

Iwona MARKIEWICZ

INSTYTUT GEOFIZYKI POLSKIEJ AKADEMII NAUK, ZAKŁAD HYDROLOGII I HYDRODYNAMIKI

**OKRESY BEZ OPADU ORAZ Z OPADEM BARDZO SILNYM
W PÓŁROCZU LETNIM W DORZECZU GÓRNEJ WISŁY****PERIODS WITHOUT PRECIPITATION AND WITH
VERY HEAVY PRECIPITATION IN THE SUMMER HALF-YEAR
IN THE UPPER VISTULA BASIN****Wstęp**

Obserwacje meteorologiczne i hydrologiczne towarzyszą ludziom od zarania dziejów (Rojecki 1965). W Polsce oraz w krajach o podobnym klimacie obserwuje się sezonowe występowanie i intensywność zjawisk hydrologiczno-meteorologicznych. Związane jest to z sezonową zmiennością czynników takich jak temperatura, cyrkulacja powietrza, pokrycie terenu, warunki glebowe, retencja czy ewapotranspiracja, które to wpływają na formowanie się zjawisk hydrologiczno-meteorologicznych (Parajka i in. 2009; Hasson i in. 2014; Hall, Blöschl 2018). Podejście sezonowe jest korzystne przy analizie wpływu zmian klimatycznych na reżim wodny i jest szeroko rekomendowane w literaturze (Ozga-Zielińska i in. 1999; Petrow, Merz 2009; Wilson i in. 2010; Kochanek i in. 2012; Strupczewski i in. 2012; Stramska 2013; Marengo 2015; Perez i in. 2015; Hao i in. 2018; Markiewicz i in. 2020). W Polsce wyróżnia się dwa główne sezony hydrologiczne: sezon letni od 1 maja do 31 października oraz sezon zimowy od 1 listopada do 30 kwietnia.

Rejon dorzecza górnej Wisły charakteryzuje się dużą dynamiką procesów hydrologicznych z wysokim potencjałem powodziowym w półroczu letnim, tj. od maja do października, kiedy to największe powodzie są generowane intensywnymi opadami deszczu. Kompleksowa charakterystyka regionu Górnej Wisły została przedstawiona w licznych opracowaniach, np.: Dynowska, Maciejewski 1991; Izmailow i in. 1995; Obrębska-Starkłowa i in 1995; Warszńska 1996. Szczegółowe badania klimatu w regionie były prowadzone między innymi przez Hessa (1965), Niedźwiedzia (1981) oraz Niedźwiedzia i Obrębską-Starkłową (1991). Analiza opadów w rejonie górnej Wisły stanowiła temat wielu prac, np. Kostrakiewicza (1967, 1977) czy Twardosza (2000, 2005). Szczególne zainteresowanie badaczy skierowane było na skrajne warunki opadowe w regionie, czyli okresy bez opa-

dów i związane z nimi susze i okresy posuszne (Kowanetz 1981; Ziernicka-Wojtaszek 2012; Cebulska 2016, 2018; Cebulska, Twardosz 2010) oraz okresy bardzo wysokich opadów, z którymi wiąże się ryzyko wystąpienia podtopień i powodzi (Cebulska, Twardosz 2012; Twardosz, Cebulska 2014; Twardosz i in. 2016). W pracy Cebulskiej i Twardosza (2020) scharakteryzowano najwyższe i najniższe sumy opadów miesięcznych. Większość najnowszych wymienionych tu badań dotyczących opadów w dorzeczu górnej Wisły była prowadzona dla miesięcznych sum opadów. Szczegółowe badania maksymalnych opadów dobowych w regionie zostały przeprowadzone w latach 90. ubiegłego wieku przez Cebulak (1991a-b, 1992, 1998), a w nowszej pracy Młyńskiego i in. (2018) badano trendy w seriach maksymalnych rocznych opadów dobowych.

W niniejszej pracy analizie poddano dobowe sumy opadów atmosferycznych sezonu letniego (maj–październik) w okresie 1951-2018 dla jedenastu stacji meteorologicznych z dorzecza górnej Wisły. Celem pracy jest zbadanie skrajnych warunków opadowych polegające na ocenie częstości wystąpienia dni bez opadów oraz dni z opadem bardzo silnym (powyżej 20 mm na dobę), a także analiza zmienności (tj. badanie trendu) serii liczby dni bez opadu oraz liczby dni z opadem bardzo silnym. Dodatkowym celem jest zbadanie długości i czasu wystąpienia najdłuższych sekwencji dni bez opadu oraz najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym w poszczególnych latach, a także analiza maksymalnych najdłuższych sekwencji dni bez opadu i z opadem bardzo silnym w wieloleciu 1951-2018.

Wszystkie obliczenia w niniejszym artykule zostały wykonane przy użyciu opracowanego przez autorkę oprogramowania Fortran oraz Python, dodatkowo wspierane i weryfikowane przez oprogramowanie Excel.

Obszar badawczy i charakterystyka danych pomiarowych

Obszar badań obejmuje zachodnią część dorzecza górnej Wisły. Całkowita powierzchnia dorzecza wynosi 33458 km² (w tym 1952,4 km² poza terytorium Polski) i według Cyberskiego i in. (2006) dotyczy odcinka o długości 399 km od źródła do ujścia Sanu. Tymczasem według Dynowskiej i Maciejewskiego (1991) dorzecze górnej Wisły to obszar zamknięty przekrojem wodowskazowym w Zawichoście, zaś według Rozporządzenia Dyrektora Regionalnego Zarządu Gospodarki Wodnej w Krakowie (z dnia 16 stycznia 2014 r.) region wodny górnej Wisły rozciąga się do ujścia Sanny włącznie. Istniejące rozbieżności nie wpływają na ogólną charakterystykę regionu, który obejmuje obszar polskich Karpat Zachodnich oraz część Podkarpacia. Zgodnie z powszechnie stosowanym systemem klasyfikacji klimatycznej Köppena (Peel i in. 2007), w wyższych częściach regionu występuje głównie klimat wilgotny kontynentalny z łagodnym latem i opadami przez cały rok. Wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza zaczyna dominować klimat subarktyczny ze srogą zimą, brakiem pory suchej i chłodnym latem, zaś w najwyższych partiach górskich przechodzi w klimat polarny tundry (Pidwirny 2006; Karamuz i in. 2021). Obszar dorzecza górnej Wisły charakteryzuje się dużym potencjałem powodziowym. Główne zagrożenie stanowią tu powodzie letnie spowodowane intensywnymi,

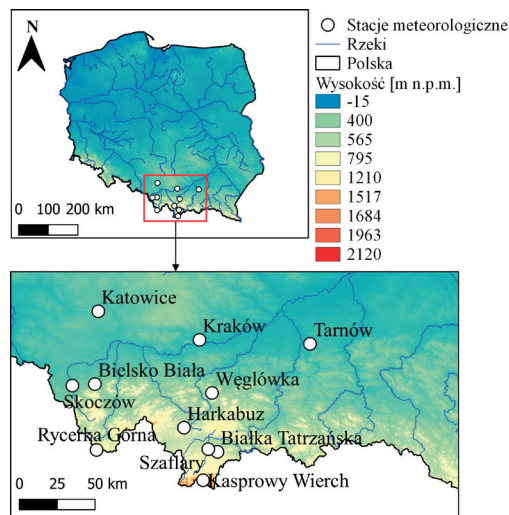
długotrwałymi opadami, podczas gdy wezbrania w środkowym i dolnym biegu Wisły wskazują głównie reżim powodzi roztopowych lub mieszanych roztopowo-opadowych (Dobrowolski i in. 2003, 2004; Markiewicz i in. 2020). Udział rocznego odpływu z dorzecza górnej Wisły w jej bilansie odpływu jest około 1,7 razy większy niż udział powierzchni dorzecza górnej Wisły w powierzchni jej dorzecza. Województwa położone w dorzeczu (zwłaszcza śląskie i małopolskie) mają najwyższy w Polsce wskaźnik gęstości zaludnienia, zatem potencjał zagrożenia powodziowego, tj. liczba ludności i jej mienie oraz potencjał gospodarczy, jest wyższy od przeciętnego w kraju. Straty i szkody powodziowe odnotowywane w dorzeczu górnej Wisły były znaczące. W latach 1953-2006 suma strat powodziowych w rejonie wodnym górnej Wisły stanowiła blisko 50% wszystkich strat powodziowych w Polsce, podczas gdy powierzchnia tego rejonu zajmuje zaledwie 15% powierzchni kraju (Raport NIK 2016).

W artykule zbadano serie dobowych opadów atmosferycznych sezonu letniego z okresu 1951-2018 (tj. 68 lat) dla jedenastu stacji meteorologicznych. Dane uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (IMGW-PIB). W tabeli 1 przedstawiono stacje meteorologiczne według ich lokalizacji w obrębie dorzeczy głównych rzek i dopływów. W nawiasach zaznaczono lewe i prawe dopływy Wisły. Następnie przedstawiono współrzędne geograficzne i wysokość n.p.m. oraz średnią sezonową i maksymalną wartość opadów dobowych w półroczu letnim (maj–październik) dla lat 1951-2018. Lokalizację stacji pokazano na rysunku 1.

Tabela 1. Podstawowe charakterystyki jedenastu stacji meteorologicznych analizowanych w artykule wraz ze średnim opadem półroczu letniego (maj–październik) oraz maksymalnym opadem dobowym w okresie 1951-2018.

Table 1. Basic characteristics of 11 meteorological stations analyzed in the article with the average precipitation in the summer half-year (May–October) and the maximum daily precipitation in the period 1951-2018.

Stacja	Dorzecze	Współrzędne geograficzne	Wysokość [m n.p.m.]	Średni opad półroczu letniego [mm]	Maksymalny opad dobowy [mm]
Skoczów	Wisła	18°79' E, 49°80' N	286	601	128,4
Bielsko-Biała	Biała (L)	19°05' E, 49°82' N	396	662	162,7
Katowice	Przemsza (R)	19°06' E, 50°26' N	278	452	74,1
Rycerka Górna	Soła (L)	19°03' E, 49°47' N	570	719	123,4
Węglówka	Raba(L)	20°08' E, 49°78' N	460	648	148,7
Kraków	Wisła	19°96' E, 50°05' N	237	453	99,0
Kasprowy Wierch	Dunajec (L)	19°98' E, 49°23' N	1991	1042	232,0
Szaflary	Dunajec (L)	20°03' E, 49°43' N	655	563	103,4
Białka Tatrzańska	Dunajec (L)	20°11' E, 49°39' N	624	561	112,0
Tarnów	Dunajec (L)	20°99' E, 50°01' N	209	472	110,8
Harkabuz	Czarna Orawa (Dorzecze Morza Czarnego)	19°83' E, 49°54' N	795	587	86,8



Rys. 1. Lokalizacja jedenastu stacji meteorologicznych analizowanych w artykule.

Fig. 1. Location of 11 meteorological stations analyzed in the article.

Polska położona jest na obszarze ścierania się mas powietrza morskiego napływającego z Oceanu Atlantyckiego (z zachodu) oraz mas powietrza kontynentalnego z Azji (ze wschodu). Od północy docierają do Polski wilgotne masy powietrza z Bałtyku, zaś od południa napływa gorące i suche powietrze z południowej części Europy, jednakże jest ono hamowane przez pasma górskie. Generalnie średnia roczna suma opadów wzrasta z północy na południe wraz z ogólnym wzniesieniem terenu. Najniższe sumy opadów rocznych (ok. 500 mm) obserwuje się w centralnej części kraju, najwyższe (ponad 1000 mm) w górach wysokich (w Tatrach) w dorzeczu górnej Wisły. Dorzecze górnej Wisły położone jest na obszarze trzech krain geograficznych, a jest to: pasmo górskie (Karpaty), pasmo dolin Podkarpacia oraz pasmo wyżyn. Rejon ten charakteryzuje się dużym zróżnicowaniem ukształtowania terenu, zwłaszcza w paśmie gór i dolin w prawobrzeżnej części dorzecza, co sprzyja występowaniu opadów orograficznych i konwekcyjnych.

Metody

Zgodnie z wytycznymi Światowej Organizacji Meteorologicznej WMO za opad mierzalny przyjmuje się dobową sumę opadów wynoszącą co najmniej 0,1 mm (WMO 2018). W celu zbadania częstości wystąpienia dobowych sum opadów o różnej wielkości, dla każdej ze stacji dokonano klasyfikacji opadów według podziału zaproponowanego przez Olechnowicz-Bobrowską (1970). Wyróżniono 6 klas odpowiadających następującym przedziałom dobowych sum opadów wyrażonych w [mm]:

- Klasa 1: (0; 0,1) – brak opadu.
- Klasa 2: <0,1; 1,0> – opad bardzo słaby.

- Klasa 3: (1,0; 5,0> – opad słaby.
- Klasa 4: (5,0;10,0> – opad umiarkowanie silny.
- Klasa 5: (10,0; 20,0> – opad silny.
- Klasa 6: > 20,0 – opad bardzo silny.

W celu analizy okresów bez opadu oraz z opadem bardzo silnym, dla każdej stacji meteorologicznej wyznaczono następujące wskaźniki:

- NP_0 – najdłuższa sekwencja dni bez opadu w sezonie letnim (maj–październik) dla indywidualnego roku 1951-2018.
- $maxNP_0$ – maksymalna najdłuższa sekwencja dni bez opadu w sezonie letnim (maj–październik) z okresu 1951-2018.
- NP_{20} – najdłuższa sekwencja dni z opadem bardzo silnym (tj. większym niż 20 mm) w sezonie letnim (maj–październik) dla indywidualnego roku 1951-2018.
- $maxNP_{20}$ – maksymalna najdłuższa sekwencja dni z opadem bardzo silnym (tj. większym niż 20 mm) w sezonie letnim (maj–październik) z okresu 1951-2018.

Tendencję zmian liczby dni bez opadu oraz liczby dni z opadem bardzo silnym w wieloleciu 1951-2018 zbadano przy użyciu testu Manna-Kendalla do wykrywania trendu w analizowanych seriach (Mann 1945; Kendall 1975). Jest to test nieparametryczny, powszechnie stosowany w analizie danych środowiskowych, klimatologicznych czy hydrologicznych (np. Hirsh i in. 1982; Gilbert 1987; Esterby 1996; Karamuz i in. 2021; Karamuz, Romanowicz 2021). Test opiera się na ocenie korelacji rang dla badanych wartości serii i ich kolejności w czasie. Statystyka testowa obliczana jest z następującego równania:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

gdzie n jest liczbą elementów w serii oraz:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} +1 & \text{if } (x_j - x_k) > 0 \\ 0 & \text{if } (x_j - x_k) = 0 \\ -1 & \text{if } (x_j - x_k) < 0 \end{cases} \quad (2)$$

Istotność statystyczna trendu testowana jest przez porównanie standaryzowanej statystyki testowej Z (zadanej równaniem (3)) ze standardowym skumulowanym rozkładem normalnym na wybranym poziomie istotności α .

$$Z = \begin{cases} \frac{S - 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S > 0 \\ 0 & \text{if } S = 0 \\ \frac{S + 1}{\sqrt{\text{Var}(S)}} & \text{if } S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

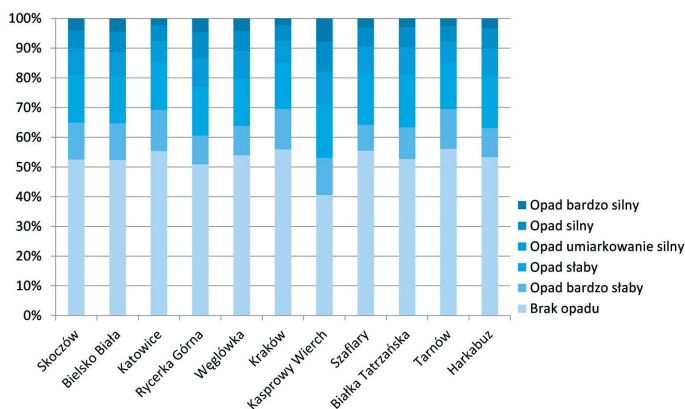
Dodatnie wartości statystyki Z wskazują na trend rosnący, natomiast ujemne wartości Z wskazują na trend malejący. Trend jest statystycznie istotny na poziomie istotności $\alpha = 0,05$, gdy wartość bezwzględna jest większa niż 1,96.

Wyniki i dyskusja

Częstość dobowych sum opadów o różnej wielkości

Średnią częstość wystąpienia dni z określoną intensywnością opadów, w tym częstość wystąpienia dni bez opadów oraz dni z opadem bardzo silnym w badanym wieloleciu, przedstawiono na rysunku 2.

Na powyższym rysunku można zauważyć prawidłowości związane z lokalizacją poszczególnych stacji i ich wysokością n.p.m. Na przykład, położone blisko siebie o podobnej wysokości n.p.m. stacje Skoczów i Bielsko Biala wykazują niemal identyczną częstość dni dla każdej z klas. Podobną zgodność obserwuje się dla trzech stacji: sąsiadujących ze sobą stacji Szaflary i Białka Tatrzańska oraz nieco oddalonej stacji Harkabuz. Dwie pierwsze stacje położone są niemal na tej samej wysokości n.p.m. (różnica wynosi zaledwie 31 m), natomiast stacja Harkabuz jest usytuowana nieco wyżej i znajduje się po przeciwnej stronie pasma górskiego. Kolejną grupą wykazującą dużą zgodność w częstości dobowych sum opadów o dowolnej wielkości są trzy stacje zlokalizowane w północnej części badanego obszaru, czyli Katowice, Kraków, Tarnów. Są to stacje o najniższych wzniesieniach n.p.m. spośród badanych stacji i wykazują największą częstość dni bez opadu oraz najmniejszą częstość dni z opadem bardzo silnym. Odwrotną prawidłowość obserwuje się dla najwyższej wzniesionej n.p.m. stacji Kasprowy Wierch, gdzie liczba dni



Rys. 2. Częstość [%] dni z opadem dla poszczególnych klas dla półrocza letniego (maj–październik) w okresie 1951–2018.

Fig. 2. Frequency [%] of days with precipitation for individual classes for the summer half-year (May–October) in the period 1951–2018.

bez opadu jest najmniejsza, zaś liczba dni z opadem bardzo silnym jest największa spośród stacji analizowanych w artykule.

Częstość dni bez opadu dla badanego okresu 1951-2018 wynosi od 40,6% dla Kasprowego Wierchu do 56% dla Tarnowa, zaś częstość dni z opadem bardzo silnym wynosi od 2,3% dla Krakowa do 7,8% dla Kasprowego Wierchu. Gdy wyłączymy z zestawienia wysokogórską stację Kasprowy Wierch, to najmniejszą częstość dni bez opadu oraz największą częstość dni z opadem bardzo silnym wykazuje Rycerka Górna i wartości te wynoszą odpowiednio 50,9% dla częstości dni bez opadu oraz 4,7% dla częstości dni z opadem bardzo silnym.

Okresy bez opadu

Utrzymujące się długotrwałe okresy bez opadów w połączeniu z wysoką temperaturą i niską wilgotnością powietrza mogą prowadzić do suszy meteorologicznej (atmosferycznej), co negatywnie oddziałuje na wegetację roślin oraz wielkość i jakość plonów. Następstwem suszy meteorologicznej może być susza hydrologiczna, której skutkiem jest niskie zaopatrzenie w wodę widoczne zwłaszcza w ciekach, zbiornikach i stanach wód gruntowych. Susza meteorologiczna może rozpocząć się i zakończyć szybko, podczas gdy susza hydrologiczna rozwija się stopniowo, a odbudowa zasobów wodnych trwa znacznie dłużej.

Dla każdej z jedenastu analizowanych w artykule stacji zbadano zmienność (stacjonarność) liczby dni bez opadu w sezonie letnim (maj–październik) w okresie 1951-2018. Wykres zmienności liczby dni bez opadu pokazano na rysunku 3 (niebieska linia), zaś wyniki testu Manna-Kendalla na wykrycie trendu na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ przedstawiono w tabeli 2.

Jak widać na rysunku 3, a co potwierdzają wyniki testu Manna-Kendalla w tabeli 2, dla większości analizowanych stacji seria liczby dni bez opadu w półroczu letnim jest stacjonarna w badanym okresie 1951-2018. Jedynie cztery stacje: Skoczów, Rycerka Górna, Węglówka oraz Białka Tatrzańska wykazują statystycznie istotny trend malejący. Stacje te zlokalizowane są zarówno w zachodniej, jak i wschodniej części obszaru badawczego i reprezentują dość szeroki zakres wzniesienia nad poziomem morza, zatem wydaje się, że malejący trend w liczbie dni bez opadu związany jest z warunkami lokalnymi.

W celu analizy okresów bez opadu, dla każdego roku 1951-2018 wyznaczono najdłuższą sekwencję dni bez opadu w sezonie letnim NP_0 , co zilustrowano na rysunku 3 (zielona linia), a rozkład NP_0 w poszczególnych miesiącach sezonu letniego pokazano w tabeli 3. Maksymalną najdłuższą sekwencję dni bez opadu $maxNP_0$ z całego okresu 1951-2018 wraz z udziałem procentowym w stosunku do całkowitej liczby dni bez opadu dla danego roku oraz datę wystąpienia zjawiska przedstawiono w tabeli 4.

W tabeli 3 można zauważyć, iż dla dziewięciu spośród jedenastu badanych stacji najwięcej najdłuższych sekwencji dni bez opadu NP_0 występuje w październiku. Dla stacji Szaflary liczba najdłuższych sekwencji dni bez opadu NP_0 jest równa dla września i października (po 22 dni), zaś dla stacji Katowice miesiącem o największej liczbie NP_0 jest wrzesień. Najmniejsza liczba najdłuższych sekwencji dni bez opadu NP_0 występuje

dla większości stacji w czerwcu. Dla trzech stacji: Bielsko-Biała, Harkabuz i Kasprowy, dwa miesiące – maj i czerwiec wykazują taką samą liczbę NP_0 , zaś dla stacji Katowice miesiącem z najmniejszą liczbą najdłuższych sekwencji dni bez opadu NP_0 jest maj. Specyfika Katowic związana jest z lokalizacją stacji meteorologicznej na lotnisku, gdzie notuje się zwiększone prędkości wiatru mogące wpływać na dokładność pomiarów opadów, a także z wysokim zanieczyszczeniem powietrza w Katowicach.

Tabela 2. Wyniki testu Manna-Kendalla ($\alpha = 0,05$) na wykrycie trendu w serii liczby dni bez opadu w półroczu letnim (maj–październik) w okresie 1951-2018.

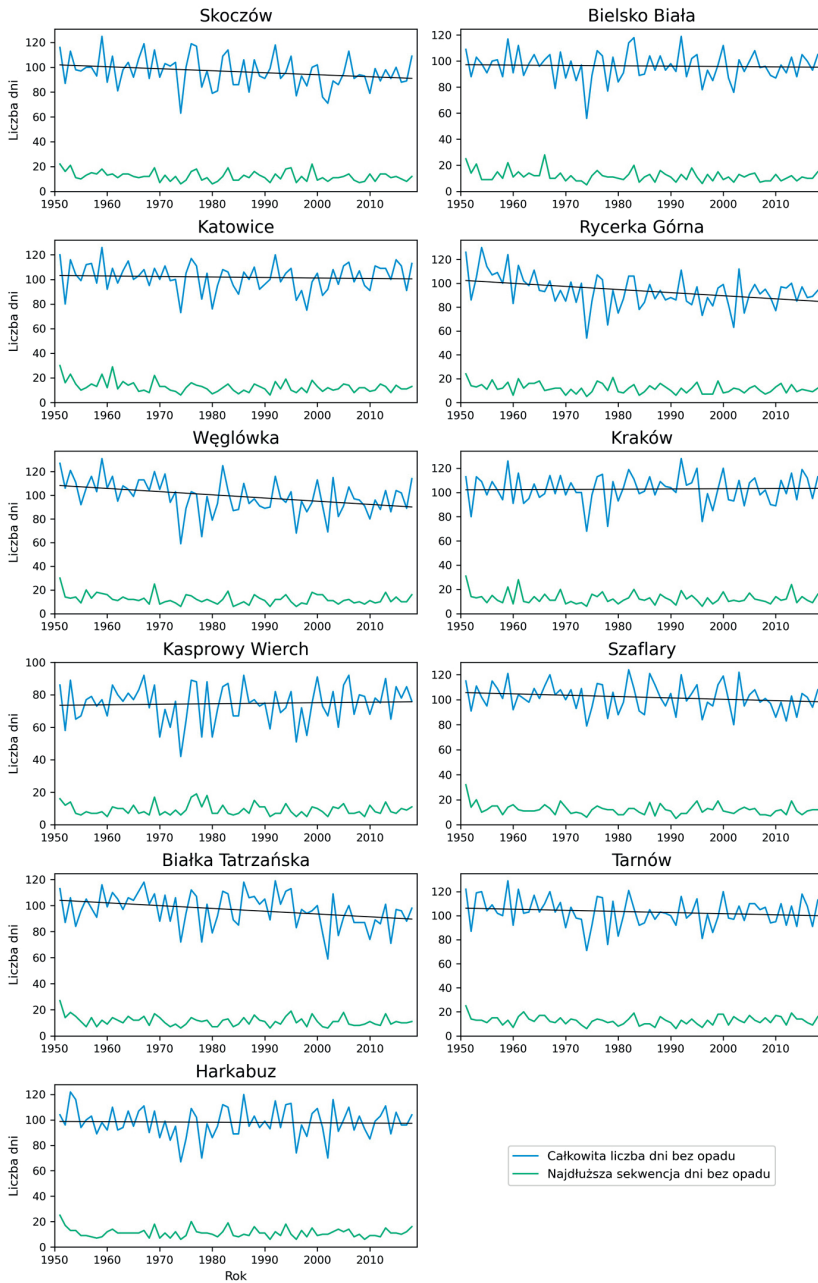
Table 2. Results of the Mann-Kendall test ($\alpha = 0.05$) for the detection of the trend in the series of the number of days without precipitation in the summer half-year (May–October) in the period 1951-2018.

Stacja	Z	Trend
Skoczów	-2,029	malejący
Bielsko Biała	-0,424	brak trendu
Katowice	-0,551	brak trendu
Rycerka Górna	-2,792	malejący
Węglówka	-3,496	malejący
Kraków	0,180	brak trendu
Kasprowy Wierch	0,366	brak trendu
Szaflary	-1,606	brak trendu
Białka Tatrzańska	-2,612	malejący
Tarnów	-1,452	brak trendu
Harkabuz	-0,143	brak trendu

Tabela 3. Liczba najdłuższych sekwencji dni bez opadu NP_0 w poszczególnych miesiącach półroczu letniego (maj–październik) w okresie 1951-2018.

Table 3. The number of the longest sequences of days without precipitation NP_0 in the individual months of the summer half-year (May–October) in the period 1951-2018.

Stacja	Maj	Czerwiec	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik
Skoczów	9	5	9	10	15	20
Bielsko Biała	5	5	12	10	13	23
Katowice	6	7	15	10	16	14
Rycerka Górna	8	2	12	11	12	23
Węglówka	9	4	11	12	9	23
Kraków	10	6	9	15	11	17
Kasprowy Wierch	2	2	12	8	16	28
Szaflary	7	1	9	7	22	22
Białka Tatrzańska	8	4	13	7	16	20
Tarnów	9	2	9	13	17	18
Harkabuz	5	5	13	9	12	24



Rys. 3. Całkowita liczba dni bez opadu oraz najdłuższa sekwencja dni bez opadu w półroczu letnim (maj–październik) dla poszczególnych lat okresu 1951-2018.

Fig. 3. The total number of days without precipitation and the longest sequence of days without precipitation in the summer half-year (May–October) for the individual years of the period 1951-2018.

Tabela 4. Charakterystyka maksymalnych najdłuższych sekwencji dni bez opadu $maxNP_0$ w sezonie letnim (maj–październik) z okresu 1951-2018.

Table 4. Characteristics of the maximum longest sequences of days without precipitation $maxNP_0$ in the summer half-year (May–October) from the period 1951-2018.

Stacja	$maxNP_0$ [dni]	Udział $maxNP_0$ w całkowitej liczbie dni suchych [%]	Data wystąpienia $maxNP_0$	Uwagi dotyczące zakończenia $maxNP_0$
Skoczów	22	19	1951.09.30-10.21	1951.10.22 (d)
	22	22	1999.09.03-09.24	1999.09.25 (d)
Bielsko Biała	28	28	1966.09.14-10.11	1966.10.12 (d)
Katowice	30	25	1951.10.02-10.31	1951.11.01 (d)
Rycerka Górna	24	19	1951.09.29-10.22	1951.10.23 (d)
Węglówka	30	24	1951.10.02-10.31	1951.11.02 (d)
Kraków	31	27	1951.10.01-10.31	1951.11.01 (d)
Kasprowy Wierch	19	22	1977.10.12-10.30	1977.10.31 (d)
Szaflary	32	28	1951.09.30-10.31	1951.11.02 (s)
Białka Tatrzańska	27	24	1951.10.05-10.31	1951.11.01 (d)
Tarnów	25	20	1951.10.07-10.31	1951.11.01 (d)
Harkabuz	25	24	1951.10.07-10.31	1951.11.01 (d)

Oznaczenia: (d) – opad deszczu, (s) – opad śniegu.

Wyniki przedstawione w tabeli 4 oraz na rysunku 3 (zielona linia) wskazują na wyróżniający się rok 1951, kiedy to dla dziewięciu z jedenastu analizowanych stacji odnotowano maksymalną najdłuższą sekwencję dni bez opadu w badanym wieloleciu, która wynosiła od 22 dni dla Skoczowa do 32 dni dla stacji Szaflary. W roku 1951 w całym regionie od końca września przez cały październik panował długi okres bez opadów, jednakże wystąpienie w drugiej połowie października niewielkiego jednodniowego opadu deszczu w Bielsko-Białej oraz opadu śniegu na Kasprowym Wierchu sprawiły, że maksymalna najdłuższa sekwencja dni bez opadu przypada dla tych stacji odpowiednio na rok 1966 oraz 1977. Długie sekwencje $maxNP_0$ wystąpiły w roku 1951 dla Krakowa (31 dni) oraz Katowic i Węglówki (30 dni). Dla stacji Skoczów wartość $maxNP_0$ wynosi 22 dni i występuje dwukrotnie – w roku 1951 oraz w 1999, w obu przypadkach maksymalne najdłuższe sekwencje dni bez opadu odnotowano wczesną jesienią. Podobną prawidłowość co do występowania $maxNP_0$ można zauważyć na pozostałych stacjach, tj. wszystkie $maxNP_0$ badanego wielolecia przypadają na drugą połowę września oraz październik. Tymczasem okresem o stosunkowo krótkich maksymalnych sekwencjach dni bez opadu w regionie jest pierwsza połowa lat 70., przełom lat 80. i 90. oraz lata 2014-2017.

Maksymalne najdłuższe sekwencje $maxNP_0$, zanotowane dla poszczególnych stacji, związane są z suszami lub okresami posuszonymi, które wystąpiły w rejonie górnej Wisły, a zwłaszcza z głęboką suszą, która rozpoczęła się latem 1951 roku i trwała 9 miesięcy, przy czym swoim zasięgiem objęła znaczną część Polski (Kaczorowska 1962; Farat i in. 1995; Łabędzki 2004; Cebulska 2016).

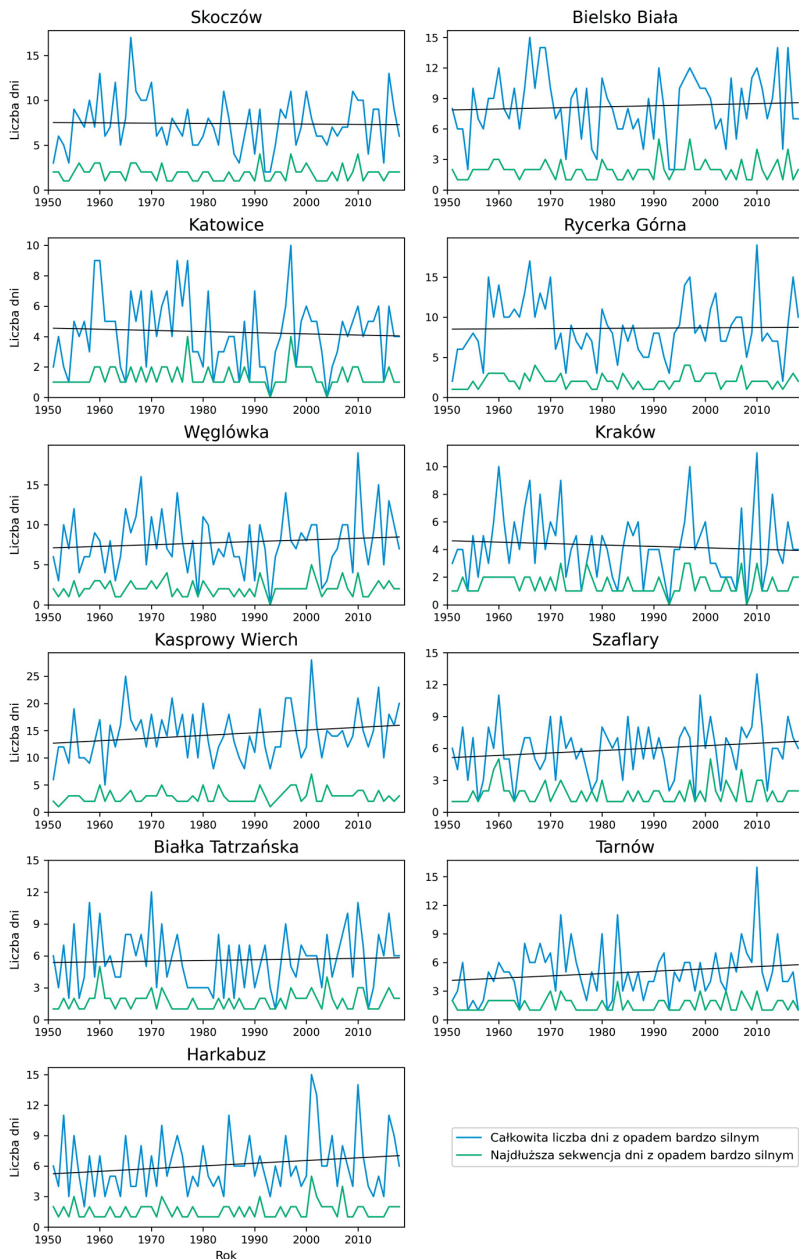
Okresy z opadem bardzo silnym

Bardzo silne opady atmosferyczne w półroczu letnim od maja do października niosą zagrożenie wystąpienia dużego wezbrania lub powodzi. Pojedyncze dni lub nawet godziny z opadem bardzo silnym są szczególnie niebezpieczne w obszarach miejskich, gdzie gęsta zabudowa terenu połączona nierzadko z mało efektywnym systemem kanalizacyjnym, może skutkować powodzią błyskawiczną (ang. *flash flood*). Jest to zjawisko niebezpieczne i destrukcyjne ze względu na dużą siłę strumieni wody, które niszczą infrastrukturę miejską i komunikacyjną. Powódź błyskawiczna jest zbliżona do powodzi górskiej, gdzie także mamy do czynienia z małą przepuszczalnością podłoża. Kolejnym czynnikiem wpływającym na zagrożenia powodziowe są obfite opady deszczu utrzymujące się przez kilka dni, co może prowadzić do przelania wody w korycie rzeczonym oraz do przesiąkania i przerwania wałów przeciwpowodziowych. W Polsce największe powodzie spowodowane były najczęściej ulewnymi deszczami trwającymi od 3 do 5 dni (Lorenc 1998; Niedźwiedź 1999, 2003). Ponadto, obfite opady deszczu nie są korzystne dla szaty roślinnej, w szczególności dla upraw rolniczych. W czasie intensywnych opadów większość deszczu spływa po powierzchni gruntu, a jedynie niewielka część wsiąka w głąb (Olechnowicz-Bobrowska 1970). Silne spływy powierzchniowe zwiększają erozję gleby i oddziałują negatywnie na rośliny.

Dla każdej ze stacji zbadano liczbę dni z opadem bardzo silnym (tj. o dobowej sumie większej niż 20 mm) w półroczu letnim, pod kątem zmienności w okresie 1951-2018. Wyniki zilustrowano na rysunku 4 (niebieska linia) oraz w tabeli 5, gdzie przedstawiono wartości statystyki testowej testu Manna-Kendalla.

Analiza wykazała stabilny przebieg liczby dni z opadem bardzo wysokim w wieloleciu 1951-2018 dla badanych stacji meteorologicznych. We wszystkich przypadkach testy wykazały brak istotności trendu. Uzyskane wyniki są zgodne z badaniami przeprowadzonymi przez autorkę nad stacjonarnością maksymalnych opadów dobowych sezonu letniego (nie opublikowane) oraz z literaturą, gdzie wykazano, że w przeciwieństwie do innych krajów europejskich, w Polsce i na Słowenii nie stwierdza się statystycznie istotnych trendów zarówno w sezonowych, jak i rocznych sumach opadów (Kozuchowski 2004; Niedźwiedź i in. 2015; Spinoni i in. 2016; Szwed 2019; Bogdanowicz i in. 2021).

W kolejnym etapie badań nad okresami z opadem bardzo silnym (dobowa suma większa niż 20 mm) dla każdego roku wyznaczono najdłuższą sekwencję dni z takim opadem w sezonie letnim NP_{20} , a przebieg zmienności dla każdej ze stacji przedstawiono na rysunku 4 (zielona linia). Widać, iż pierwsza połowa lat 50. oraz druga połowa lat 80. to okres, w którym dominowały krótkie sekwencje dni z opadem bardzo silnym, zwykle nie przekraczające 2 dni. Rekordowy pod tym względem był rok 1993, kiedy to dla ośmiu stacji opad bardzo silny występował maksymalnie przez 1 dzień w półroczu, zaś dla pozostałych trzech stacji (Katowice, Kraków, Węglówka) nie występował ani razu. Ponadto brak opadu bardzo silnego zanotowano w roku 2008 w Krakowie. Widać zatem tendencję do braku opadu bardzo silnego dla stacji o niższych wysokościach n.p.m., co jest zgodne z częstością wystąpienia takich dni w wieloleciu 1951-2018 przedstawionej na rysunku 2.



Rys. 4. Całkowita liczba dni z opadem bardzo silnym oraz najdłuższa sekwencja dni z opadem bardzo silnym w półroczu letnim (maj–październik) dla poszczególnych lat okresu 1951-2018.

Fig. 4. The total number of days with very heavy precipitation and the longest sequence of days with very heavy precipitation in the summer half-year (May–October) for the individual years of the period 1951-2018.

Rozkład najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym NP_{20} w poszczególnych miesiącach sezonu letniego pokazano w tabeli 6, zaś w tabeli 7 wskazano maksymalną w badanym wieloleciu najdłuższą sekwencję dni z opadem bardzo silnym $maxNP_{20}$, wraz z datami wystąpienia każdego zjawiska.

Tabela 5. Wyniki testu Manna-Kendalla ($\alpha = 0,05$) na wykrycie trendu w serii liczby dni z opadem bardzo silnym w półroczu letnim (maj–październik) w okresie 1951-2018.

Table 5. Results of the Mann-Kendall test ($\alpha = 0.05$) for the detection of the trend in the series of the number of days with very heavy precipitation in the summer half-year (May–October) in the period 1951-2018.

Stacja	Z	Trend
Skoczów	0.011	brak trendu
Bielsko Biała	0.650	brak trendu
Katowice	-0.177	brak trendu
Rycerka Górna	0.011	brak trendu
Węglówka	0.814	brak trendu
Kraków	-0.884	brak trendu
Kasprowy Wierch	1.767	brak trendu
Szaflary	1.411	brak trendu
Białka Tatrzańska	0.502	brak trendu
Tarnów	1.320	brak trendu
Harkabuz	1.283	brak trendu

Tabela 6. Liczba najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym NP_{20} w poszczególnych miesiącach półroczu letniego (maj–październik) w okresie 1951-2018.

Table 6. The number of the longest sequences of days with very heavy precipitation NP_{20} in the individual months of the summer half-year (May–October) in the period 1951-2018.

Stacja	Maj	Czerwiec	Lipiec	Sierpień	Wrzesień	Październik
Białka Tatrzańska	20	22	13	9	3	1
Bielsko Biała	21	22	12	7	4	2
Harkabuz	29	16	11	8	4	0
Kasprowy Wierch	16	16	18	10	5	3
Katowice	25	16	15	5	4	1
Kraków	19	23	14	8	2	0
Rycerka Górna	16	12	20	9	8	3
Skoczów	25	22	8	4	6	3
Szaflary	20	24	15	5	2	2
Tarnów	27	13	14	9	4	1
Węglówka	20	14	18	8	5	2

Tabela 7. Charakterystyka maksymalnych najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym $maxNP_{20}$ w sezonie letnim (maj–październik) z okresu 1951-2018.

Table 7. Characteristics of the maximum longest sequences of days with very heavy precipitation $maxNP_{20}$ in the summer half-year (May–October) from the period 1951-2018.

Stacja	$maxNP_{20}$ [dni]	Data wystąpienia $maxNP_{20}$
Białka Tatrzańska	5	1960.07.23-27
Bielsko Biała	5	1991.08.01-05, 1997.07.05-09
Harkabuz	5	2001.07.23-27
Kasprowy Wierch	7	2001.07.21-27
Katowice	4	1977.07.30-08.02, 1997.07.05-08
Kraków	3	1972.08.20-22, 1977.07.30-08.01 1996.08.29-31, 1997.07.05-07 2007.09.05-07, 2010.05.15-17
Rycerka Górna	4	1967.06.08-11, 1996.09.05-08 1997.07.05-08, 2007.09.05-08
Skoczów	4	1991.08.01-04, 1997.07.05-08 2010.05.15-18
Szaflary	5	1960.07.23-27, 2001.07.23-27
Tarnów	4	1983.07.11-14
Węglówka	5	2001.07.22-26

W związku z wystąpieniem lat bez opadów bardzo silnych na stacji Katowice (2 lata), Kraków (2 lata) i Węglówka (1 rok) (rysunek 4 – zielona linia), suma liczb w wierszach odpowiadających tym stacjom nie sumuje się do 68 lat, ale odpowiednio do 66 i 67. Dla pięciu stacji maj jest miesiącem z największą liczbą najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym NP_{20} , zaś dla czterech stacji maj zajmuje drugie miejsce za czerwcem, a w dwóch przypadkach (Kasprowy Wierch i Rycerka Górna) drugie miejsce za lipcem. Na stacji Kasprowy Wierch najwięcej najdłuższych sekwencji NP_{20} występuje w lipcu, zaś maj i czerwiec zajmują *ex aequo* drugie miejsce. W przypadku Rycerki Górnej, największą liczbę sekwencji NP_{20} odnotowano w lipcu, maj jest na drugim miejscu, a czerwiec na trzecim. Generalnie największą liczbę najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym NP_{20} obserwuje się w maju, czerwcu i lipcu, zaś zdecydowanie najmniejsza liczba najdłuższych sekwencji NP_{20} występuje w październiku, włącznie z brakiem takiej sekwencji w całym okresie 1951-2018 dla stacji Kraków i Harkabuz.

Wyniki zaprezentowane w tabeli 7 oraz na rysunku 4 (zielona linia) pokazują, iż maksymalna najdłuższa sekwencja dni z opadem bardzo silnym $maxNP_{20}$ wynosiła od 3 dni dla Krakowa do 7 dni dla Kasprowego Wierchu. Należy jednak zaznaczyć, że zanotowany na stacji Kasprowy Wierch rekord 7 dni jest wyjątkiem, gdyż kolejna najdłuższa sekwencja dni z opadem bardzo silnym dla indywidualnego roku NP_{20} równa 6 dni nie występuje ani razu, zaś „normą” jest NP_{20} równe 5 dni (występuje 8 razy w wieloleciu). Dla pięciu z jedenastu stacji zanotowano $maxNP_{20}$ równy 5 dni, zaś dla czterech stacji są to 4 dni. Jedną z tych stacji są Katowice, gdzie występujące dwukrotnie 4-dniowe

sekwencje $maxNP_{20}$ można uznać za wyjątkowe, gdyż kolejne 3-dniowe sekwencje dni z opadem bardzo silnym dla indywidualnego roku NP_{20} nie pojawiają się ani razu, zaś licznie reprezentowane są dopiero sekwencje 2-dniowe (aż 21 razy). Okresami, które najczęściej pojawiają się w zestawieniu $maxNP_{20}$ są obfite lipcowe opady w roku 1997 (5 stacji) oraz w roku 2001 (4 stacje). W wymienionych latach ulewne opady i burze spowodowały wylanie wody w dorzeczu wielu rzek, a także przesiąkanie i przerwanie wałów przeciwpowodziowych nie tylko w rejonie górnej Wisły. Szczególnie dotkliwa była powódź w 1997 roku, nazywana powodzią tysiąclecia, która nawiedziła południową i zachodnią Polskę, a także Czechy, wschodnie Niemcy, Słowację oraz wschodnią Austrię. W Polsce zginęły wówczas 54 osoby, a straty materialne oszacowano na 2-4 miliardów dolarów (Kundzewicz 2007). Najbardziej dotknięty został teren dorzecza górnej Odry (na czele z miastami Wrocław i Opole), jednakże nie oszczędzony został też obszar dorzecza górnej Wisły z największymi stratami w rejonie podgórskim oraz w Krakowie. Powódź w roku 2001 dotknęła przede wszystkim obszar dorzecza górnej Wisły, w wielu miastach i miasteczkach tego regionu zniszczone zostały mosty, kanalizacja, wodociągi, gazociągi, domy i gospodarstwa domowe. W całej Polsce zginęło wówczas 26 osób, zaś szkody wyceniono na 4 miliardy złotych (Appeal No. 23/2001). Inne powodzie historyczne, które miały miejsce w badanym rejonie górnej Wisły, są także reprezentowane przez $maxNP_{20}$ w tabeli 7, tj. lipiec 1960, początek sierpnia 1977 oraz maj 2010. Szczególnie dotkliwa była ta ostatnia – powódź w 2010 roku, która objęła zasięgiem wiele krajów Europy Środkowej i była jedną z największych powodzi w Polsce w ostatnich latach. Na skutek obfitych deszczów w wielu miejscach (np. w Krakowie) w połowie maja poziom wody przekroczył poziom notowany podczas powodzi tysiąclecia w 1997 roku. Zniszczonych zostało wiele wałów przeciwpowodziowych na rzekach z dorzecza zarówno Wisły, jak i Odry, zaś po przejściu fali powodziowej wystąpiły liczne osuwiska ziemi. W czasie powodzi zginęło w Polsce 19 osób, a straty materialne wyniosły ponad 10 mld złotych (EC 2014).

Podsumowanie i wnioski

W artykule przeprowadzono analizę skrajnych warunków opadowych w dorzeczu górnej Wisły na podstawie dobowych sum opadów atmosferycznych półroczu letniego (maj–październik) pochodzących z jedenastu stacji meteorologicznych dla okresu 1951-2018. Badania obejmowały ocenę częstości wystąpienia dni bez opadów oraz dni z opadem bardzo silnym (powyżej 20 mm na dobę), a także badanie trendu w serii liczby dni bez opadu oraz liczby dni z opadem bardzo silnym. Ponadto analizowano długość oraz czas (miesiąc) wystąpienia najdłuższych okresów bez opadu NP_0 oraz najdłuższych okresów z opadem bardzo silnym NP_{20} w poszczególnych latach. Podobne oceny przeprowadzono dla maksymalnych w wieloleciu 1951-2018 najdłuższych sekwencji dni bez opadu $maxNP_0$ oraz dni z opadem bardzo silnym $maxNP_{20}$. Na podstawie przeprowadzonych badań można wysunąć następujące wnioski:

1. Obserwuje się prawidłowości w częstości występowania dobowych sum opadów o różnej wielkości związanych z lokalizacją poszczególnych stacji i ich wysokością n.p.m. Na przykład, położone blisko siebie o podobnej wysokości n.p.m. stacje Skoczów i Bielsko Biała wykazują niemal identyczną częstość dni dla każdej z klas. Kolejną grupę stanowią stacje Szaflary, Białka Tatrzańska i Harkabuz, a także zlokalizowane na najniższych (spośród rozpatrywanych) wysokościach n.p.m. stacje Katowice, Kraków, Tarnów.
2. Częstość dni bez opadu dla badanego okresu 1951-2018 wynosi od 40,6% dla Kasprowego Wierchu do 50,6% dla Tarnowa, zaś częstość dni z opadem bardzo silnym wynosi od 2,3% dla Krakowa do 7,8% dla Kasprowego Wierchu.
3. Dla siedmiu stacji seria liczby dni bez opadu w półroczu letnim jest stacjonarna w badanym okresie 1951-2018. Jedynie cztery stacje: Skoczów, Rycerka Górna, Węglówka oraz Białka Tatrzańska, wykazują statystycznie istotny trend malejący.
4. Dla badanych stacji najdłuższe sekwencje dni bez opadu NP_0 występują najczęściej we wrześniu i w październiku, zaś najrzadziej w maju i w czerwcu.
5. Maksymalne najdłuższe sekwencje dni z bez opadu $maxNP_0$ wynoszą od 19 dni dla Kasprowego Wierchu do 32 dni dla stacji Szaflary. Długie sekwencje $maxNP_0$ występują także dla Krakowa (31 dni) oraz Katowic i Węglówki (30 dni).
6. Maksymalne najdłuższe sekwencje $maxNP_0$ zanotowane dla poszczególnych stacji związane są z suszami lub okresami posuszonymi, które wystąpiły w rejonie górnej Wisły, a zwłaszcza z 9-miesięczną głęboką suszą w latach 1951-1952, która swoim zasięgiem objęła znaczną część Polski.
7. Dla wszystkich badanych stacji seria liczby dni z opadem bardzo wysokim w półroczu letnim jest stacjonarna w wieloleciu 1951-2018, test nie wykazuje statystycznie istotnych trendów.
8. Największą liczbę najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym NP_{20} dla badanych stacji notuje się w maju, czerwcu i lipcu, zaś najmniejszą liczbę sekwencji NP_{20} notuje się w październiku (lub jej brak dla stacji Kraków i Harkabuz).
9. Maksymalne najdłuższe sekwencje dni z opadem bardzo silnym $maxNP_{20}$ wynoszą od 3 dni dla Krakowa do 7 dni dla Kasprowego Wierchu oraz 4 lub 5 dni dla pozostałych stacji.
10. Maksymalne najdłuższe sekwencje $maxNP_{20}$ zanotowane dla poszczególnych stacji odzwierciedlają powodzie historyczne, które nawiedziły rejon górnej Wisły, a są to w szczególności lata 1997, 2001 oraz 2010.

Przedstawiona w artykule analiza okresów bez opadów oraz okresów z opadem bardzo silnym uzupełnieniem dotychczasową charakterystykę hydrometeorologiczną dorzecza górnej Wisły i może stanowić materiał porównawczy dla przyszłych opracowań dotyczących tego regionu.

Podziękowania

Badania zostały częściowo sfinansowane przez Ministerstwo Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach działalności statutowej nr 3841/E-41/S/2021 oraz przez projekty HUMDROUGHT nr 2018/30/Q/ST10/00654 i COST Action CA17109. Autorka dziękuje dr hab. Ewie Bogdanowicz za wsparcie w pozyskaniu danych oraz dr Emilii Karamuz za wsparcie kartograficzne. Autorka dziękuje również Instytutowi Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowemu Instytutowi Badawczemu (IMGW-PIB) w Warszawie za udostępnienie danych.

L i t e r a t u r a

- Appeal No. 23/2001, Poland: Floods final report, 2003, International Federation of Red Cross And Red Crescent Societies, dostępne online <https://reliefweb.int/report/poland/poland-floods-final-report-appeal-no-232001> (09.11.2021)
- Bogdanowicz E., Karamuz E., Romanowicz R.J., 2021, Temporal changes in flow regime along the River Vistula, *Water*, 13 (20), 2840, DOI: 10.3390/w13202840
- Cebulak E., 1991a, Najwyższe zanotowane maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły i ich geneza, *Acta Universitatis Wratislaviensis*, 1213, *Prace Instytutu Geograficznego, Seria A*, V, 167-171
- Cebulak E., 1991b, Wpływ wysokości nad poziomem morza i ekspozycji terenu na maksymalne opady dobowe w Karpatach Zachodnich, *Prace Geograficzne*, 83, 104-117
- Cebulak E., 1992, Wpływ sytuacji synoptycznej na maksymalne opady dobowe w dorzeczu górnej Wisły, *Folia Geographica. Series Geographica-Physica*, 23, 81-95
- Cebulak E., 1998, Kształtowanie się wielkości opadów na obszarze województwa miejskiego krakowskiego, *Folia Geographica, Series geographica-physica*, 3, 411-416
- Cebulska M., 2016, Niedobory opadów atmosferycznych w okresie wegetacyjnym w zlewni Małej Wisły (1984-2013), *Acta Scientiarum Polonorum Formatio Circumiectus*, 15 (2), 13-26
- Cebulska M., 2018, Okresy bez opadów i ze słabymi opadami w polskich Karpatach (1984-2013), *Polish Journal of Agronomy*, 34, 52-61, DOI: 10.26114/pja.iung.355.2018.34.06
- Cebulska M., Twardosz R., 2010, Zmienność czasowa najniższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych w dorzeczu górnej Wisły (1901-2000), *Przegląd Geofizyczny*, 3-4, 175-188
- Cebulska M., Twardosz R., 2012, Zmienność czasowa najwyższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych w Polskich Karpatach Zachodnich (1951-2005), *Prace Geograficzne*, 128, 123-134
- Cebulska M., Twardosz R., 2020, Zróżnicowanie skrajnych sum miesięcznych opadów atmosferycznych w polskich Karpatach Zachodnich i ich przedpolu, *Przegląd Geofizyczny*, 1-2, 55-69, DOI: 10.32045/PG-2020-004
- Cyberski J., Grześ M., Gutry-Korycka M., Nachlik E., Kundzewicz Z.W., 2006, History of floods on the River Vistula, *Hydrological Sciences Journal*, 51, 799-817, DOI: 10.1623/hysj.51.5.799
- Dobrowolski A., Czarnecka H., Ostrowski J., Zaniewska M., 2004, Floods in Poland from 1946 to 2001 – origin, territorial extent and frequency, *Polish Geological Institute Special Papers*, 15, 69-76

- Dobrowolski A., Ostrowski J., Żelaziński J., 2003, Rainfall floods in Poland from 1946-2001, [w:] Proceedings of the Scientific Conference "The extreme hydrological and meteorological phenomena", Warszawa, Polska, 8-9 grudnia
- Dynowska I., Maciejewski M. (red.), 1991, Dorzecze górnej Wisły: opracowanie zbiorowe. Część 1, Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 341 s.
- EC, 2014, Evaluation of the civil protection mechanism. Case study report - Floods in Poland 2010, European Commission, dostępne online https://ec.europa.eu/echo/files/evaluation/2015/CPM_case_study_poland_en.pdf (09.11.2021)
- Esterby S.R., 1996, Review of methods for the detection and estimation of trends with emphasis on water quality applications, *Hydrological Processes*, 10 (2), 127-149, DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199602)10:2<127::AID-HYP354>3.0.CO;2-8
- Farat R., Kępińska-Kasprzak M., Kowalczyk P., Mager P., 1995, Susza na obszarze Polski w latach 1951-1990, *Materiały Badawcze. Seria: Gospodarka wodna i ochrona wód*, 16
- Gilbert R.O., 1987, *Statistical methods for environmental pollution monitoring*; John Wiley & Sons, Inc., New York, 208 s.
- MWO, 2018, Guide to climatological practices, WMO-No. 100, Genewa, dostępne online https://library.wmo.int/doc_num.php?explnum_id=5541 (09.11.2021)
- Hall J., Blöschl G., 2018, Spatial patterns and characteristics of flood seasonality in Europe. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (7), 3883-3901, DOI: 10.5194/hess-22-3883-2018
- Hao Z., Singh V.P., Xia Y., 2018, Seasonal drought prediction: Advances, challenges, and future prospects, *Reviews of Geophysics*, 56 (1), 108-141, DOI: 10.1002/2016RG000549
- Hasson S., Lucarini V., Pascale S., Böhner J., 2014, Seasonality of the hydrological cycle in major South and Southeast Asian river basins as simulated by PCMDI/CMIP3 experiments, *Earth System Dynamics*, 5 (1), 67-87, DOI: 10.5194/esd-5-67-2014
- Hess M., 1965, Piętra klimatyczne w polskich Karpatach Zachodnich, *Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego*, 115, *Prace Geograficzne*, 11, 267 s.
- Hirsch R.M., Slack J.R., Smith R.A., 1982, Techniques of trend analysis for monthly water quality data, *Water Resources Research*, 18 (1), 107-121, DOI: 10.1029/WR018i001p00107
- Izmailow B., Kaszowski L., Krzemień K., Święchowicz J., 1995, Rzeźba, [w:] *Karpaty Polskie - przyroda, człowiek i jego działalność*, J. Warszczyńska (red.), Uniwersytet Jagielloński, Kraków
- Kaczorowska Z., 1962, Najsuchsze i najwilgotniejsze pory roku w Polsce w okresie 1900-1959, *Przeгляд Geofizyczny*, 3, 175-183
- Karamuz E., Bogdanowicz E., Senbeta T.B., Napiórkowski J.J., Romanowicz R.J., 2021, Is it a drought or only a fluctuation in precipitation patterns? - Drought reconnaissance in Poland, *Water*, 13 (6), 807, DOI: 10.3390/w13060807
- Karamuz E., Romanowicz R.J., 2021, Temperature changes and their impact on drought conditions in winter and spring in the Vistula Basin, *Water*, 13 (14), 1973, DOI: 10.3390/w13141973
- Kendall M.G., 1975, *Rank correlation methods*; Charles Griffin, London, 202 s.
- Kochanek K., Strupczewski W.G., Bogdanowicz E., 2012, On seasonal approach to flood frequency modelling. Part II: Flood frequency analysis of Polish rivers, *Hydrological Processes*, 26 (5), 717-730, DOI: 10.1002/hyp.8178

- Kostrakiewicz L., 1967, Nomogram do obliczania średnich rocznych sum opadowych w Karpatach Polskich poniżej poziomu inwersji, *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 2 (15), 129-146
- Kostrakiewicz L., 1977, Opady atmosferyczne w terenach nawietrznych i zawietrznych polskich Karpat, *Czasopismo Geograficzne*, 48 (2), 131-141
- Kowanetz L., 1981, Charakterystyka posuch atmosferycznych w polskich Karpatach, *Problemy Zagospodarowania Ziemi Górskich*, 22, 135-153
- Kożuchowski K. (red.), 2004, Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w XX i XXI wieku, [w:] *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*, K. Kożuchowski (red.), Wydawnictwo Biblioteka, Łódź, 47-58
- Kundzewicz Z.W., 2007, Summer 1997 flood in Poland in perspective. [w:] *Extreme hydrological events: New concepts for security*, O.F. Vasiliev, P.H.A.J.M. van Gelder, E.J. Plate, M.V. Bolgov (ed.), Springer, 97-110
- Lorenc H., 1998, The meteorological causes magnitude and effect of disastrous rainfalls in Poland in July 1997, [w:] *Proceedings of the 2nd European Conference on Applied Climatology, ECAC'98*, Wiedeń, Austria, 19-23 października
- Łabędzki L., 2004, Problematyka susz w Polsce, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 4, 47-66
- Mann H.B., 1945, Nonparametric tests against trend, *Econometrica*, 13 (3), 245-259, DOI: 0012-9682(194507)13:3<245:NTAT>2.0.CO;2-U
- Marengo J., 2015, Review extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts, *International Journal of Climatology*, 36, DOI: 10.1002/joc.4420
- Markiewicz I., Bogdanowicz E., Kochanek K., 2020, On the uncertainty and changeability of the estimates of seasonal maximum flows, *Water*, 12 (3), 704, DOI: 10.3390/w12030704
- Młyński D., Cebulska M., Wałęga A., 2018, Trends, variability, and seasonality of maximum annual daily precipitation in the Upper Vistula Basin, Poland, *Atmosphere* 9 (8), 313, DOI: 10.3390/atmos9080313
- Niedźwiedz T., 1981, Sytuacje synoptyczne i ich wpływ na zróżnicowanie przestrzenne wybranych elementów klimatu w dorzeczu górnej Wisły, *Rozprawy Habilitacyjne UJ*, 58, 165 s.
- Niedźwiedz T., 2003, Extreme precipitation events on the northern side of the Tatra Mountain, *Geographia Polonica*, 76 (2), 13-21
- Niedźwiedz T., Łupikasza E., Pińskwar I., Kundzewicz Z.W., Stoffel M., Małarzewski Ł., 2015, Variability of high rainfalls and related synoptic situations causing heavy floods at the northern foothills of the Tatra Mountains, *Theoretical and Applied Climatology*, 119 (1-2), 273-284, DOI: 10.1007/s00704-014-1108-0
- Niedźwiedz T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat*. [w:] *Dorzecze górnej Wisły*, I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Kraków, 68-84
- Niedźwiedz T., 1999, Rainfall characteristics in southern Poland during the severe flooding event of July 1997, *Studia Geomorphologica Carpatho-Balcanica*, 33, 5-25
- Obrębska-Starkłowa B., Hess M., Olecki Z., Trepińska J., Kowanetz L., 1995, *Klimat*, [w:] *Karpaty polskie, przyroda, człowiek i jego działalność*, J. Warszyńska (red.), Wydawnictwo Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 31-47
- Olechnowicz-Bobrowska B., 1970, Częstość dni z opadem w Polsce, *Prace Geograficzne*, 86, 78 s.

- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J., Ozga-Zieliński B., 1999, Zasady obliczania największych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia przy projektowaniu obiektów budownictwa hydrotechnicznego. Dłgie ciągi pomiarowe przepływów, Materiały Badawcze. Seria: Hydrologia i Oceanologia, IMGW, Warszawa, 27 s.
- Parajka J., Kohnová S., Merz R., Szolgay J., Hlavčová K., Blöschl G., 2009, Comparative analysis of the seasonality of hydrological characteristics in Slovakia and Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 54 (3), 456-470, DOI: 10.1623/hysj.54.3.456
- Peel M.C., Finlayson B.L., McMahon T.A., 2007, Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification, *Hydrological Earth and System Sciences*, 11 (5), 1633-1644, DOI: 10.5194/hess-11-1633-2007
- Perez E.C., Stephens E., Bischiniotis K., Aalst M., Hurk B., Mason S., Nissan H., Pappenberger F., 2015, Should seasonal rainfall forecasts be used for flood preparedness?, *Hydrological Earth and System Sciences*, 21 (9), 4517-4524, DOI: 10.5194/hess-21-4517-2017
- Petrow T., Merz, B., 2009, Trends in flood magnitude, frequency and seasonality in Germany in the period 1951-2002, *Journal of Hydrology*, 371 (1), 129-141, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2009.03.024
- Pidwirny M., 2006, Climate classification and climatic regions of the world, [w:] *Fundamentals of Physical Geography*, dostępne online <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7v.html> (09.11.2021)
- Raport NIK, 2016, Realizacja programu ochrony przed powodzią w dorzeczu Górnej Wisły i działania podjęte w następstwie jego uchylecia, LKR.410.032.00.2015, nr ewid. 150/2016/P/15/081/LKR, Warszawa
- Rojecki A. (red.), 1965, Wyjątki ze źródeł historycznych o nadzwyczajnych zjawiskach hydrologiczno-meteorologicznych na ziemiach polskich w wiekach od X do XVI, Państwowy Instytut Hydrologiczno-Meteorologiczny, Warszawa
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J., Barbosa P., 2016, Meteorological droughts in Europe: events and impacts – past trends and future projections, JRC Technical Reports, dostępne online <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC100394> (09.11.2021)
- Stramska M., Kowalewska-Kalkowska H., Swirgon M., 2013, Seasonal variability in the Baltic Sea level, *Oceanologia*, 55 (4), 787-807, DOI: 10.5697/oc.55-4.787
- Strupczewski W.G., Kochanek K., Bogdanowicz E., Markiewicz I., 2012, On seasonal approach to flood frequency modelling. Part I: Two-component distribution revisited, *Hydrological Processes*, 26 (5), 705-716, DOI: 10.1002/hyp.8179
- Szwed M., 2019, Variability of precipitation in Poland under climate change, *Theoretical and Applied Climatology*, 135, 1003-1015, DOI: 10.1007/s00704-018-2408-6
- Twardosz R., 2000, Wieloletnia zmienność sum dobowych opadów w Krakowie w powiązaniu z sytuacjami synoptycznymi, *Prace Geograficzne*, 105, 19-71
- Twardosz R., 2005, Dobowy przebieg opadów atmosferycznych w ujęciu synoptycznym i probabilistycznym na przykładzie Krakowa (1886-2002), *Instytut Geografii i Gospodarki Przestrzennej UJ*, Kraków, 176 s.
- Twardosz R., Cebulska M., 2014, Anomalnie wysokie miesięczne opady atmosferyczne w polskich Karpatach i na ich przedpolu (1881-2010), *Prace Geograficzne*, 138, 7-28

- Twardosz R., Cebulska M., Walanus A., 2016, Anomalously heavy monthly and seasonal precipitation in the Polish Carpathian Mountains and their foreland during the years 1881-2010, *Theoretical and Applied Climatology*, 126, 323-337, DOI: 10.1007/s00704-015-1570-3
- Warszyńska J. (red.), 1996, *Karpaty polskie. Przyroda, człowiek, działalność*, Uniwersytet Jagielloński, Kraków, 367 s.
- Wilson D., Hisdal H., Lawrence D., 2010, Has streamflow changed in the Nordic countries? Recent trends and comparisons to hydrological projection, *Journal of Hydrology*, 394 (3-4), 334-346, DOI: 10.1016/j.jhydrol.2010.09.010
- Ziarnicka-Wojtaszek A., 2012, Porównanie wybranych wskaźników oceny suszy atmosferycznej na obszarze województwa podkarpackiego (1901-2000), *Woda, Środowisko, Obszary Wiejskie*, 12, 365-376

S t r e s z c z e n i e

Obszar dorzecza górnej Wisły charakteryzuje się dużym potencjałem powodziowym w okresie letnim z wezbrzeniami wywołanymi intensywnymi, długotrwałymi opadami. W pracy zbadano skrajne warunki opadowe w dorzeczu na podstawie dobowych sum opadów sezonu letniego (maj-październik) z okresu 1951-2018 dla jedenastu stacji meteorologicznych. W pierwszym etapie badania obejmowały ocenę częstości wystąpienia dni bez opadów oraz dni z opadem bardzo silnym (powyżej 20 mm na dobę) i wykazały, że istnieją duże podobieństwa w częstości wystąpienia dobowych sum opadów o różnej wielkości dla stacji o zbliżonej lokalizacji i wysokości n.p.m. Przeprowadzona za pomocą testu Manna-Kandalla analiza zmienności (stacjonarności) serii liczby dni bez opadu oraz liczby dni z opadem bardzo silnym pokazała, że dla siedmiu stacji serie liczby dni bez opadu są stacjonarne w badanym okresie 1951-2018, a jedynie cztery stacje (Skoczów, Rycerka Górna, Węglówka oraz Białka Tatrzańska) wykazują statystycznie istotne trendy malejące. Natomiast w przypadku serii liczby dni z opadem bardzo wysokim dla żadnej ze stacji testy nie wykazały statystycznie istotnych trendów. W kolejnym kroku zbadano długość najdłuższych sekwencji dni bez opadu oraz najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym w poszczególnych latach, a także czas ich wystąpienia w poszczególnych miesiącach sezonu letniego. Wyniki dowodzą, że najdłuższe sekwencje dni bez opadu występują najczęściej we wrześniu i w październiku, zaś najrzadziej w maju i w czerwcu, natomiast dla najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym obserwuje się odwrotną zależność, tj. najczęściej występują one w maju, czerwcu i lipcu, a najrzadziej we wrześniu i październiku. Badania dopełniła analiza długości i czasu wystąpienia maksymalnych w wieloleciu 1951-2018 najdłuższych sekwencji dni bez opadu oraz najdłuższych sekwencji dni z opadem bardzo silnym w odniesieniu do susz i powodzi, które wystąpiły w dorzeczu górnej Wisły w rozpatrywanym okresie. Okazuje się, że maksymalne najdłuższe sekwencje dni z bez opadu zanotowane dla poszczególnych stacji wynoszą od 19 dni dla Kasprowego Wierchu do 32 dni dla stacji Szaflary i w zdecydowanej większości związane są z głęboką suszą, która objęła rozległą część Polski w latach 1951-1952. Maksymalne najdłuższe sekwencje dni z opadem bardzo silnym wynoszą natomiast od 3 dni dla Krakowa do 7 dni dla Kasprowego Wierchu i odzwierciedlają powodzie, które nawiedziły rejon górnej Wisły, a w szczególności te z roku 1997, 2001 oraz 2010.

Słowa kluczowe: opady sezonowe, dobowe opady, okres bez opadu, okres z opadem bardzo silnym, sekwencje dni z opadem, górna Wisła.

S u m m a r y

The Upper Vistula basin is characterized by high flooding potential in the summer season, with high floods caused by intense, long-lasting rainfalls. The studies examined the extreme rainfall conditions in the basin on the basis of daily sums of precipitation in the summer season (May–October) in the period 1951–2018 for 11 meteorological stations located in the region. In the first stage, the research included the assessment of the frequency of days without precipitation and days with very heavy precipitation (over 20 mm per day) and showed high similarities in the frequency of occurrence of daily precipitation totals of various amounts for the stations with a similar location and altitude. The analysis of the variability (stationarity) of the series of the number of days without precipitation and the number of days with very heavy precipitation, carried out using the Mann-Kandall test for detecting the trend, showed that for 7 stations the series of the number of days without precipitation are stationary in the period 1951–2018, and only 4 stations (Skoczów, Rycerka Górna, Węglówka and Białka Tatrzańska) show the statistically significant decreasing trends. Meanwhile, in the case of the series of the number of days with very heavy precipitation, the tests did not show statistically significant trends for any of the stations. In the next step, the length of the longest sequences of days without precipitation and the longest sequences of days with very heavy precipitation in particular years were examined, as well as the time of their occurrence in particular months of the summer season. The results show that the longest sequences of days without precipitation occur most often in September and October, and the least frequent in May and June, while for the longest sequences of days with very heavy precipitation, the opposite relationship is observed, i.e. they most often occur in May, June and July, and least often in September and October. The study was completed by the analysis of the length and time of occurrence of the maxima from the period 1951–2018 of the longest sequences of days without precipitation and of the longest sequences of days with very heavy precipitation in relation to droughts and floods that occurred in the Upper Vistula basin in the studied period. It turns out that the maximum longest sequences of days with no precipitation recorded for individual stations vary from 19 days for Kasprowy Wierch to 32 days for Szaflary stations and are mostly related to the deep drought that occurred in a large part of Poland in 1951–1952. The maximum longest sequences of days with very heavy precipitation vary from 3 days for Kraków to 7 days for the Kasprowy Wierch station and are related to the floods that occurred in the Upper Vistula region, in particular large floods in 1997, 2001 and 2010.

Key words: seasonal precipitation, daily precipitation, period without precipitation, period with very heavy precipitation, sequence of days with precipitation, Upper Vistula.