

**ZMIENNOŚĆ CZASOWA
NAJWYŻSZYCH MIESIĘCZNYCH
SUM OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH
W POLSKICH KARPATACH ZACHODNICH
(1951–2005)**

Marta Cebulska, Robert Twardosz

**Temporal variability of maximum monthly precipitation totals
in the Polish Western Carpathian Mts
during the period 1951–2005**

Abstract: The authors have investigated long-term and annual patterns in maximum monthly precipitation totals in the Western Carpathian Mts. in Poland. Data from six stations (Nowy Sącz, Sanok, Bielsko-Biała, Maków Podhalański, Krynica and Zakopane) spanning the period 1951–2005 were used both in their raw form and as derived probabilities. The study showed that the highest monthly precipitation totals were likely to occur throughout the year, but most frequent were in the summer months. No long-term statistically significant trends were identified, just shorter-term fluctuations. All of the stations recorded high precipitation totals in last years of the 20th c. and in 2001 too, while lower totals were recorded in the mid-1990s. During the first five years of the 21st c., the trend to a decrease was found at most of the stations. At some of them peak monthly totals exceeded the monthly average figures by more than 350%. For precipitation totals with a 1% probability of exceedance, the highest totals were obtained from Gumbel distribution and the lowest from the normal distribution at all of the stations. In high probability ranges (e.g. $p = 20\%$) the highest precipitation was derived from Weibull distribution. The highest maximum monthly totals recorded during the period 1995–2005 corresponded approximately to a 1% probability of exceedance. The only exception was the station at Maków Podhalański, where the highest monthly precipitation of 521.1 mm was at 88.1 mm higher than the figure derived from the theoretical distribution with $p = 1\%$.

Keywords: monthly precipitation, trend, quantyl of precipitation, Polish Western Carpathian Mts

**ZMIENNOŚĆ CZASOWA
NAJWYŻSZYCH MIESIĘCZNYCH
SUM OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH
W POLSKICH KARPATACH ZACHODNICH
(1951–2005)**

Marta Cebulska, Robert Twardosz

**Temporal variability of maximum monthly precipitation totals
in the Polish Western Carpathian Mts
during the period 1951–2005**

Abstract: The authors have investigated long-term and annual patterns in maximum monthly precipitation totals in the Western Carpathian Mts. in Poland. Data from six stations (Nowy Sącz, Sanok, Bielsko-Biała, Maków Podhalański, Krynica and Zakopane) spanning the period 1951–2005 were used both in their raw form and as derived probabilities. The study showed that the highest monthly precipitation totals were likely to occur throughout the year, but most frequent were in the summer months. No long-term statistically significant trends were identified, just shorter-term fluctuations. All of the stations recorded high precipitation totals in last years of the 20th c. and in 2001 too, while lower totals were recorded in the mid-1990s. During the first five years of the 21st c., the trend to a decrease was found at most of the stations. At some of them peak monthly totals exceeded the monthly average figures by more than 350%. For precipitation totals with a 1% probability of exceedance, the highest totals were obtained from Gumbel distribution and the lowest from the normal distribution at all of the stations. In high probability ranges (e.g. $p = 20\%$) the highest precipitation was derived from Weibull distribution. The highest maximum monthly totals recorded during the period 1995–2005 corresponded approximately to a 1% probability of exceedance. The only exception was the station at Maków Podhalański, where the highest monthly precipitation of 521.1 mm was at 88.1 mm higher than the figure derived from the theoretical distribution with $p = 1\%$.

Keywords: monthly precipitation, trend, quantyl of precipitation, Polish Western Carpathian Mts

Zarys treści: W artykule zbadano wieloletni i roczny przebieg najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych w Polskich Karpatach Zachodnich na podstawie danych z 6 stacji: Nowy Sącz, Sanok, Bielsko-Biała, Maków Podhalański, Krynica i Zakopane z lat 1951–2005 oraz wyznaczono ich wartości prawdopodobne. Wykazano, że najwyższe miesięczne sumy opadów mogą występować w ciągu całego roku, z największą częstością w miesiącach letnich. Nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów zmian wieloletnich, a jedynie krótkookresowe fluktuacje.

Słowa kluczowe: sumy miesięczne opadów, trend, kwantyle opadów, polskie Karpaty Zachodnie

Wprowadzenie

Na opady atmosferyczne w Polskich Karpatach Zachodnich wpływa, oprócz czynników geograficznych, głównie cyrkulacja atmosferyczna (Niedźwiedź, Obrębska-Starkłowa 1991). Z badań T. Niedźwiedzia i R. Twardosza (2004) wynika, że zmienność opadów w niektórych miesiącach w ponad 60% można wytłumaczyć zmiennością wskaźnika cykloniczności. Synoptyczne uwarunkowania silnych opadów występujących w tej części Polski są dobrze rozpoznane i udokumentowane w literaturze (m.in. Cebulak 1998; Niedźwiedź, Czekerda 1998). Wysokie sumy miesięczne opadów mogą być wynikiem występowania:

- opadów ulewnych o zasięgu lokalnym, powstających w wyniku konwekcji termicznej w jednorodnych masach powietrznych lub konwekcji dynamicznej w strefie frontów atmosferycznych, głównie chłodnego,
- jednostajnych kilkudniowych opadów w strefie płytkich niżów stacjonarnych. Zarówno krótkotrwałe, jak i długotrwałe opady mogą być przyczyną m.in. wezbrań rzek i potoków w dorzeczu górnej Wisły.

Ostatnie badania opadów w dorzeczu górnej Wisły wskazują na różne znaki trendów zmian wieloletnich opadów rocznych i półroczna ciepłego, które to trendy są najczęściej słabe i nieistotne statystycznie (Cebulska i in. 2007; Ustrnul i in. 2009). Chociaż trendy wzrostowe opadów zaznaczają się w Europie Północnej, a spadkowe w Południowej, to jednak brak jednoznacznie określonych trendów jest cechą zmienności opadów na wielu obszarach Ziemi (IPCC 2007).

Celem tej pracy jest określenie zmian czasowych, tj. przebiegu wieloletniego i rocznego najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych (P_{\max}) w Polskich Karpatach Zachodnich na podstawie danych z 6 stacji pomiarowych w latach 1951–2005, oraz wyznaczenie ich wartości prawdopodobnych. Jak wynika z badań innych autorów, zmianom mogą podlegać nie tylko średnie wartości opadów, lecz także ekstremalne (np. Schönwiese i in. 2003; Trömel, Schönwiese 2007).

Opracowanie najwyższych sum miesięcznych w roku nie jest jednoznaczne z opracowaniem bezwzględnie największych miesięcznych sum opadów. Najwyższa suma w danym miesiącu w rozpatrywanym wieloleciu wcale nie musi być najwyższa w danym roku; może się także zdarzyć, że suma najwyższa w danym roku suchym może być niższa od drugiej lub trzeciej pod względem wielkości w wilgotnym roku.

Tab. 1. Położenie stacji meteorologicznych
Table 1. Location of meteorological stations

Stacja Stadion	H (n.p.m.) Alt. (a.s.l.)	Współrzędne geograficzne / Geographical coordinates	
		φ	λ
Nowy Sącz	292	49° 37'	20° 42'
Sanok	314	49° 34'	22° 12'
Bielsko-Biała	322	49° 49'	19° 04'
Maków Podhalański	350	49° 44'	19° 40'
Krynica	613	49° 26'	20° 58'
Zakopane	844	49° 18'	19° 57'

Dane i metody

W pracy wykorzystano miesięczne sumy opadów atmosferycznych z 6 stacji położonych w Polskich Karpatach Zachodnich: Nowego Sącza, Sanoka, Bielska-Białej, Makowa Podhalańskiego, Krynicy i Zakopanego z lat 1951–2005 (tab. 1). Dane z lat 1951–1982 zgromadzono na podstawie roczników hydrograficznych, meteorologicznych i opadowych oraz materiałów do bilansu wodnego Polski publikowanych przez PIHM (obecnie IMGW). Dane z niektórych stacji po 1982 roku uzyskano z Głównego Urzędu Statystycznego oraz bezpośrednio z Oddziału IMGW w Krakowie dzięki uprzejmości dr Danuty Limanówki.

Z uwagi na zmianę lokalizacji niektórych stacji meteorologicznych zgromadzone ciągi opadów sprawdzono pod kątem ich jednorodności. Do sprawdzenia hipotezy o jednorodności statystycznej miesięcznych sum opadów zastosowano nieparametryczny test sumy rang. Weryfikacja jednorodności opadów miesięcznych za pomocą tego testu statystycznego wykazała, że wszystkie serie można uznać za jednorodne na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Ze zgromadzonej bazy danych opadów z każdej stacji wybrano najwyższą sumę miesięczną opadów – P_{\max} w każdym roku okresu 1951–2005. Określono częstość wystąpienia opadów w przebiegu rocznym. Następnie zbadano trendy zmian wieloletnich na podstawie analizy regresji liniowej. Ponadto wyznaczono wielkości kwantyli najwyższych miesięcznych sum opadów na podstawie kilku rozkładów teoretycznych: normalnego, logarytmiczno-normalnego, Gumbela, Weibulla oraz gamma.

Przebieg roczny i wieloletni najwyższych miesięcznych sum opadów

Na podstawie ciągów miesięcznych sum opadów atmosferycznych z poszczególnych stacji z lat 1951–2005 wyznaczono wartości średnie wieloletnie, a także wyodrębniono najwyższe sumy miesięczne opadów w rozpatrywanym wieloleciu (tab. 2). Wśród wskazanych najwyższych sum wyróżniono takie, które były jednocześnie

Tab. 2. Charakterystyki statystyczne sum miesięcznych opadów (1951–2005)

Table 2. Statistical characteristics of monthly precipitation totals (1951–2005)

Stacja Station		Miesiące / Months											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Nowy Sącz	1	34,3	31,7	35,7	52,9	80,3	109,4	115,2	90,2	57,8	41,5	38,9	39,0
	2	95,0	92,7	87,1	136,0	153,4	218,0	317,0	195,0	127,8	125,0	98,0	88,8
	3	277	293	244	257	191	199	275	216	221	301	252	228
	4	1976	1952	2000	1967	1987	1973	2001	1964	1996	1974	1962	1982
Sanok	1	36,7	32,9	37,6	52,9	87,4	102,4	113,7	89,2	77,6	51,8	44,2	46,3
	2	157,0	85,6	95,0	121,0	245,8	215,0	332,0	208,0	276,3	162,0	108,0	113,1
	3	428	260	253	229	281	210	292	233	356	313	244	245
	4	1954	2004	1964	1989	1996	1973	1980	1964	1996	1980	1964	1982
Bielsko- -Biała	1	44,6	45,4	51,3	73,0	109,6	141,2	146,5	117,6	87,1	60,3	59,8	55,2
	2	91,1	149,0	129,0	165,0	246,3	350,0	388,0	357,5	245,0	168,5	130,3	210,0
	3	204	328	252	226	225	248	265	304	281	280	218	381
	4	2005	1977	2000	1994	1951	1968	1960	1972	1963	1974	1952	1952
Maków Podhalański	1	48,9	45,6	48,0	73,1	101,8	133,9	145,1	113,9	77,2	56,8	53,1	49,4
	2	117,0	137,1	124,8	175,0	192,0	271,0	521,1	371,0	279,5	179,0	129,2	102,5
	3	239	301	260	239	189	202	359	326	362	315	243	207
	4	1976	1952	2000	1955	1951	1998	2001	1972	1996	1963	1952	2005
Krynica	1	48,8	44,4	46,0	61,6	95,1	119,6	117,2	96,7	68,4	53,9	51,1	56,3
	2	168,0	124,1	117,4	125,1	190,3	262,0	262,6	238,7	146,3	178,0	128,0	120,0
	3	344	279	255	203	200	219	224	247	214	330	250	213
	4	1976	1952	2000	1990	1989	1962	2001	1985	1996	1980	1964	1954
Zakopane	1	46,4	45,6	55,3	83,6	122,7	170,5	179,6	138,7	95,0	68,7	61,2	53,5
	2	127,4	137,0	138,7	166,6	240,4	325,0	439,2	322,9	246,9	228,4	185,4	110,9
	3	274	300	251	199	196	191	245	233	260	332	303	207
	4	1976	1952	2000	1998	1987	1973	2001	1972	1996	1980	1962	1982

Objaśnienia: 1 – suma średnia (mm), 2 – suma najwyższa (mm), 3 – suma najwyższa (w % średniej), 4 – rok wystąpienia sumy najwyższej. Pogrubieniem wyróżniono sumę najwyższą w 55-leciu, która była też sumą najwyższą w roku

Explanations: 1 – average total (mm), 2 – highest total (mm), 3 – highest total (in % of average), 4 – year of occurrence of the highest total. The highest total in 1951–2005, which was also the highest total in the year, is indicated in bold

Tab. 3. Charakterystyki statystyczne najwyższych sum miesięcznych opadów – P_{\max} i wartość trendu (1951–2005)Table 3. Statistical characteristics of the highest monthly precipitation totals – P_{\max} with trend value (1951–2005)

Stacja Station	Średnia (mm) Average (mm)	Najwyższa (mm) The highest (mm)	Najniższa (mm) The lowest (mm)	Współczynnik zmienności (%) Variability coeff. (%)	Trend (mm/10 lat) Trend (mm/10 year)
Nowy Sącz	150,4	317,0	85,0	33	0,91
Sanok	156,5	332,0	94,0	31	7,03
Bielsko-Biała	203,1	388,0	90,1	37	-5,92
Maków Podhalański	198,0	521,1	111,1	38	3,87
Krynica	162,7	262,6	87,0	28	1,96
Zakopane	233,4	439,2	118,9	31	4,44

najwyższymi wartościami w ciągu roku. Wartości te występują głównie w miesiącach letnich, chociaż sporadycznie pojawiają też się w miesiącach zimowych.

Najwyższe średnie wieloletnie miesięczne sumy opadów atmosferycznych na rozpatrywanych stacjach w Polskich Karpatach Zachodnich wahają się od 113,7 mm w Nowym Sączu do 179,6 mm w Zakopanem. Wartości najwyższe zmieniają się od 317,0 mm w Nowym Sączu do 521,1 mm w Makowie Podhalańskim; wartości takie wystąpiły w lipcu 2001 roku (tab. 3). Wymienione sumy najwyższe wyniosły odpowiednio 275 i 359% średniej miesięcznej sumy (tab. 2). Z zestawienia E. Cebulak (1998) wynika, że najwyższy miesięczny opad w Karpatach Polskich w XX wieku osiągnął 684 mm na Hali Gąsienicowej w lipcu 1934 roku. Wartości współczynnika zmienności nie wskazują na istotne zróżnicowanie dyspersji opadów na poszczególnych stacjach (tab. 3).

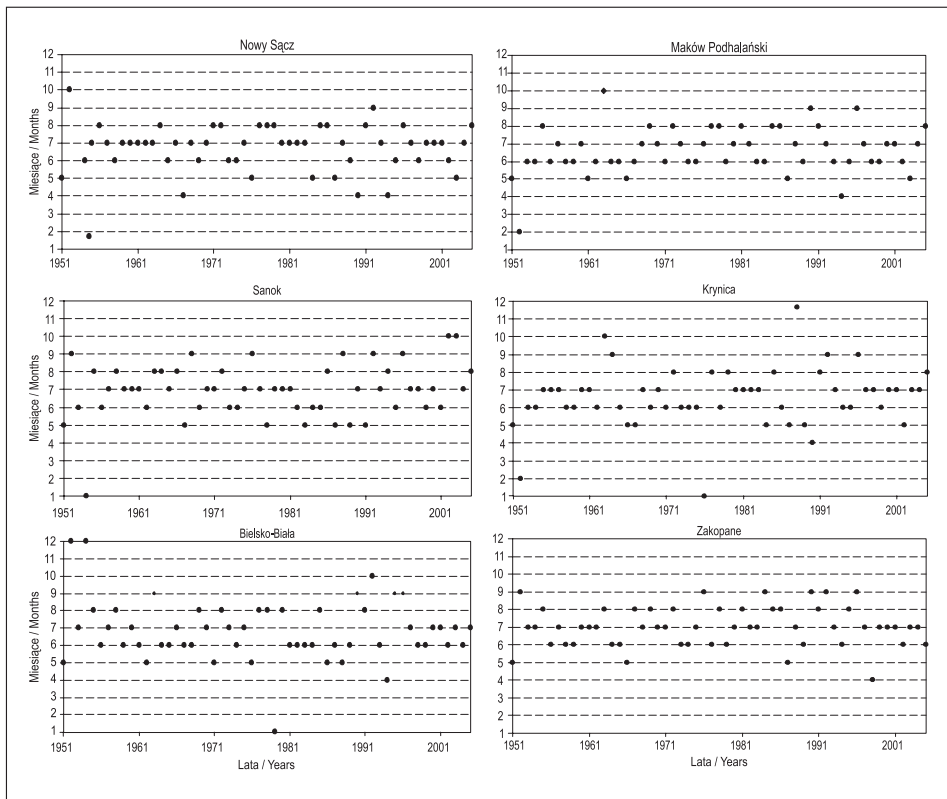
Wielkość najwyższych miesięcznych opadów (podobnie jak sum opadów rocznych i miesięcznych) zależy od wysokości nad poziomem morza, długości geograficznej (spadek wielkości opadów z zachodu na wschód) oraz formy terenu (niższe są opady w formach wklęsłych).

W 4 latach okresu 1951–2005 najwyższe sumy miesięczne opadów pojawiły się synchronicznie na wszystkich rozpatrywanych stacjach: w lipcu 1960, 1970 i 1997 oraz w sierpniu 1972 roku (ryc. 1). W tych miesiącach wystąpiły powodzie w dorzeczu górnej Wisły. Wezbrania zdarzyły się także w czerwcu 1958 roku oraz w lipcu 2001 roku, a były wynikiem dużych opadów, zwłaszcza w zachodniej części Polskich Karpat.

W przebiegu rocznym najwyższe miesięczne sumy opadów atmosferycznych na wszystkich stacjach występowały od maja do września, a w szczególności w miesiącach letnich, tj. w czerwcu, lipcu i sierpniu (ryc. 2). W Bielsku-Białej i Makowie Podhalańskim najwyższe sumy miesięczne opadów pojawiały się najczęściej w czerwcu – 19 i 21 razy, co odpowiada częstości 34 i 38%. W pozostałych stacjach opady takie występowały częściej w lipcu, z częstością 39% w Nowym Sączu, 38% w Zakopanem oraz po 31% w Krynicy i Sanoku. Najwyższych sum miesięcznych opadów nie stwierdzono w marcu i listopadzie. W pozostałych miesiącach pojawiały się one sporadycznie (do 3 zdarzeń w kwietniu w Nowym Sączu).

Przebieg najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych na poszczególnych stacjach został poddany analizie pod kątem występowania możliwych trendów liniowych. Do oszacowania istotności statystycznej wartości trendu zastosowano test *t*-Studenta (Domański 1990; Pruchnicki 1987). Uzyskane wartości trendu opadów (tab. 3) na poszczególnych stacjach są różnych znaków i wartości, jednak na przyjętym poziomie istotności (0,05) są nieistotne statystycznie. Trend istotny statystycznie na poziomie $\alpha = 0,10$ dostrzeżono jedynie w Sanoku. W przypadku opadów atmosferycznych braku istotnych trendów należy upatrywać w ich zróżnicowaniu z roku na rok, co oznacza, że tylko duże zmiany w wysokości opadów mogą wykazywać istotność statystyczną. W przebiegu najwyższych sum miesięcznych opadów występują nieregularne fluktuacje, naprzemienne pojawianie się nadmiarów i niedoborów opadów, nie ma zaś trwałego trendu (ryc. 3).

Analiza wieloletniego przebiegu najwyższych miesięcznych opadów na poszczególnych stacjach wygładzonego 3-letnim filtrem Gaussa (Schönwiese 2000) wykazała, że na wszystkich stacjach wystąpiły wysokie opady u schyłku XX wieku oraz

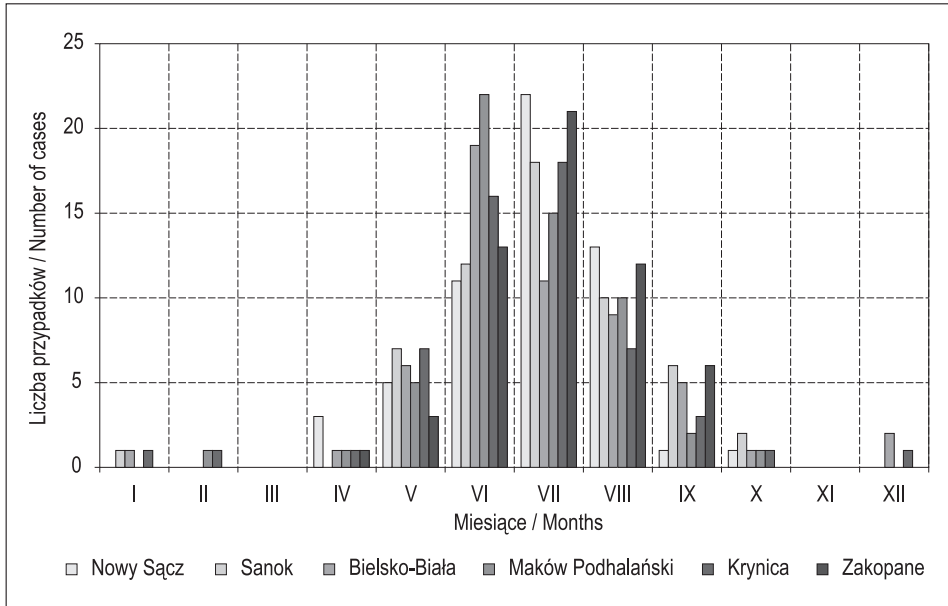


Ryc. 1. Miesiące z najwyższymi sumami opadów atmosferycznych (1951–2005)

Fig. 1. Months with the highest precipitation totals (1951–2005)

w 2001 roku (ryc. 3). Znacznie niższe sumy opadów występowały na rozpatrywanych stacjach w pierwszej połowie lat 90. XX wieku, co jest zgodne z tendencją spadkową opadów rocznych (Cebulska i in. 2007; Niedźwiedź i in. 2009). Przebieg opadów w pierwszym 5-leciu XXI wieku na większości stacji może wskazywać na zmianę tendencji opadów w najbliższych latach w kierunku ich spadku. Jedynie w Sanoku nie stwierdza się takiej zmiany, co dobrze koresponduje m.in. z charakterem zmian opadów w stosunkowo nieodległym Lwowie (Niedźwiedź, Twardosz 2004).

Opracowany scenariusz zmian ilości opadów rocznych w Krakowie na podstawie analizy harmonicznej Fouriera zakłada, że spadek opadów utrzyma się do ok. 2015 roku, a przez następne 15 lat opady będą wzrastać (Cebulska i in. 2007). Również na podstawie ujęć modelowych, m.in. modelu klimatycznego HadCM2 GS, szacuje się, że wraz z postępującym ociepleniem nastąpi w Polsce wzrost opadów atmosferycznych w połowie XXI wieku (Kozuchowski 2004). Wzrost ten ma wynieść 30% obecnej rocznej ilości opadów.

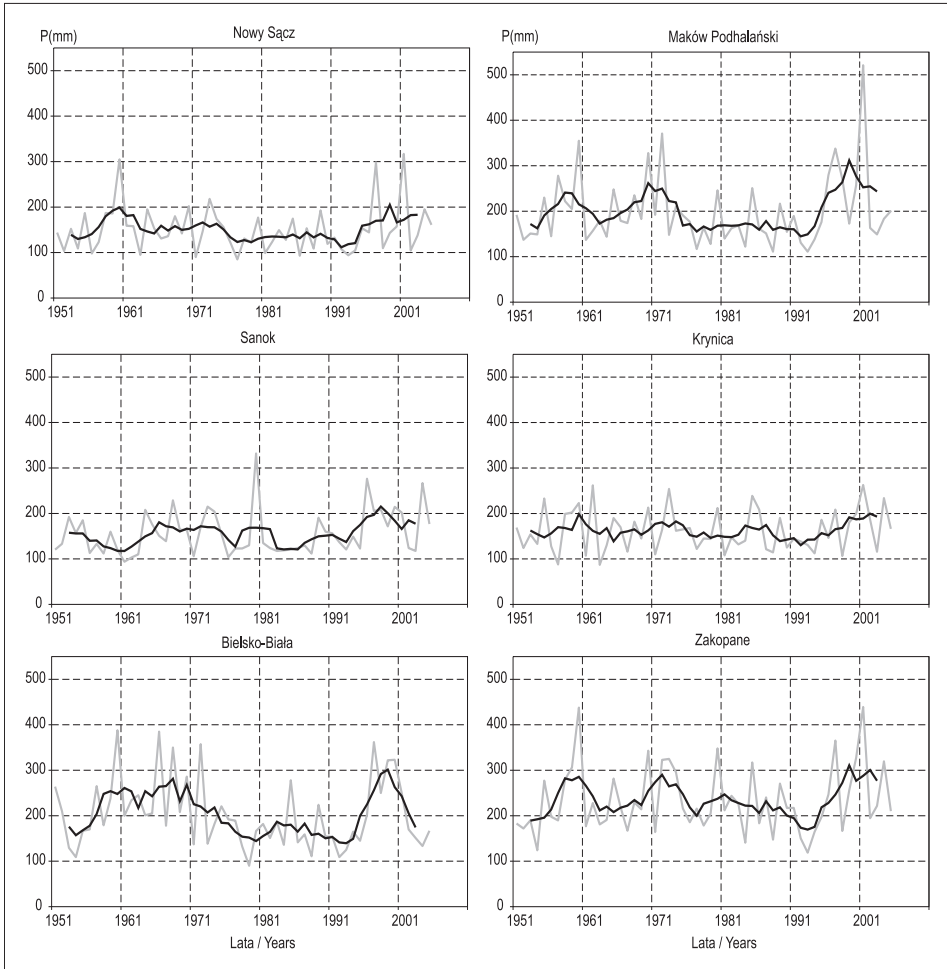


Ryc. 2. Liczba przypadków najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych (1951–2005)
 Fig. 2. Number of cases of the highest monthly precipitation totals (1951–2005)

Krótkookresowe trendy zmian najwyższych miesięcznych opadów na poszczególnych stacjach dobrze ilustrują kumulowane odchylenia opadów od średniej wieloletniej 1951–2005, pokazane na rycinie 4. Na ich podstawie można wyróżnić kilka okresów o odchyleniach dodatnich i ujemnych. Szczególnie wyraźnie zaznaczają się te okresy w Bielsku-Białej i Makowie Podhalańskim, najslabiej natomiast rysują się one w Krynicy. Ogólnie można stwierdzić, że na stacjach położonych w zachodniej części Karpat Polskich utrzymywał się trend wzrostowy opadów przez ok. 20 lat, tj. od początku lat 50. do początku lat 70. XX wieku, a przez następne 20 lat – trend malejący. W Sanoku występował początkowo odmienny przebieg opadów, ale już od lat 80. można stwierdzić zgodność tendencji opadów na wszystkich stacjach.

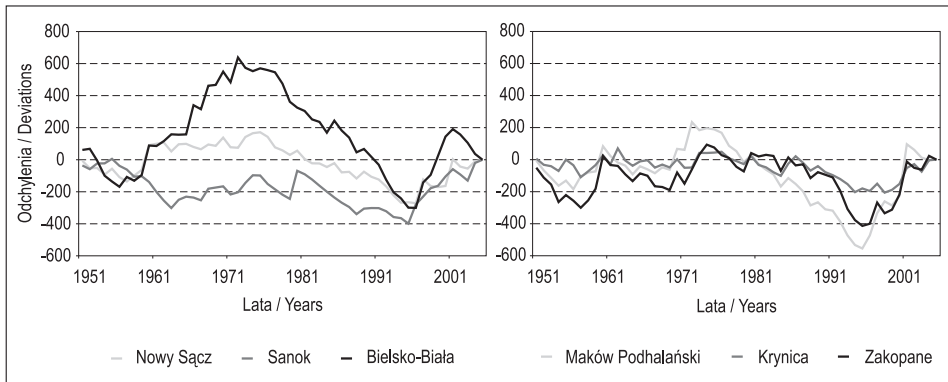
Rozkład prawdopodobieństwa i kwantyle najwyższych miesięcznych sum opadów

W pracy tej podjęto się również wyznaczenia kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów na podstawie najczęściej stosowanych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa. Znalazienie najbardziej zbliżonych rozkładów teoretycznych pozwala na zastosowanie odpowiednich matematycznych narzędzi w celu wyznaczenia dowolnych wielkości statystycznych opisujących badaną zmienną, a jednocześnie



Ryc. 3. Przebieg wieloletni najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych; krzywe wygładzone 5-letnim filtrem Gaussa (1951–2005)

Fig. 3. Long-term variation of the highest monthly precipitation totals; the curves are smoothed by the 5-year Gauss low pass filter (1951–2005)



Ryc. 4. Kumulowane odchylenia najwyższych miesięcznych sum opadów od średniej wieloletniej (1951–2005)

Fig. 4. Cumulative deviations of the highest monthly precipitation totals from the long-term average (1951–2005)

Tab. 4. Przedziały kwantyli najwyższych miesięcznych sum (mm) opadów atmosferycznych (1951–2005)

Table 4. Intervals of quantiles of the highest monthly precipitation totals (mm) (1951–2005)

Stacja Station	$p = 1\%$	$p = 5\%$	$p = 10\%$	$p = 20\%$
Nowy Sącz	266–306	232–243	210–221	184–196
Sanok	268–307	235–246	214–224	190–201
Bielsko-Biała	374–433	324–340	296–303	255–268
Maków Podhalański	373–433	318–338	283–304	245–266
Krynica	266–304	237–247	220–223	195–203
Zakopane	401–459	352–367	325–333	285–299

w praktyce daje możliwość m.in. prognozowania zmienności zdarzeń charakterystycznych, w tym ekstremalnych i procesów hydrometeorologicznych. Przeważającą część zjawisk oraz procesów hydrologicznych i klimatycznych można przedstawić w postaci zmiennych losowych typu dyskretnego lub ciągłego, których właściwości mogą być opisane przez znane funkcje rozkładów prawdopodobieństwa (Kaczmarek 1970; Węglarczyk 1993). Opis ten wymaga w pierwszej kolejności identyfikacji rozkładu prawdopodobieństwa analizowanej zmiennej losowej, który polega na estymacji parametrów wybranego rozkładu na podstawie jednej z wybranych metod statystyki matematycznej, a następnie porównaniu estymowanych rozkładów z rozkładem empirycznym. Niezależnymi próbami losowymi o poszukiwanych rozkładach są ciągi najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych. Próby te zbadano pod względem dopasowania teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa do rozkładu

empirycznego, przy czym do analizy wybrano rozkład normalny, logarytmiczno-normalny, rozkład gamma oraz dwa rozkłady – Gumbela i Weibulla, stosowane do opisu wartości ekstremalnych. Do szacowania parametrów rozkładów zastosowano metodę momentów. Dystrybuantę empiryczną uzyskano po ułożeniu w ciąg niemalejący n wartości x_i kolejnych ciągów i po przyporządkowaniu każdej z nich prawdopodobieństwa empirycznego obliczonego ze wzoru:

$$p_i = \frac{m_i}{n+1}$$

gdzie p zależy od położenia m_i wyrazu w ciągu uporządkowanym.

Na podstawie dystrybuant przyjętych rozkładów w tabeli 4 podano przedziały kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych w poszczególnych stacjach opadowych. W Nowym Sączu najmniejszą wartość opadu o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% otrzymano z rozkładu normalnego, a wartość największą z rozkładu Gumbela. Podobny wynik otrzymano dla $p=5\%$, natomiast dla $p=10$ i $p=20\%$ najmniejsze wartości opadu otrzymano z rozkładu logarytmiczno-normalnego, a wartość największą – z rozkładu Weibulla. W Sanoku, Bielsku-Białej, Makowie, Krynicy i Zakopanem wartości najwyższe opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia 10 i 20% otrzymano z rozkładu Weibulla. W uzyskanych przedziałach wartości kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów rozpatrywanych stacji początkowe wielkości (tab. 4) uzyskano z rozkładu logarytmiczno-normalnego, z wyjątkiem opadów w Krynicy, w której wartość tę otrzymano z rozkładu normalnego. Na wszystkich stacjach w przypadku opadów miesięcznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% największe sumy uzyskano z rozkładu Gumbela, a najniższe z rozkładu normalnego.

W dalszej kolejności podjęto próbę oceny dopasowania rozkładów teoretycznych do serii empirycznych największych miesięcznych opadów. Posłużono się informacyjnym kryterium Akaike – AIC (Mitosek 1993), zgodnie z którym za najlepszy rozkład można uznać ten, w przypadku którego jest osiągnięta najmniejsza wartość kryterium. We wszystkich rozpatrywanych seriach P_{\max} najlepsze dopasowanie uzyskano w odniesieniu do rozkładu Gumbela, co znalazło potwierdzenie u innych autorów (Twardosz 2005, 2009). W dalszej kolejności najmniejsze wartości AIC uzyskano z rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Podsumowanie i wnioski

W Polskich Karpatach Zachodnich najwyższe miesięczne sumy opadów mogą występować w ciągu całego roku, w miesiącach letnich jednak osiągają zdecydowanie największą częstość; w miesiącach chłodnej połowy roku zdarzają się rzadko. W ich przebiegu wieloletnim nie występują istotne statystycznie trendy zmian, a jedynie krótkookresowe fluktuacje nawiązujące do sum rocznych opadów.

Na wszystkich stacjach wystąpiły wysokie opady u schyłku XX wieku oraz w 2001 roku; mniejsze sumy pojawiły się w pierwszej połowie lat 90. XX wieku. Przebieg najwyższych miesięcznych opadów w pierwszym 5-leciu XXI wieku na większości stacji wykazuje tendencję spadkową.

Na niektórych stacjach najwyższe opady miesięczne przekraczają 350% odpowiedniej średniej wieloletniej sumy opadów.

Na wszystkich stacjach w przypadku opadów miesięcznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% największe sumy uzyskano z rozkładu Gumbela, a najniższe z rozkładu normalnego. W zakresie dużego prawdopodobieństwa (np. $p = 20\%$) największe opady uzyskano z rozkładu Weibulla.

Przeprowadzona weryfikacja dopasowania rozkładu teoretycznego do największych miesięcznych sum opadów wskazała na rozkład Gumbela jako najlepszy.

Najwyższe z najwyższych sum miesięcznych opadów, jakie wystąpiły w okresie 1995–2005, odpowiadają w przybliżeniu prawdopodobieństwu przewyższenia 1%, z wyjątkiem opadów w Makowie Podhalańskim. Najwyższy opad miesięczny na tej stacji, wynoszący 521,1 mm, przewyższył o 88,1 mm opad wyznaczony z rozkładu teoretycznego o $p = 1\%$.

Literatura

- Cebulak E., 1998, *Przegląd opadów ekstremalnych, które wywołały powódzie w XX wieku w dorzeczu górnej Wisły* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku*, Wyd. Oddziału PAN w Krakowie, 21–37.
- Cebulska M., Twardosz R., Cichoński 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*, Instytut Geografii i Gospodarki Przemysłowej UJ, Kraków, 383–390.
- Domański C., 1990, *Testy statystyczne*, PWE, Warszawa.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., SD. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kaczmarek Z., 1970, *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Zakład Dynamiki Środowiska i Bioklimatologii UŁ, Łódź.
- Mitosek H. T., 1993, *Informacyjne kryterium Akaike i jego wykorzystanie w hydrologii (I). Dobór typu rozkładu prawdopodobieństwa*, *Przegląd Geofizyczny*, 1, 19–23.
- Niedźwiedz T., Czekierda D., 1998, *Cyrkulacyjne uwarunkowania katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 roku* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku*, Wyd. Oddziału PAN w Krakowie, 53–65.
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat* [w:] I. Dynowska, M. Maciejowski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*, Wydawnictwo 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.
- Niedźwiedz T., Twardosz R., Walanus A., 2009, *Long-term variability of precipitation series in east central Europe in relation to circulation patterns*, *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 3–4, 337–350.

- Pruchnicki J., 1987, *Metody opracowań klimatologicznych*, PWN, Warszawa.
- Schönwiese C.-D., 2000, *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Gebrüder Borntraeger: Berlin–Stuttgart.
- Schönwiese C.-D., Grieser J., Trömel S., 2003, *Secular change of extreme monthly precipitation in Europe*, *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 245–250.
- Trömel S., Schönwiese C.-D., 2007, *Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany*, *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 29–39
- Twardosz R., 2005, *Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002)*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Twardosz R., 2009, *Probabilistic model of maximum precipitation depths for Kraków (southern Poland, 1886–2002)*, *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 1–2, 37–45.
- Ustrnul Z., Kowanetz L., Matuszko D., Twardosz R., Piotrowicz K., Wypych A., 2009, *Klimatyczne uwarunkowania rozwoju rolnictwa w dorzeczu górnej Wisły na przełomie XX i XXI wieku* [w:] Z. Górka, A. Zborowski (red.), *Człowiek i rolnictwo*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 135–147.
- Węglarczyk S., 1993, *Metody statystyczne*, Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków.

Marta Cebulka
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: marta.cebulka@iigw.pl

Robert Twardosz
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków,
e-mail: r.twardosz@uj.edu.pl

Zarys treści: W artykule zbadano wieloletni i roczny przebieg najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych w Polskich Karpatach Zachodnich na podstawie danych z 6 stacji: Nowy Sącz, Sanok, Bielsko-Biała, Maków Podhalański, Krynica i Zakopane z lat 1951–2005 oraz wyznaczono ich wartości prawdopodobne. Wykazano, że najwyższe miesięczne sumy opadów mogą występować w ciągu całego roku, z największą częstością w miesiącach letnich. Nie stwierdzono istotnych statystycznie trendów zmian wieloletnich, a jedynie krótkookresowe fluktuacje.

Słowa kluczowe: sumy miesięczne opadów, trend, kwantyle opadów, polskie Karpaty Zachodnie

Wprowadzenie

Na opady atmosferyczne w Polskich Karpatach Zachodnich wpływa, oprócz czynników geograficznych, głównie cyrkulacja atmosferyczna (Niedźwiedz, Obrębska-Starkłowa 1991). Z badań T. Niedźwiedzia i R. Twardosza (2004) wynika, że zmienność opadów w niektórych miesiącach w ponad 60% można wytłumaczyć zmiennością wskaźnika cykloniczności. Synoptyczne uwarunkowania silnych opadów występujących w tej części Polski są dobrze rozpoznane i udokumentowane w literaturze (m.in. Cebulak 1998; Niedźwiedz, Czekerda 1998). Wysokie sumy miesięczne opadów mogą być wynikiem występowania:

- opadów ulewnych o zasięgu lokalnym, powstających w wyniku konwekcji termicznej w jednorodnych masach powietrznych lub konwekcji dynamicznej w strefie frontów atmosferycznych, głównie chłodnego,
- jednostajnych kilkudniowych opadów w strefie płytkich niżów stacjonarnych. Zarówno krótkotrwałe, jak i długotrwałe opady mogą być przyczyną m.in. wezbrań rzek i potoków w dorzeczu górnej Wisły.

Ostatnie badania opadów w dorzeczu górnej Wisły wskazują na różne znaki trendów zmian wieloletnich opadów rocznych i półroczna ciepłego, które to trendy są najczęściej słabe i nieistotne statystycznie (Cebulska i in. 2007; Ustrnul i in. 2009). Chociaż trendy wzrostowe opadów zaznaczają się w Europie Północnej, a spadkowe w Południowej, to jednak brak jednoznacznie określonych trendów jest cechą zmienności opadów na wielu obszarach Ziemi (IPCC 2007).

Celem tej pracy jest określenie zmian czasowych, tj. przebiegu wieloletniego i rocznego najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych (P_{\max}) w Polskich Karpatach Zachodnich na podstawie danych z 6 stacji pomiarowych w latach 1951–2005, oraz wyznaczenie ich wartości prawdopodobnych. Jak wynika z badań innych autorów, zmianom mogą podlegać nie tylko średnie wartości opadów, lecz także ekstremalne (np. Schönwiese i in. 2003; Trömel, Schönwiese 2007).

Opracowanie najwyższych sum miesięcznych w roku nie jest jednoznaczne z opracowaniem bezwzględnie największych miesięcznych sum opadów. Najwyższa suma w danym miesiącu w rozpatrywanym wieloleciu wcale nie musi być najwyższa w danym roku; może się także zdarzyć, że suma najwyższa w danym roku suchym może być niższa od drugiej lub trzeciej pod względem wielkości w wilgotnym roku.

Tab. 1. Położenie stacji meteorologicznych
Table 1. Location of meteorological stations

Stacja Stadion	H (n.p.m.) Alt. (a.s.l.)	Współrzędne geograficzne / Geographical coordinates	
		φ	λ
Nowy Sącz	292	49° 37'	20° 42'
Sanok	314	49° 34'	22° 12'
Bielsko-Biała	322	49° 49'	19° 04'
Maków Podhalański	350	49° 44'	19° 40'
Krynica	613	49° 26'	20° 58'
Zakopane	844	49° 18'	19° 57'

Dane i metody

W pracy wykorzystano miesięczne sumy opadów atmosferycznych z 6 stacji położonych w Polskich Karpatach Zachodnich: Nowego Sącza, Sanoka, Bielska-Białej, Makowa Podhalańskiego, Krynicy i Zakopanego z lat 1951–2005 (tab. 1). Dane z lat 1951–1982 zgromadzono na podstawie roczników hydrograficznych, meteorologicznych i opadowych oraz materiałów do bilansu wodnego Polski publikowanych przez PIHM (obecnie IMGW). Dane z niektórych stacji po 1982 roku uzyskano z Głównego Urzędu Statystycznego oraz bezpośrednio z Oddziału IMGW w Krakowie dzięki uprzejmości dr Danuty Limanówki.

Z uwagi na zmianę lokalizacji niektórych stacji meteorologicznych zgromadzone ciągi opadów sprawdzono pod kątem ich jednorodności. Do sprawdzenia hipotezy o jednorodności statystycznej miesięcznych sum opadów zastosowano nieparametryczny test sumy rang. Weryfikacja jednorodności opadów miesięcznych za pomocą tego testu statystycznego wykazała, że wszystkie serie można uznać za jednorodne na przyjętym poziomie istotności $\alpha = 0,05$.

Ze zgromadzonej bazy danych opadów z każdej stacji wybrano najwyższą sumę miesięczną opadów – P_{\max} w każdym roku okresu 1951–2005. Określono częstość wystąpienia opadów w przebiegu rocznym. Następnie zbadano trendy zmian wieloletnich na podstawie analizy regresji liniowej. Ponadto wyznaczono wielkości kwantyli najwyższych miesięcznych sum opadów na podstawie kilku rozkładów teoretycznych: normalnego, logarytmiczno-normalnego, Gumbela, Weibulla oraz gamma.

Przebieg roczny i wieloletni najwyższych miesięcznych sum opadów

Na podstawie ciągów miesięcznych sum opadów atmosferycznych z poszczególnych stacji z lat 1951–2005 wyznaczono wartości średnie wieloletnie, a także wyodrębniono najwyższe sumy miesięczne opadów w rozpatrywanym wieloleciu (tab. 2). Wśród wskazanych najwyższych sum wyróżniono takie, które były jednocześnie

Tab. 2. Charakterystyki statystyczne sum miesięcznych opadów (1951–2005)

Table 2. Statistical characteristics of monthly precipitation totals (1951–2005)

Stacja Station		Miesiące / Months											
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Nowy Sącz	1	34,3	31,7	35,7	52,9	80,3	109,4	115,2	90,2	57,8	41,5	38,9	39,0
	2	95,0	92,7	87,1	136,0	153,4	218,0	317,0	195,0	127,8	125,0	98,0	88,8
	3	277	293	244	257	191	199	275	216	221	301	252	228
	4	1976	1952	2000	1967	1987	1973	2001	1964	1996	1974	1962	1982
Sanok	1	36,7	32,9	37,6	52,9	87,4	102,4	113,7	89,2	77,6	51,8	44,2	46,3
	2	157,0	85,6	95,0	121,0	245,8	215,0	332,0	208,0	276,3	162,0	108,0	113,1
	3	428	260	253	229	281	210	292	233	356	313	244	245
	4	1954	2004	1964	1989	1996	1973	1980	1964	1996	1980	1964	1982
Bielsko- -Biała	1	44,6	45,4	51,3	73,0	109,6	141,2	146,5	117,6	87,1	60,3	59,8	55,2
	2	91,1	149,0	129,0	165,0	246,3	350,0	388,0	357,5	245,0	168,5	130,3	210,0
	3	204	328	252	226	225	248	265	304	281	280	218	381
	4	2005	1977	2000	1994	1951	1968	1960	1972	1963	1974	1952	1952
Maków Podhalański	1	48,9	45,6	48,0	73,1	101,8	133,9	145,1	113,9	77,2	56,8	53,1	49,4
	2	117,0	137,1	124,8	175,0	192,0	271,0	521,1	371,0	279,5	179,0	129,2	102,5
	3	239	301	260	239	189	202	359	326	362	315	243	207
	4	1976	1952	2000	1955	1951	1998	2001	1972	1996	1963	1952	2005
Krynica	1	48,8	44,4	46,0	61,6	95,1	119,6	117,2	96,7	68,4	53,9	51,1	56,3
	2	168,0	124,1	117,4	125,1	190,3	262,0	262,6	238,7	146,3	178,0	128,0	120,0
	3	344	279	255	203	200	219	224	247	214	330	250	213
	4	1976	1952	2000	1990	1989	1962	2001	1985	1996	1980	1964	1954
Zakopane	1	46,4	45,6	55,3	83,6	122,7	170,5	179,6	138,7	95,0	68,7	61,2	53,5
	2	127,4	137,0	138,7	166,6	240,4	325,0	439,2	322,9	246,9	228,4	185,4	110,9
	3	274	300	251	199	196	191	245	233	260	332	303	207
	4	1976	1952	2000	1998	1987	1973	2001	1972	1996	1980	1962	1982

Objaśnienia: 1 – suma średnia (mm), 2 – suma najwyższa (mm), 3 – suma najwyższa (w % średniej), 4 – rok wystąpienia sumy najwyższej. Pogrubieniem wyróżniono sumę najwyższą w 55-leciu, która była też sumą najwyższą w roku

Explanations: 1 – average total (mm), 2 – highest total (mm), 3 – highest total (in % of average), 4 – year of occurrence of the highest total. The highest total in 1951–2005, which was also the highest total in the year, is indicated in bold

Tab. 3. Charakterystyki statystyczne najwyższych sum miesięcznych opadów – P_{\max} i wartość trendu (1951–2005)Table 3. Statistical characteristics of the highest monthly precipitation totals – P_{\max} with trend value (1951–2005)

Stacja Station	Średnia (mm) Average (mm)	Najwyższa (mm) The highest (mm)	Najniższa (mm) The lowest (mm)	Współczynnik zmienności (%) Variability coeff. (%)	Trend (mm/10 lat) Trend (mm/10 year)
Nowy Sącz	150,4	317,0	85,0	33	0,91
Sanok	156,5	332,0	94,0	31	7,03
Bielsko-Biała	203,1	388,0	90,1	37	-5,92
Maków Podhalański	198,0	521,1	111,1	38	3,87
Krynica	162,7	262,6	87,0	28	1,96
Zakopane	233,4	439,2	118,9	31	4,44

najwyższymi wartościami w ciągu roku. Wartości te występują głównie w miesiącach letnich, chociaż sporadycznie pojawiają też się w miesiącach zimowych.

Najwyższe średnie wieloletnie miesięczne sumy opadów atmosferycznych na rozpatrywanych stacjach w Polskich Karpatach Zachodnich wahają się od 113,7 mm w Nowym Sączu do 179,6 mm w Zakopanem. Wartości najwyższe zmieniają się od 317,0 mm w Nowym Sączu do 521,1 mm w Makowie Podhalańskim; wartości takie wystąpiły w lipcu 2001 roku (tab. 3). Wymienione sumy najwyższe wyniosły odpowiednio 275 i 359% średniej miesięcznej sumy (tab. 2). Z zestawienia E. Cebulak (1998) wynika, że najwyższy miesięczny opad w Karpatach Polskich w XX wieku osiągnął 684 mm na Hali Gąsienicowej w lipcu 1934 roku. Wartości współczynnika zmienności nie wskazują na istotne zróżnicowanie dyspersji opadów na poszczególnych stacjach (tab. 3).

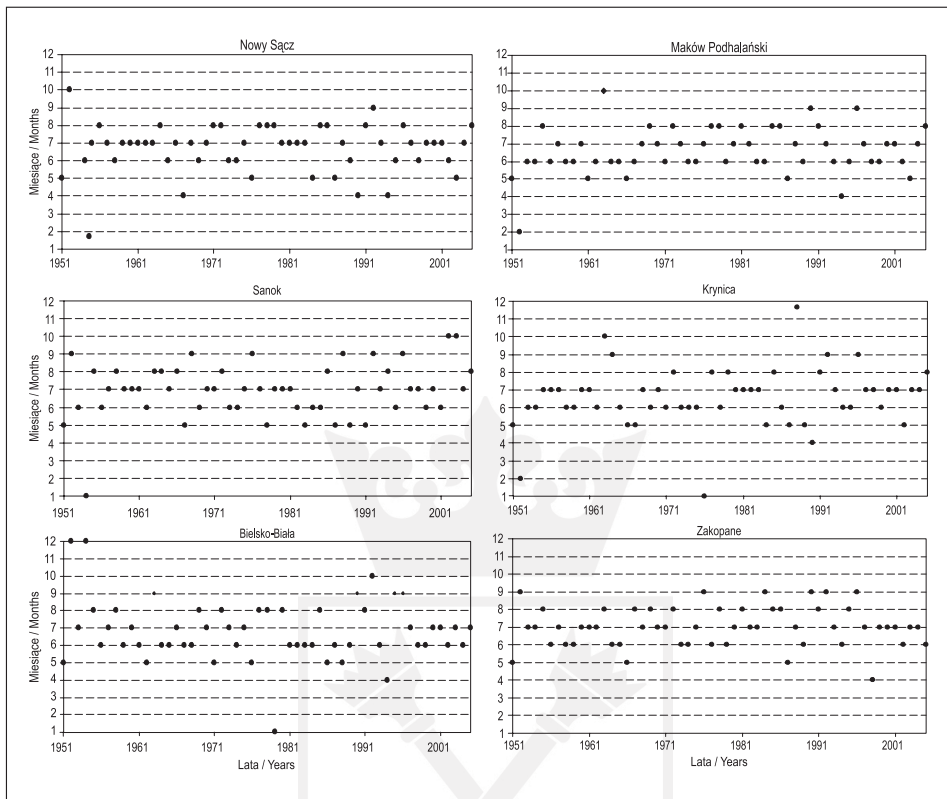
Wielkość najwyższych miesięcznych opadów (podobnie jak sum opadów rocznych i miesięcznych) zależy od wysokości nad poziomem morza, długości geograficznej (spadek wielkości opadów z zachodu na wschód) oraz formy terenu (niższe są opady w formach wklęsłych).

W 4 latach okresu 1951–2005 najwyższe sumy miesięczne opadów pojawiły się synchronicznie na wszystkich rozpatrywanych stacjach: w lipcu 1960, 1970 i 1997 oraz w sierpniu 1972 roku (ryc. 1). W tych miesiącach wystąpiły powodzie w dorzeczu górnej Wisły. Wezbrania zdarzyły się także w czerwcu 1958 roku oraz w lipcu 2001 roku, a były wynikiem dużych opadów, zwłaszcza w zachodniej części Polskich Karpat.

W przebiegu rocznym najwyższe miesięczne sumy opadów atmosferycznych na wszystkich stacjach występowały od maja do września, a w szczególności w miesiącach letnich, tj. w czerwcu, lipcu i sierpniu (ryc. 2). W Bielsku-Białej i Makowie Podhalańskim najwyższe sumy miesięczne opadów pojawiały się najczęściej w czerwcu – 19 i 21 razy, co odpowiada częstości 34 i 38%. W pozostałych stacjach opady takie występowały częściej w lipcu, z częstością 39% w Nowym Sączu, 38% w Zakopanem oraz po 31% w Krynicy i Sanoku. Najwyższych sum miesięcznych opadów nie stwierdzono w marcu i listopadzie. W pozostałych miesiącach pojawiały się one sporadycznie (do 3 zdarzeń w kwietniu w Nowym Sączu).

Przebieg najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych na poszczególnych stacjach został poddany analizie pod kątem występowania możliwych trendów liniowych. Do oszacowania istotności statystycznej wartości trendu zastosowano test *t*-Studenta (Domański 1990; Pruchnicki 1987). Uzyskane wartości trendu opadów (tab. 3) na poszczególnych stacjach są różnych znaków i wartości, jednak na przyjętym poziomie istotności (0,05) są nieistotne statystycznie. Trend istotny statystycznie na poziomie $\alpha = 0,10$ dostrzeżono jedynie w Sanoku. W przypadku opadów atmosferycznych braku istotnych trendów należy upatrywać w ich zróżnicowaniu z roku na rok, co oznacza, że tylko duże zmiany w wysokości opadów mogą wykazywać istotność statystyczną. W przebiegu najwyższych sum miesięcznych opadów występują nieregularne fluktuacje, naprzemienne pojawianie się nadmiarów i niedoborów opadów, nie ma zaś trwałego trendu (ryc. 3).

Analiza wieloletniego przebiegu najwyższych miesięcznych opadów na poszczególnych stacjach wygładzonego 3-letnim filtrem Gaussa (Schönwiese 2000) wykazała, że na wszystkich stacjach wystąpiły wysokie opady u schyłku XX wieku oraz

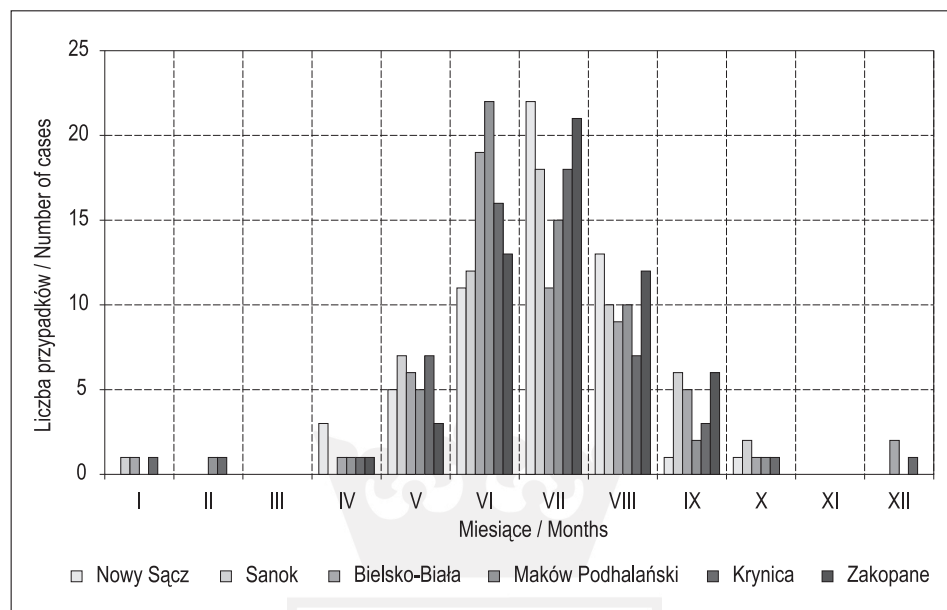


Ryc. 1. Miesiące z najwyższymi sumami opadów atmosferycznych (1951–2005)

Fig. 1. Months with the highest precipitation totals (1951–2005)

w 2001 roku (ryc. 3). Znacznie niższe sumy opadów występowały na rozpatrywanych stacjach w pierwszej połowie lat 90. XX wieku, co jest zgodne z tendencją spadkową opadów rocznych (Cebulska i in. 2007; Niedźwiedź i in. 2009). Przebieg opadów w pierwszym 5-leciu XXI wieku na większości stacji może wskazywać na zmianę tendencji opadów w najbliższych latach w kierunku ich spadku. Jedynie w Sanoku nie stwierdza się takiej zmiany, co dobrze koresponduje m.in. z charakterem zmian opadów w stosunkowo nieodległym Lwowie (Niedźwiedź, Twardosz 2004).

Opracowany scenariusz zmian ilości opadów rocznych w Krakowie na podstawie analizy harmonicznej Fouriera zakłada, że spadek opadów utrzyma się do ok. 2015 roku, a przez następne 15 lat opady będą wzrastać (Cebulska i in. 2007). Również na podstawie ujęć modelowych, m.in. modelu klimatycznego HadCM2 GS, szacuje się, że wraz z postępującym ociepleniem nastąpi w Polsce wzrost opadów atmosferycznych w połowie XXI wieku (Kozuchowski 2004). Wzrost ten ma wynieść 30% obecnej rocznej ilości opadów.

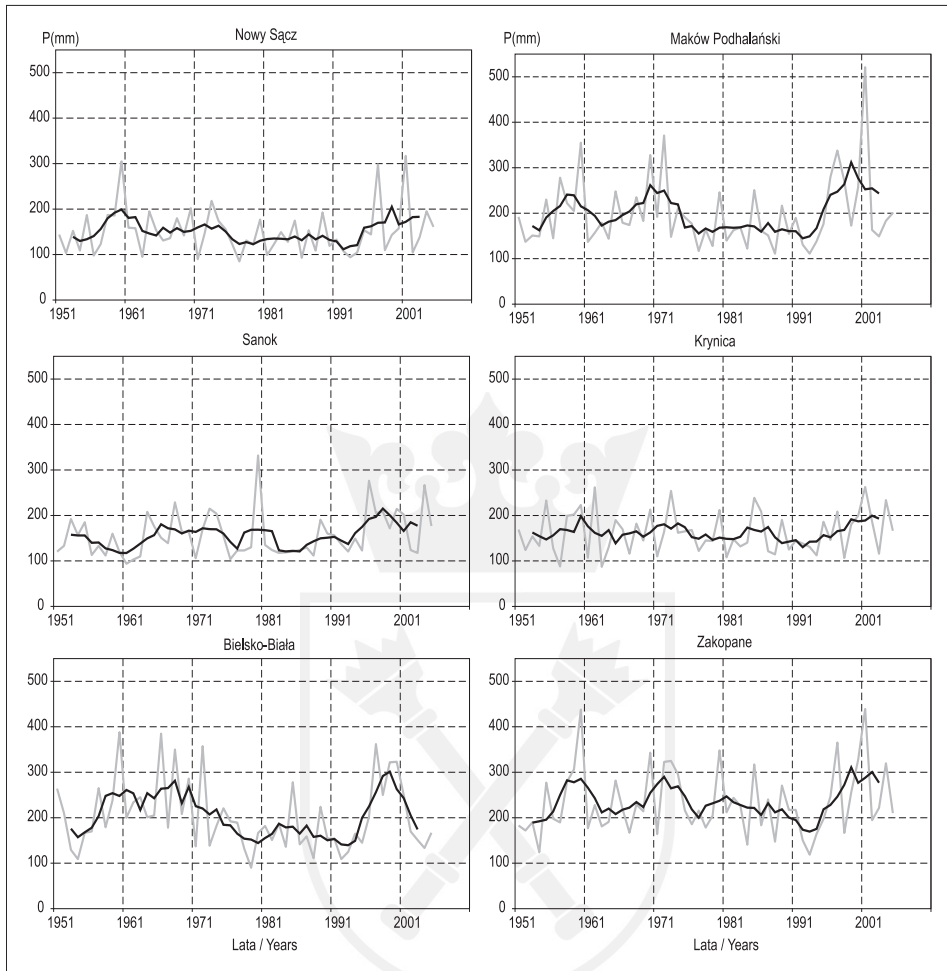


Ryc. 2. Liczba przypadków najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych (1951–2005)
 Fig. 2. Number of cases of the highest monthly precipitation totals (1951–2005)

Krótkookresowe trendy zmian najwyższych miesięcznych opadów na poszczególnych stacjach dobrze ilustrują kumulowane odchylenia opadów od średniej wieloletniej 1951–2005, pokazane na rycinie 4. Na ich podstawie można wyróżnić kilka okresów o odchyleniach dodatnich i ujemnych. Szczególnie wyraźnie zaznaczają się one w Bielsku-Białej i Makowie Podhalańskim, najslabiej natomiast rysują się one w Krynicy. Ogólnie można stwierdzić, że na stacjach położonych w zachodniej części Karpat Polskich utrzymywał się trend wzrostowy opadów przez ok. 20 lat, tj. od początku lat 50. do początku lat 70. XX wieku, a przez następne 20 lat – trend malejący. W Sanoku występował początkowo odmienny przebieg opadów, ale już od lat 80. można stwierdzić zgodność tendencji opadów na wszystkich stacjach.

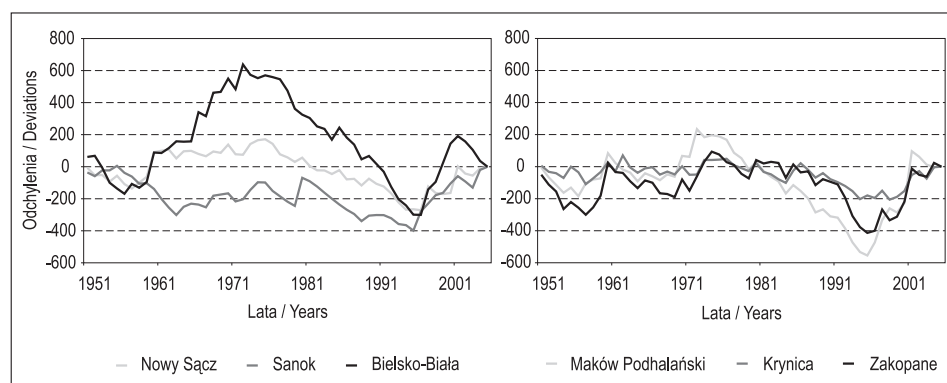
Rozkład prawdopodobieństwa i kwantyle najwyższych miesięcznych sum opadów

W pracy tej podjęto się również wyznaczenia kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów na podstawie najczęściej stosowanych teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa. Znalezienie najbardziej zbliżonych rozkładów teoretycznych pozwala na zastosowanie odpowiednich matematycznych narzędzi w celu wyznaczenia dowolnych wielkości statystycznych opisujących badaną zmienną, a jednocześnie



Ryc. 3. Przebieg wieloletni najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych; krzywe wygładzone 5-letnim filtrem Gaussa (1951–2005)

Fig. 3. Long-term variation of the highest monthly precipitation totals; the curves are smoothed by the 5-year Gauss low pass filter (1951–2005)



Ryc. 4. Kumulowane odchylenia najwyższych miesięcznych sum opadów od średniej wieloletniej (1951–2005)

Fig. 4. Cumulative deviations of the highest monthly precipitation totals from the long-term average (1951–2005)

Tab. 4. Przedziały kwantyli najwyższych miesięcznych sum (mm) opadów atmosferycznych (1951–2005)

Table 4. Intervals of quantiles of the highest monthly precipitation totals (mm) (1951–2005)

Stacja Station	$p = 1\%$	$p = 5\%$	$p = 10\%$	$p = 20\%$
Nowy Sącz	266–306	232–243	210–221	184–196
Sanok	268–307	235–246	214–224	190–201
Bielsko-Biała	374–433	324–340	296–303	255–268
Maków Podhalański	373–433	318–338	283–304	245–266
Krynica	266–304	237–247	220–223	195–203
Zakopane	401–459	352–367	325–333	285–299

w praktyce daje możliwość m.in. prognozowania zmienności zdarzeń charakterystycznych, w tym ekstremalnych i procesów hydrometeorologicznych. Przeważającą część zjawisk oraz procesów hydrologicznych i klimatycznych można przedstawić w postaci zmiennych losowych typu dyskretnego lub ciągłego, których właściwości mogą być opisane przez znane funkcje rozkładów prawdopodobieństwa (Kaczmarek 1970; Węglarczyk 1993). Opis ten wymaga w pierwszej kolejności identyfikacji rozkładu prawdopodobieństwa analizowanej zmiennej losowej, który polega na estymacji parametrów wybranego rozkładu na podstawie jednej z wybranych metod statystyki matematycznej, a następnie porównaniu estymowanych rozkładów z rozkładem empirycznym. Niezależnymi próbami losowymi o poszukiwanych rozkładach są ciągi najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych. Próby te zbadano pod względem dopasowania teoretycznych rozkładów prawdopodobieństwa do rozkładu

empirycznego, przy czym do analizy wybrano rozkład normalny, logarytmiczno-normalny, rozkład gamma oraz dwa rozkłady – Gumbela i Weibulla, stosowane do opisu wartości ekstremalnych. Do szacowania parametrów rozkładów zastosowano metodę momentów. Dystrybuantę empiryczną uzyskano po ułożeniu w ciąg niemalejący n wartości x_i kolejnych ciągów i po przyporządkowaniu każdej z nich prawdopodobieństwa empirycznego obliczonego ze wzoru:

$$p_i = \frac{m_i}{n+1}$$

gdzie p zależy od położenia m_i wyrazu w ciągu uporządkowanym.

Na podstawie dystrybuant przyjętych rozkładów w tabeli 4 podano przedziały kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów atmosferycznych w poszczególnych stacjach opadowych. W Nowym Sączu najmniejszą wartość opadu o prawdopodobieństwie przekroczenia 1% otrzymano z rozkładu normalnego, a wartość największą z rozkładu Gumbela. Podobny wynik otrzymano dla $p=5\%$, natomiast dla $p=10$ i $p=20\%$ najmniejsze wartości opadu otrzymano z rozkładu logarytmiczno-normalnego, a wartość największą – z rozkładu Weibulla. W Sanoku, Bielsku-Białej, Makowie, Krynicy i Zakopanem wartości najwyższe opadów o prawdopodobieństwie przewyższenia 10 i 20% otrzymano z rozkładu Weibulla. W uzyskanych przedziałach wartości kwantyli najwyższych sum miesięcznych opadów rozpatrywanych stacji początkowe wielkości (tab. 4) uzyskano z rozkładu logarytmiczno-normalnego, z wyjątkiem opadów w Krynicy, w której wartość tę otrzymano z rozkładu normalnego. Na wszystkich stacjach w przypadku opadów miesięcznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% największe sumy uzyskano z rozkładu Gumbela, a najniższe z rozkładu normalnego.

W dalszej kolejności podjęto próbę oceny dopasowania rozkładów teoretycznych do serii empirycznych największych miesięcznych opadów. Posłużono się informacyjnym kryterium Akaike – AIC (Mitosek 1993), zgodnie z którym za najlepszy rozkład można uznać ten, w przypadku którego jest osiągnięta najmniejsza wartość kryterium. We wszystkich rozpatrywanych seriach P_{\max} najlepsze dopasowanie uzyskano w odniesieniu do rozkładu Gumbela, co znalazło potwierdzenie u innych autorów (Twardosz 2005, 2009). W dalszej kolejności najmniejsze wartości AIC uzyskano z rozkładu logarytmiczno-normalnego.

Podsumowanie i wnioski

W Polskich Karpatach Zachodnich najwyższe miesięczne sumy opadów mogą występować w ciągu całego roku, w miesiącach letnich jednak osiągają zdecydowanie największą częstość; w miesiącach chłodnej połowy roku zdarzają się rzadko. W ich przebiegu wieloletnim nie występują istotne statystycznie trendy zmian, a jedynie krótkookresowe fluktuacje nawiązujące do sum rocznych opadów.

Na wszystkich stacjach wystąpiły wysokie opady u schyłku XX wieku oraz w 2001 roku; mniejsze sumy pojawiły się w pierwszej połowie lat 90. XX wieku. Przebieg najwyższych miesięcznych opadów w pierwszym 5-leciu XXI wieku na większości stacji wykazuje tendencję spadkową.

Na niektórych stacjach najwyższe opady miesięczne przekraczają 350% odpowiedniej średniej wieloletniej sumy opadów.

Na wszystkich stacjach w przypadku opadów miesięcznych o prawdopodobieństwie przewyższenia 1% największe sumy uzyskano z rozkładu Gumbela, a najniższe z rozkładu normalnego. W zakresie dużego prawdopodobieństwa (np. $p = 20\%$) największe opady uzyskano z rozkładu Weibulla.

Przeprowadzona weryfikacja dopasowania rozkładu teoretycznego do największych miesięcznych sum opadów wskazała na rozkład Gumbela jako najlepszy.

Najwyższe z najwyższych sum miesięcznych opadów, jakie wystąpiły w okresie 1995–2005, odpowiadają w przybliżeniu prawdopodobieństwu przewyższenia 1%, z wyjątkiem opadów w Makowie Podhalańskim. Najwyższy opad miesięczny na tej stacji, wynoszący 521,1 mm, przewyższył o 88,1 mm opad wyznaczony z rozkładu teoretycznego o $p = 1\%$.

Literatura

- Cebulak E., 1998, *Przegląd opadów ekstremalnych, które wywołały powodzie w XX wieku w dorzeczu górnej Wisły* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku*, Wyd. Oddziału PAN w Krakowie, 21–37.
- 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*, Instytut Geografii i Gospodarki Przemysłowej UJ, Kraków, 383–390.
- Domański C., 1990, *Testy statystyczne*, PWE, Warszawa.
- IPCC (2007) *Climate Change 2007. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., SD. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Kaczmarek Z., 1970, *Metody statystyczne w hydrologii i meteorologii*, Wyd. Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Kożuchowski K. (red.), 2004, *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, Zakład Dynamiki Środowiska i Bioklimatologii UŁ, Łódź.
- Mitosek H. T., 1993, *Informacyjne kryterium Akaike i jego wykorzystanie w hydrologii (I). Dobór typu rozkładu prawdopodobieństwa*, Przegląd Geofizyczny, 1, 19–23.
- Niedźwiedź T., Czekerda D., 1998, *Cyrkulacyjne uwarunkowania katastrofalnej powodzi w lipcu 1997 roku* [w:] *Powódź w dorzeczu górnej Wisły w lipcu 1997 roku*, Wyd. Oddziału PAN w Krakowie, 53–65.
- Niedźwiedź T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat* [w:] I. Dynowska, M. Maciejowski (red.), *Dorzecze górnej Wisły*, Wydawnictwo PWN, 68–84.
- Niedźwiedź T., Twardosz R., 2004, *Long-term variability of precipitation at selected stations in Central Europe*, Global Change IGBP, 11, 73–100.
- Niedźwiedź T., Twardosz R., Walanus A., 2009, *Long-term variability of precipitation series in east central Europe in relation to circulation patterns*, Theoretical and Applied Climatology, 98, 3–4, 337–350.

- Pruchnicki J., 1987, *Metody opracowań klimatologicznych*, PWN, Warszawa.
- Schönwiese C.-D., 2000, *Praktische Statistik für Meteorologen und Geowissenschaftler*, Gebrüder Borntraeger: Berlin–Stuttgart.
- Schönwiese C.-D., Grieser J., Trömel S., 2003, *Secular change of extreme monthly precipitation in Europe*, *Theoretical and Applied Climatology*, 75, 245–250.
- Trömel S., Schönwiese C.-D., 2007, *Probability change of extreme precipitation observed from 1901 to 2000 in Germany*, *Theoretical and Applied Climatology*, 87, 29–39
- Twardosz R., 2005, *Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886–2002)*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ, Kraków.
- Twardosz R., 2009, *Probabilistic model of maximum precipitation depths for Kraków (southern Poland, 1886–2002)*, *Theoretical and Applied Climatology*, 98, 1–2, 37–45.
- Ustrnul Z., Kowanetz L., Matuszko D., Twardosz R., Piotrowicz K., Wypych A., 2009, *Klimatyczne uwarunkowania rozwoju rolnictwa w dorzeczu górnej Wisły na przełomie XX i XXI wieku* [w:] Z. Górka, A. Zborowski (red.), *Człowiek i rolnictwo*, Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 135–147.
- Węglarczyk S., 1993, *Metody statystyczne*, Wyd. Politechnika Krakowska, Kraków.

Marta Cebulka
Politechnika Krakowska
Wydział Inżynierii Środowiska
ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków
e-mail: marta.cebulka@iigw.pl

Robert Twardosz
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej
ul. Gronostajowa 7, 30-387 Kraków,
e-mail: r.twardosz@uj.edu.pl