisły są istotnie skorelowane między poszczególnymi stacjami. W wielu przypadkach związki te są mocne. Oznacza to dominującą rolę mezoskalowych procesów atmosferycznych w kształtowaniu opadów atmosferycznych na tym urozmaiconym obszarze Polski Południowej.



Ryc. 3. Roczne sumy opadów w latach 1812-2000 wraz z prognozą opadów na lata 2001-2030 w Krakowie (1 – opady zmierzone, 2 – interferencja istotnych statystycznie cykli, 3 – prognoza opadów)

Fig. 3. Annual precipitation totals during 1812-2000 and precipitation projection for 2001-2030 in Cracow (1 – observed precipitation, 2 – interference of statistically significant cycles, 3 – precipitation projection)

Roczne opady w dorzeczu górnej Wisły w latach 1881-2005 nie wykazały istotnych zmian. Opracowana prognoza zmian ilości opadów w Krakowie w świetle analizy harmonicznej zakłada ich spadek do 2015 r., a następnie wzrost do około 2030 r.

## Podziękowania

Autorzy serdecznie dziękują Pani dr D. Limanówce z IMGW za udostępnienie serii danych opadowych po 1982 r. z niektórych stacji.

## Literatura

- Bradley R., Diaz H., Eischeid J., Jones P., Kelly P., Goodess C., 1987, *Precipitation fluctuations over northern hemisphere land areas since the mid-19th century*, Science, 273, 171-175.
- Byczkowski A., 1996, *Hydrologia t.1*, Wyd. SGGW, Warszawa.
- Cebulska M., 2002, *Wykorzystanie analizy harmonicznej do badania okresowości rzeczywistych ciągów opadowych w wybranych stacjach dorzecza górnej Wisły*, Czas. Tech., PK 2-Ś/2002 (ROK 99), 175-190.
- Degirmendźić J., Kożuchowski K., Żmudzka E., 2004, *Changes of Air Temperature and Precipitation in Poland in the Period 1951-2000 and their Relationship to Atmospheric Circulation*, Int. J. Climatol., 24, 3, 291-310.
- Domański C., 1990, *Testy statystyczne*, PWE, Warszawa.
- Hellmann G., 1906, *Die Niederschläge in den Norddeutschen Stromgebieten*, Zweiter Band, Tabellen I, Berlin, Dietrich Reimer.

- IPCC, 2001, *Climate Change 2001: The Scientific Basis*, Cambridge Univ. Press.
- Jones P.D., Hulme M., 1996, *Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations*, Int. J. Climatol., 16, 361-377.
- Kożuchowski K., 1985, *Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w stuleciu 1881-1980*, Acta Geogr. Lodz., 48, 1-158.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Łódź.
- Kożuchowski K., Żmudzka E., 2003, *100-year series of areally averaged temperatures and precipitation totals in Poland*, Acta Univ. Wratislaviensis, 2542, Studia Geogr., 75, 116-122.
- New M., Todd M., Hulme M., Jones P., 2001, *Precipitation measurement and trends in the twentieth century*, Int. J. Climatol., 21, 1899-1922.
- Niedźwiedź T., Twardosz R., 2004, *Long-term variability of precipitation at selected stations in Central Europe*, Global Change, IGBP, 11, 73-100.
- Niedźwiedź T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat*, [w:] *Dorzecze górnej Wisły*, I. Dynowska, M. Maciejowski (red.), PWN, 68-84.
- Pruchnicki J., 1987, *Metody opracowań klimatologicznych*, PWN, Warszawa.
- Schönwiese C.D., Rapp J., 1997, *Climate trend atlas of Europe based on observations 1891-1990*, Kluwer Academic Publishers, Netherlands.
- Schönwiese Ch.D., 1992, *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Gebrüder Borntraeger, Berlin-Stuttgart.
- Twardosz R., 1999, *Warunki pluwialne w Krakowie w latach 1792-1998*, Czas. Geogr., 70, 2, 221-234.
- Twardosz R., Cebulka M., 2005, *Periodical changes of precipitation and the number of precipitation days in Cracow*, Prace Geogr., 115, Inst. Geogr. i Gosp. Przestrz. UJ, 49-56

## Summary

The paper identifies the development of annual precipitation in the Upper Vistula River Basin during 1881-2005 and attempts to project future trends until 2030. A reliable database of annual precipitation records from nine stations was built using a number of previously unpublished source materials. A proposed hypothesis of a statistical uniformity of the precipitation records was tested with Bartlett's parametric test. It was found that:

- the precipitation records display statistical significant correlation between individual stations in the Upper Vistula River Basin. Many of those relationships are strong (Table 2). This means that mesoscale atmospheric processes play a dominant role in the overall development of atmospheric precipitation across this varied area of southern Poland;
- during 1881-2005, annual precipitation showed no significant change in the Upper Vistula River Basin (Table 1). A precipitation projection proposed for the area of Cracow, involving harmonic analysis, shows an initial downward trend until 2015, which is then reversed until ca. 2030 (Fig. 3).