

Marta CEBULSKA

POLITECHNIKA KRAKOWSKA IM. TADEUSZA KOŚCIUSZKI,  
WYDZIAŁ INŻYNIERII ŚRODOWISKA I ENERGETYKI

Robert TWARDOSZ

UNIWERSYTET JAGIELLOŃSKI, WYDZIAŁ GEOGRAFII I GEOLOGII

## ZRÓŻNICOWANIE SKRAJNYCH SUM MIESIĘCZNYCH OPADÓW ATMOSFERYCZNYCH W POLSKICH KARPATACH ZACHODNICH I ICH PRZEDPOLU

THE DISTRIBUTION OF EXTREME MONTHLY  
PRECIPITATION TOTALS IN THE POLISH WESTERN  
CARPATHIANS AND THEIR FORELAND OVER THE YEAR

### Wstęp

Do ekstremalnych zjawisk natury klimatycznej należą m.in. długotrwałe obfite opady, jak i ich długotrwały brak. Powodują one wielorakie groźne skutki dla funkcjonowania środowiska naturalnego i gospodarczej działalności człowieka, w tym m.in. w rolnictwie. Obfite długotrwałe opady mogą wywołać wezbrania potoków i rzek, a w efekcie poważne straty materialne w infrastrukturze. Długie okresy bezopadowe mogą natomiast prowadzić do wystąpienia suszy atmosferycznej, rolniczej, a nawet suszy hydrologicznej. Niedobór wody może występować okresowo, w różnych miesiącach na obszarach o dodatnim bilansie klimatycznym (Kossowska-Cezak, Bajkiewicz-Grabowska 2008), w tym również w Karpatach Polskich.

Na początku XXI wieku w Polsce wystąpiły ekstremalnie mokre i suche miesiące, jako przykład można wymienić obfitujący w opady szczególnie maj 2010 r. czy bezopadowy listopad 2011 roku (Woźniak 2012, 2013; Twardosz, Cebulka 2014; Cebulka 2018). W 2018 roku wystąpił długotrwały okres z pogodą gorącą (Twardosz 2019), której towarzyszył silny niedobór opadów, co spowodowało m.in. w Polsce klęskę żywiołową.

Celem tej pracy jest poznanie zmienności rocznej i wieloletniej najwyższych i najniższych miesięcznych sum opadów atmosferycznych. Do badania wykorzystano 18 sekularnych serii miesięcznych opadów z polskich Karpat Zachodnich i ich przedpola. Opracowanie to jest kontynuacją podjętej przez autorów rekonesansowej analizy naj-

wyższych i najniższych opadów atmosferycznych na tym obszarze (Cebulska, Twardosz 2010, 2012). Podstawą wcześniejszych badań autorów była jednak mniejsza liczba stacji i krótsze serie opadów atmosferycznych.

Na uwzględnionym obszarze badań istotnemu wzrostowi temperatury powietrza w 65-leciu 1951-2015, zwłaszcza wiosną i latem, nie towarzyszyły zmiany częstości i wielkości opadów (Żmudzka 2011; Łupikasza i in. 2016; Wypych i in. 2018; Błażejczyk 2019). Dotyczy to jednak ogólnej ilości opadów, a nie ekstremalnych zdarzeń opadowych, które są przypadkowe i jak podkreślili Łupikasza i in. (2016), mogą wystąpić nieoczekiwanie.

## Materiały i metody opracowania

Danymi wyjściowymi do badań były miesięczne sumy opadów atmosferycznych z 18 stacji meteorologicznych ze 138-lecia 1881-2018 (rys. 1). Najniżej położone są 4 stacje na północnym przedpolu Karpat – Kraków, Tarnów, Rzeszów i Jarosław. Pozostałe 14 stacji znajduje się w Karpatach. Najwyżej z nich położone są 2 stacje – Zakopane i Wetlina – odpowiednio na wysokości 844 i 700 m n.p.m.

Baza miesięcznych sum opadów atmosferycznych została opracowana i zweryfikowana pod kątem jednorodności w ramach badań wcześniej prowadzonych przez autorów (np. Twardosz, Cebulska 2014; Twardosz i in. 2016). Na potrzeby tego opracowania uzupełniono dane do 2018 r. na podstawie ogólnodostępnej bazy danych IMGW-PIB.

Ze zgromadzonej bazy sum opadów na każdej z 18 stacji wybrano najwyższą ( $P_{max}$ ) i najniższą ( $P_{min}$ ) sumę miesięczną opadów w każdym roku z lat 1881-2018. Na ich podstawie zestawiono 138-letnie serie sum opadów  $P_{max}$  i  $P_{min}$  z każdej stacji oddzielnie. Scharakteryzowano częstość i wielkość  $P_{max}$  i  $P_{min}$  w poszczególnych miesiącach na każdej stacji. Zbadano trendy wielkości opadów  $P_{max}$  i  $P_{min}$  w 138-leciu.



Rys. 1. Stacje meteorologiczne wykorzystane w opracowaniu

Fig. 1. Meteorological stations used in the paper

Opracowanie najwyższych i najniższych sum miesięcznych w roku nie jest jednoznaczne z badaniem bezwzględnie największych i najmniejszych miesięcznych opadów. Najwyższa suma w danym miesiącu jednoimiennym (np. w styczniu) w rozpatrywanym wieloleciu wcale nie musi być najwyższa w roku, w którym wystąpiła, bo może się zdarzyć, że najwyższy opad wystąpi w innym miesiącu (Cebulska, Twardosz 2010, 2012). I analogicznie najniższa suma w danym miesiącu jednoimiennym w rozpatrywanym wieloleciu wcale nie musi być najniższa w roku, w którym wystąpiła, ponieważ najniższy opad może być w innym miesiącu.

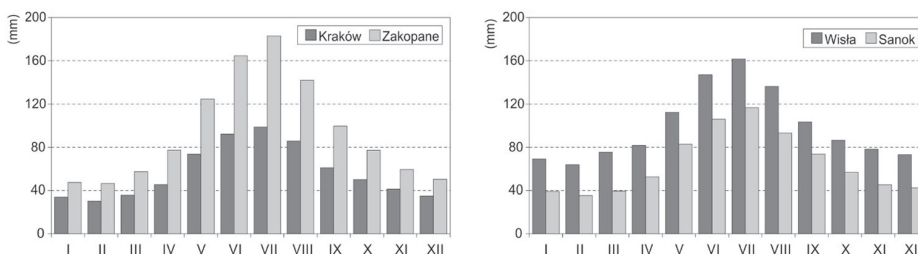
W skrajnych przypadkach zdarzało się, że opady w miesiącach w ogóle nie występowały (suma opadów 0 mm). Szczególną uwagę zwrócono na  $P_{max}$  i  $P_{min}$ , które wystąpiły jednocześnie na wszystkich 18 stacjach.

### Przebieg roczny i wieloletni występowania $P_{max}$ i $P_{min}$

W Polsce największa zmienność opadów charakteryzuje obszary górskie, na których oprócz cyrkulacji atmosferycznej duży wpływ na opady mają również czynniki orograficzne (Niedźwiedź, Obrębska-Starkłowa 1991). Zróźnicowanie rzeźby takich obszarów sprzyja dużej przestrzennej zmienności opadów, a więc występowaniu obfitych opadów ulewnych o zasięgu lokalnym lub rozlewnych o zasięgu regionalnym (np. Cebulak 1998).

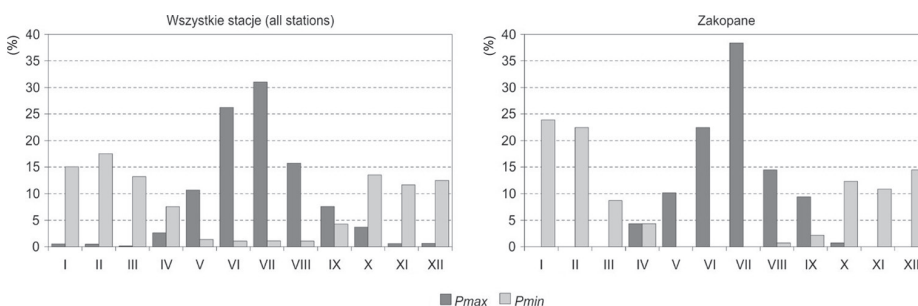
Zróźnicowanie sum opadów rocznych na przyjętych do badań stacjach meteorologicznych jest znaczne: od 650 mm w Rzeszowie do 1200 mm w Wiśle. Opady na rozpatrywanym obszarze badań zwiększają się nie tylko wraz ze wzrostem wysokości nad poziomem morza, ale także ze zmianą długości geograficznej (spadek ilości opadów z zachodu na wschód, tzn. ze wzrostem stopnia kontynentalizmu) (rys. 2). Wyraźnie niższe sumy opadów występują w kotlinach śródgórskich (np. Niedźwiedź, Obrębska-Starkłowa 1991).

W Karpatach Polskich w cyklu rocznym sum opadów, ukazanym na przykładzie 4 stacji, zaznacza się maksimum opadów w lipcu, a minimum w lutym lub styczniu (rys. 2). Taki przebieg średnich opadów na tym obszarze nawiązuje wyraźnie do przebiegu średniej temperatury powietrza i świadczy o kontynentalizmie klimatu. Klimat ten jest kształtowany pod wpływem mas powietrznych polarnych morskich bądź kontynentalnych, ale także mas powietrza zwrotnikowego i arktycznego. Pogoda na tym obszarze ma zatem charakter wybitnie zmienny. W zależności od cech fizycznych napływających mas powietrznych mogą tu występować długotrwałe opady o dużym natężeniu, jak i długie okresy bezopadowe. Dlatego też przebieg roczny opadów w poszczególnych latach rozpatrywanego 138-lecia różni się znacząco od przebiegu średnich opadów. Jego przejawem jest występowanie zarówno  $P_{max}$ , jak i  $P_{min}$  w różnych miesiącach roku (rys. 3). Zgodnie z dotychczasową wiedzą, największa częstość  $P_{max}$  przypada na miesiące letnie, tj. w czerwiec, lipiec i sierpień – 74%, a więc w okresie sprzyjającym rozwojowi silnej konwekcji w atmosferze i o największej zawartości pary wodnej w powietrzu. Z częstością 26% występują  $P_{max}$  także w pozostałych miesiącach, nawet zimowych: od



Rys. 2. Przebieg roczny średnich miesięcznych opadów (1881-2018) na wybranych stacjach meteorologicznych

Fig. 2. Annual variation of precipitation (1881-2018) at selected stations



Rys. 3. Przebieg roczny częstości przypadków  $P_{max}$  i  $P_{min}$  na wszystkich 18 stacjach meteorologicznych i w Zakopanem (1881-2018)

Fig. 3. Annual variation of the frequency of  $P_{max}$  and  $P_{min}$  cases at all 18 meteorological stations and in Zakopane (1881-2018)

listopada do marca – 2,4% (60 przypadków). W lipcu  $P_{max}$  jest najwięcej, 32% wszystkich przypadków. Najmniej  $P_{max}$  zdarzyło się w marcu – 0,2% (4 przypadki w 138-leciu, w Rzeszowie, Jarosławiu, Wiśle i Wetlinie). Na tle ogólnego opisanego przebiegu częstości  $P_{max}$  ze wszystkich 18 stacji wyróżnia się zachodnia część Karpat Polskich, gdzie na 4 stacjach stwierdzono największą częstość  $P_{max}$  w czerwcu (29-33%).

Mniej wyrazistym przebiegiem rocznym, w porównaniu do przebiegu  $P_{max}$ , cechują się  $P_{min}$ . Największa ich koncentracja występuje od października do marca – 83% przypadków na wszystkich 18 stacjach (rys. 3), z największą częstością w lutym – 17%. W miesiącach letnich także zdarzały się  $P_{min}$  – 3,3% (82 przypadki na 18 stacjach), co jest przejawem dużej zmienności opadów na rozpatrywanym obszarze. Spośród wszystkich stacji Zakopane wyróżnia się najbardziej wyrazistym przebiegiem rocznym  $P_{max}$  i  $P_{min}$  (rys. 3).  $P_{max}$  występują tu wyłącznie od kwietnia do października, z największą częstością w lipcu 38%,  $P_{min}$  zaś od sierpnia do kwietnia.

W ciągu 1656 miesięcy 138-lecia (138×12) wystąpiło łącznie na 18 stacjach 2485 przypadków  $P_{max}$  w 453 miesiącach i 2490 przypadków  $P_{min}$  w 466 miesiącach (tab. 1). Z tego wynika, że miesięczne ekstremum opadowe występuje synchronicznie średnio

Tabela 1. Liczba ( $L$ )  $P_{max}$  i  $P_{min}$ , które wystąpiły jednocześnie na określonej liczbie stacji:  $M$  – liczba miesięcy,  $P$  – liczba przypadków  
 Table 1. Number ( $L$ ) of  $P_{max}$  and  $P_{min}$  cases that occurred simultaneously at a specific number of stations:  $M$  – number of months,  $P$  – number of cases

| $L$       | Liczba stacji |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     | $\Sigma$ |
|-----------|---------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|----------|
|           | 1             | 2   | 3   | 4   | 5   | 6   | 7   | 8   | 9   | 10  | 11  | 12  | 13  | 14  | 15  | 16 | 17  | 18  |          |
| $P_{max}$ |               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     |          |
| $M$       | 122           | 48  | 45  | 36  | 37  | 23  | 16  | 19  | 12  | 13  | 14  | 10  | 12  | 12  | 9   | 4  | 12  | 9   | 453      |
| $P$       | 122           | 96  | 135 | 144 | 185 | 138 | 112 | 152 | 108 | 130 | 154 | 120 | 156 | 168 | 135 | 64 | 204 | 162 | 2485     |
| $P_{min}$ |               |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |    |     |     |          |
| $M$       | 140           | 53  | 41  | 38  | 22  | 27  | 18  | 20  | 15  | 20  | 10  | 9   | 6   | 6   | 6   | 6  | 12  | 17  | 466      |
| $P$       | 140           | 106 | 123 | 152 | 110 | 162 | 126 | 160 | 135 | 200 | 110 | 108 | 78  | 84  | 90  | 96 | 204 | 306 | 2490     |

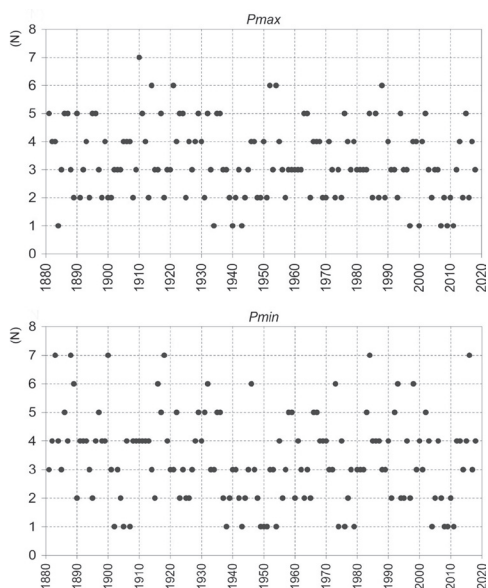
Tabela 2. Liczba lat z  $P_{max}$  i  $P_{min}$ , które wystąpiły jednocześnie na wszystkich 18 stacjach w poszczególnych miesiącach  
 Table 2. Number of years with  $P_{max}$  and  $P_{min}$  that occurred simultaneously at all 18 stations in individual months

|           | I | II | III | IV | V | VI | VII | VIII | IX | X | XI | XII | $\Sigma$ |
|-----------|---|----|-----|----|---|----|-----|------|----|---|----|-----|----------|
| $P_{max}$ | - | -  | -   | -  | 1 | 2  | 5   | -    | 1  | - | -  | -   | 9        |
| $P_{min}$ | - | 4  | 3   | 1  | - | -  | -   | -    | -  | 5 | 3  | 1   | 17       |

na prawie 5-6 stacjach ( $P_{max}$  5,5,  $P_{min}$  5,3 stacji). W rzeczywistości zarówno  $P_{max}$ , jak i  $P_{min}$  pojawiają się równocześnie na bardzo różnej liczbie stacji – od jednej do wszystkich 18 stacji (tab. 1). Warto jednak zwrócić uwagę na pewną różnicę między  $P_{max}$  i  $P_{min}$ : te drugie częściej występują jednocześnie na skrajnie dużej liczbie stacji (16-18): 430  $P_{max}$  podczas 25 miesięcy (17,0%) i 606  $P_{min}$  podczas 35 miesięcy (24,0%). Ta różnica wskazuje, że występowanie najniższej sumy miesięcznej opadów częściej jest uwarunkowane czynnikami o większym zasięgu przestrzennym i większej stabilności, do których należy pojawianie się odpowiednich układów cyrkulacyjnych.

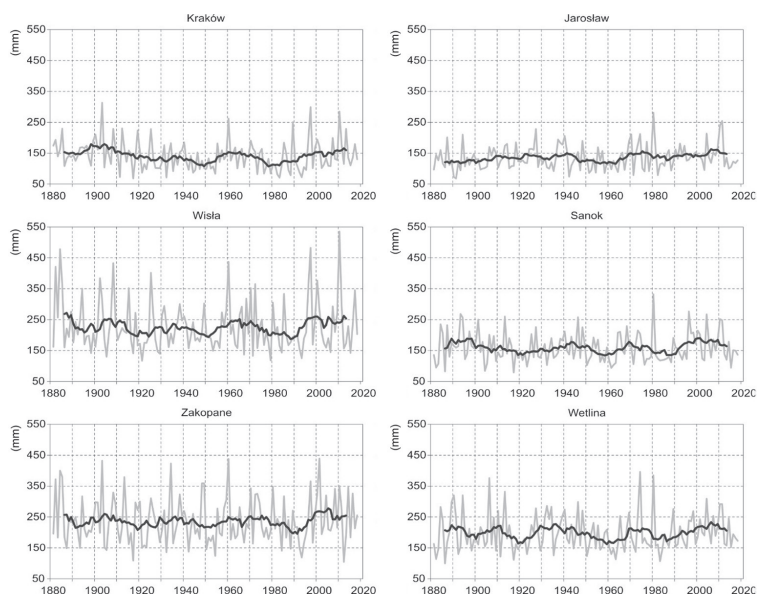
Częstość  $P_{max}$  i  $P_{min}$ , które wystąpiły jednocześnie na całym obszarze, reprezentowanym przez wszystkie 18 stacji, ma wyraźny przebieg roczny (tab. 2).  $P_{max}$  (9) wystąpiły wyłącznie od maja do lipca i we wrześniu, z maksimum częstości w lipcu (5), a  $P_{min}$  (17) od lutego do kwietnia i od października do grudnia.

W poszczególnych latach występowała różna liczba miesięcy z  $P_{max}$  i  $P_{min}$  (rys. 4). Wystąpienie któregoś z ekstremów na wszystkich stacjach w tym samym miesiącu danego roku oznacza, że taki  $P_{max}$  lub  $P_{min}$  był tylko jeden, wystąpienie  $P_{max}$  lub  $P_{min}$  w różnych miesiącach tego samego roku na różnych stacjach oznacza, że takich  $P_{max}$  lub  $P_{min}$  jest więcej. Okazało się jednak, że rozproszenie zarówno  $P_{max}$ , jak i  $P_{min}$  w ciągu roku nie jest duże: na 18 rozpatrywanych stacjach  $P_{max}$  tylko w jednym roku 138-lecia (1910) wystąpiło w 7 różnych miesiącach i w 5 latach w 6 miesiącach; tylko w jednym miesiącu danego roku  $P_{max}$  wystąpiło w 9 latach (rys. 4).  $P_{min}$  w 5 latach wystąpiło aż w 7 różnych miesiącach, w 7 latach w 6 miesiącach, a w jednym miesiącu danego roku  $P_{min}$  zdarzyło się w 17 latach.



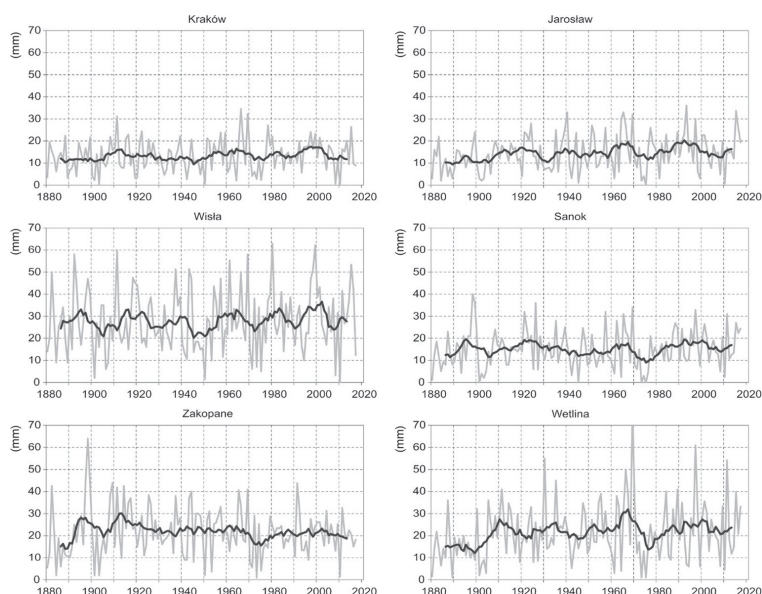
Rys. 4. Liczba miesięcy ( $N$ ) z  $P_{max}$  i  $P_{min}$  w poszczególnych latach 138-letnia 1881-2018

Fig. 4. Number of months ( $N$ ) with  $P_{max}$  and  $P_{min}$  in individual years of the 138-year period (1881-2018)



Rys. 5. Przebieg wieloletni  $P_{max}$  [mm] na wybranych stacjach: sumy w każdym roku – linia szara, 11-letnie średnie ruchome – linia czarna

Fig. 5. Long-term variation in  $P_{max}$  at selected stations: totals in each year – gray line, 11-year moving averages – black line



Rys. 6. Przebieg wieloletni  $P_{min}$  [mm] na wybranych stacjach:  
sumy w każdym roku – linia szara, 11-letnie średnie ruchome – linia czarna

Fig. 6. Long-term variation in  $P_{min}$  at selected stations:  
totals in each year – gray line, 11-year moving averages – black line

Można zatem sądzić, że mimo iż w poszczególnych latach czas wystąpienia  $P_{max}$  i  $P_{min}$  na pojedynczych stacjach może wydawać się dość przypadkowy, w rzeczywistości zaznaczają się dość wyraźne prawidłowości tak w przebiegu rocznym, jak i równoczesności ich pojawiania się na kilku z uwzględnionych stacji. Wskazuje to z jednej strony na oddziaływanie czynników lokalnych na pojawianie się  $P_{max}$  i  $P_{min}$ , z drugiej zaś wielkoskalowych, dotyczących całego obszaru.

W przebiegu wieloletnim  $P_{max}$ , pokazanym na przykładzie 6 stacji, występują nieregularne fluktuacje (rys. 5). Na podstawie testu Manna-Kendalla na poziomie istotności 0,05, na żadnej z 18 stacji nie stwierdzono istotnego statystycznie trendu wielkości  $P_{max}$  w rozpatrywanym 138-leciu (1881-2018). Brak istotnych trendów wynika z dużej ich zmienności z roku na rok, co oznacza, że tylko duże zmiany wysokości  $P_{max}$  mogą wykazywać istotność statystyczną. Z rysunku 5 widać natomiast wyraźnie, że w części zachodniej (np. Wisła) i wysokogórskiej (Zakopane i Wetlina) występuje większa zmienność  $P_{max}$  z roku na rok niż w części wschodniej.

W przebiegu wieloletnim  $P_{min}$ , podobnie jak w przebiegu  $P_{max}$ , występują nieregularne fluktuacje, ale znacznie mniejszy jest zakres ich wahań, maksymalnie do 63 mm w Wiśle (rys. 6). Nie stwierdzono również istotnych statystycznie na poziomie istotności 0,05 trendów  $P_{min}$  na żadnej z 18 uwzględnionych stacji w przyjętym do badań 138-leciu.

### Najwyższe sumy opadów $P_{max}$

Na uwzględnionych 18 stacjach występuje duże zróżnicowanie wielkości najwyższych  $P_{max}$  (rys. 7). Rekordowa miesięczna suma opadów w 138-leciu osiągnęła aż 536 mm w maju 2010 r. w Wiśle (433 m n.p.m.). Opad ten osiągnął 484% sumy średniej wieloletniej (tab. 3). Sumy opadów przekraczające 500 mm wystąpiły jeszcze w Bielsku-Białej i Makowie Podhalańskim, odpowiednio w maju 2010 i lipcu 2001 roku (rys. 7).

Największy względny opad osiągnął 495% średniej sumy opadów w maju 2010 r. w Żywcu. Największe sumy opadów występują zatem w części zachodniej obszaru badań, najbardziej eksponowanej na wpływ deszczonośnych wiatrów z zachodu. W kierunku wschodnim, wraz ze zwiększającym się stopniem kontynentalizmu,  $P_{max}$  wyraźnie zmniejszają się, do 241 mm w Rzeszowie. Nawet w Wetlinie – stacji najwyższej położonej (700 m n.p.m.) w części wschodniej, ich wysokość nie osiągnęła 400 mm (rys. 7). Zakres zmienności najwyższych  $P_{max}$  na obszarze badań wynosi zatem od 241 do 536 mm. Przyjmując  $P_{max}$  241 mm ( $P_{max}$  najniższy z najwyższych) w Rzeszowie jako wartość odniesienia, sprawdzono, ile  $P_{max}$  powyżej tej wartości wystąpiło na każdej z pozostałych 17 stacji (rys. 8). Okazuje się, że w rozpatrywanym 138-leciu liczba  $P_{max}$  przekraczających tę wartość osiąga w części zachodniej – do 54 w Zakopanem. Oznacza to, że w Zakopanem – stacji najwyższej położonej (844 m n.p. m), średnio prawie co dwa lata  $P_{max}$  osiąga sumę większą niż w  $P_{max}$  w Rzeszowie. Najwięcej  $P_{max}$  o sumie co najmniej 400 mm występuje jednak na stacji w Wiśle – 7; w Zakopanem było ich 5 (rys. 9). Ujawnia się tu zatem wpływ ekspozycji, ale też i wpływ wysokości nad poziomem morza na wielkość opadów.

W poszczególnych miesiącach  $P_{max}$  także wykazują dużą zmienność. Ich wartości bezwzględne wahają się od 168 mm w styczniu do 536 mm w maju (tab. 3). W 7 miesiącach największe  $P_{max}$  wystąpiło w Wiśle, czyli w zachodniej części polskich Karpat, a w 3 miesiącach w Wetlinie – wschodniej części.

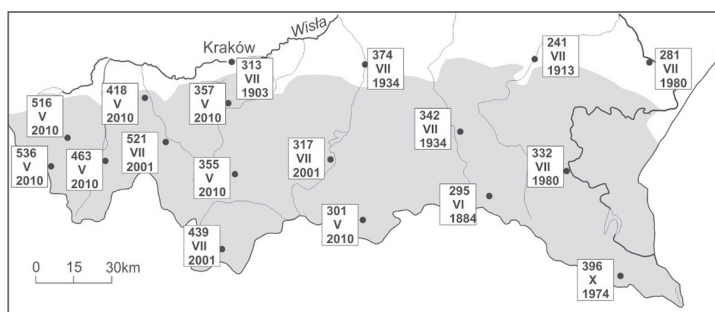
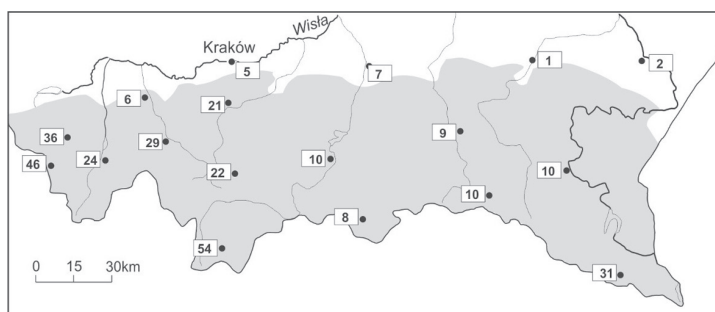
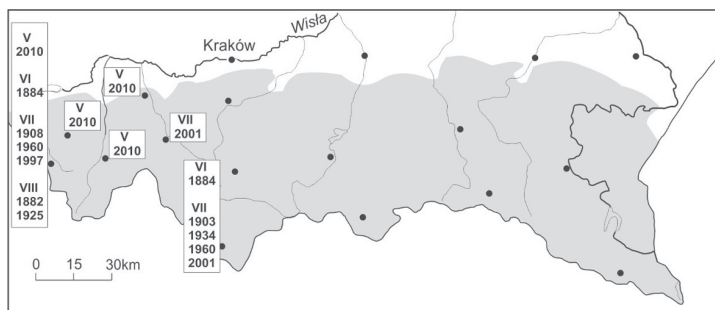
W niektórych latach najwyższe  $P_{max}$  były przyczyną występowania katastrofalnych zjawisk przyrodniczych w polskich Karpatach. W szczególności należał do nich maj 2010 r., kiedy najwyższe sumy miesięczne opadów wystąpiły w części zachodniej

Tabela 3. Najwyższe  $P_{max}$  w poszczególnych miesiącach (1881-2018)

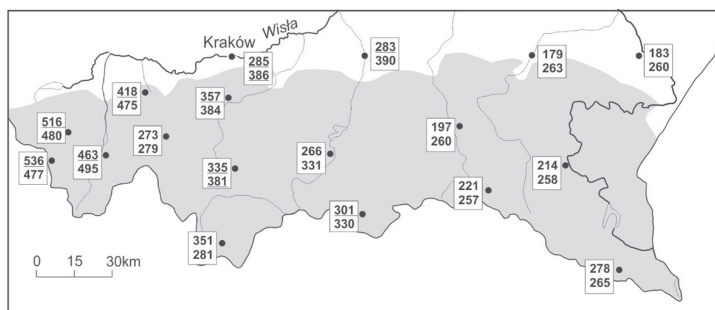
Table 3. The highest  $P_{max}$  in individual months (1881-2018)

|          | I                 | II    | III   | IV      | V     | VI    | VII                  | VIII  | IX    | X       | XI      | XII           |
|----------|-------------------|-------|-------|---------|-------|-------|----------------------|-------|-------|---------|---------|---------------|
| $P$ [mm] | 168               | 191   | 226   | 233     | 536   | 478   | 521                  | 421   | 359   | 396     | 270     | 210           |
| Rok      | 1976              | 1946  | 2000  | 1998    | 2010  | 1884  | 2001                 | 1882  | 1996  | 1974    | 1910    | 1952          |
| % Pśr.   | 244, 326          | 301   | 300   | 322     | 484   | 322   | 377                  | 309   | 354   | 419     | 329     | 406           |
| Stacja   | Wisła,<br>Krynica | Wisła | Wisła | Wetlina | Wisła | Wisła | Maków<br>Podhalański | Wisła | Wisła | Wetlina | Wetlina | Bielsko-Biała |



Rys. 7. Rekordowo duże  $P_{max}$  na poszczególnych stacjach (1881-2018)Fig. 7. Record-high  $P_{max}$  at individual stations (1881-2018)Rys. 8. Liczba  $P_{max}$  o sumie  $\geq 241$  mm na poszczególnych stacjach (1881-2018)Fig. 8. Number of  $P_{max}$  with precipitation total  $\geq 241$  mm at individual stations (1881-2018)Rys. 9. Wystąpienie  $P_{max} \geq 400$  mm na poszczególnych stacjach (1881-2018)Fig. 9. Occurrence of  $P_{max} \geq 400$  mm at individual stations (1881-2018)

i przekraczały 400 mm, a nawet 500 mm (rys. 10). Lokalnie na posterunkach opadowych sumy osiągały prawie 600 mm (594 mm w Straconce na wysokości 450 m n.p.m.) (Maciejewski i in. 2011). Na połowie uwzględnionych w opracowaniu stacji opady w maju w 2010 r. były największe w 138-leciu. Wynikiem tak wysokich opadów miesięcznych była rozległa powódź, która przyczyniła się do śmierci 25 osób, ogromnych szkód i strat w infrastrukturze komunalnej, a także nasilenie się procesów osuwiskowych (Macie-



Rys. 10. Sumy opadów w maju 2010 r. na poszczególnych stacjach; podkreślono wartości najwyższe w 138-leciu; pierwsza wartość w mm, druga w % średniej

Fig. 10. Precipitation totals at individual stations in May 2010; the highest values in the 138 years are underlined; the first value is given in mm, the second in % of the average (1881-2018)

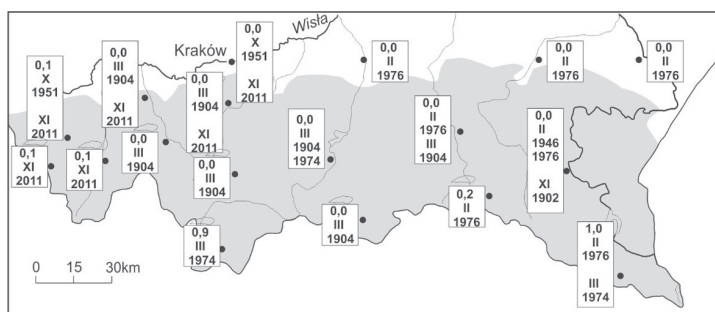
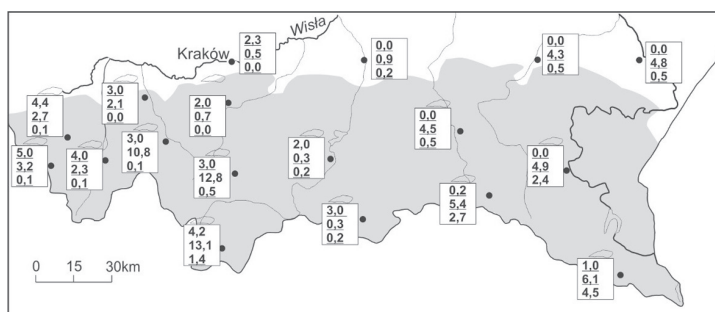
jewski i in. 2011). Duże opady w maju 2010 r., jak i powódzie wystąpiły na obszarze znacznej części Europy Środkowej (Bissolli i in. 2011). Nie mniej groźne skutki środowiskowe, ale o charakterze lokalnym wywołały opady w lipcu 2001 roku. Jak donoszą Fal i in. (2002), wystąpiło wtedy wiele ulew, które ominęły stacje meteorologiczne. Największy  $P_{max}$  wystąpił wtedy w Makowie Podhalańskim, gdzie wyniósł 521 mm, co stanowi 376% średniej wieloletniej ze 138-lecia. Na tak wysoką sumę miesięczną opadów miał wpływ pojedynczy opad dobowy 191 mm, co stanowi 36% sumy miesięcznej Fal i in. (2002).

W 9 latach rozpatrywanego 138-lecia 1881-2018 najwyższe sumy miesięczne opadów pojawiły się synchronicznie na wszystkich rozpatrywanych stacjach (tab. 2), z czego 5 było w lipcu, 2 w czerwcu i po jednym w maju i we wrześniu. Spośród nich na szczególną uwagę zasługuje czerwiec 1884, w którym na połowie stacji  $P_{max}$  był największy w 138-leciu.

### Najniższe sumy opadów $P_{min}$

Ze względu na dolne ograniczenie wysokości opadów, najniższe sumy miesięczne opadów wykazują znacznie mniejsze zróżnicowanie niż najwyższe. W miesiącach chłodnej połowy roku na większości rozpatrywanych stacji w 138-leciu zdarzało się, że opady w ogóle nie występowały (rys. 11). Na stacjach w Bielsku Białej, Wiśle, Żywcu najniższa  $P_{min}$  osiągnęła 0,1 mm, a w Zakopanem, Dukli i Wetlinie nie przekroczyła 1 mm. Największy obszar objęty całkowitym brakiem opadów przypadł na marzec 1904 r. (rys. 11). Swym zasięgiem objął 7 stacji w środkowej części Karpat Polskich. Na pozostałych 7 stacjach sumy opadów w tym miesiącu wyniosły od 2 do 9 mm w części wschodniej i od 4 do 28 mm w części zachodniej.

Jak wynika z zestawienia w tabeli 2, w 138-leciu  $P_{min}$  pojawiło się w 17 latach na wszystkich stacjach jednocześnie. Wśród nich 5 było w październiku, 4 w lutym,

Rys. 11. Rekordowo niskie  $P_{min}$  (lub brak opadów) na poszczególnych stacjach (1881-2018)Fig. 11. Record-low  $P_{min}$  (or no precipitation) at individual stations (1881-2018)Rys. 12. Sumy opadów  $P_{min}$  w lutym 1976 r. (pierwsza wartość), kwietniu 2009 r. (druga wartość) i listopadzie 2011 r. (trzecia wartość); podkreślono wartości najniższe w 138-leciuFig. 12.  $P_{min}$  totals in February 1976 (first value), April 2009 (second value), and November 2011 (third value); the lowest values in the 138 years are underlined

po 3 w marcu i listopadzie oraz jednym w kwietniu i grudniu. Spośród nich na szczególną uwagę zasługuje  $P_{min}$  w lutym 1976 r., kwietniu 2009 r. i listopadzie 2011 r., a więc w miesiącach, w których  $P_{min}$  były najniższe w 138-leciu na największej liczbie stacji 14-15 (rys. 12). Rekordowo niskie opady wystąpiły w listopadzie 2011 roku. Wtedy na 3 stacjach, w Krakowie, Wadowicach i Myślenicach nie było w ogóle opadów, na 11 stacjach  $P_{min}$  nie osiągnął 1 mm, a na pozostałych 4 stacjach wyniósł od 1,5 mm w Zakopanem do 4,5 mm w Wetlinie. Na 13 stacjach  $P_{min}$  były wtedy najniższe w rozpatrywanym okresie badań. Podobnie kształtowały się wysokości  $P_{min}$  w lutym 1976 roku. W części wschodniej obszaru nie pojawiły się wtedy opady w ogóle. Na pozostałych stacjach  $P_{min}$  nie przekroczyły 5 mm, a na 14 stacjach były najniższe w rozpatrywanym wieloleciu. W kwietniu 2009 r. zakres wielkości  $P_{min}$  był już większy: od 0,3 mm w Krynicy i Nowym Sączu do 13,1 mm w Zakopanem. Z wyjątkiem  $P_{min}$  w Rabce, Zakopanem i Makowie Podhalańskim były to najniższe opady w 138-leciu. Na wszystkich stacjach opady te stanowiły mniej niż 10% średniej wieloletniej sumy opadów, od 0,5% w Nowym Sączu i Krynicy do 9,8% w Makowie Podhalańskim.

Od kwietnia do września na żadnej ze stacji nie stwierdzono braku opadów w całym 138-leciu. W tym okresie roku, z wyjątkiem maja, zdarzają się jednak nieliczne miesiące z bardzo niskimi sumami opadów, nawet poniżej 10% średniej wieloletniej. W miesiącach letnich było to w czerwcu 1917 r. w Rabce – 9,3% i Żywcu – 6,5%, w lipcu 1887 r. w Sanoku – 6,9% i lipcu 1994 r. w Wetlinie – 5,1%, w sierpniu 2003 r. w Nowym Sączu – 8,4% i sierpniu 2013 r. w Jaśle – 9,2%.

## Wnioski

Na podstawie 18 sekularnych serii miesięcznych sum opadów w 138-leciu 1881-2018 w Karpatach Polskich i ich przedpolu pokazano zmienność opadów najwyższych ( $P_{max}$ ) i najniższych ( $P_{min}$ ). Stwierdzono, że  $P_{max}$ , jak i  $P_{min}$  mogą występować w ciągu całego roku.  $P_{max}$  mają jednak bardziej wyrazisty przebieg roczny częstotliwości, z silną koncentracją w miesiącach letnich,  $P_{min}$  natomiast wykazują mniejsze zróżnicowanie częstotliwości w poszczególnych miesiącach, zwłaszcza od października do marca. Ze względu na dolne ograniczenie wysokości opadów (brak opadów)  $P_{min}$  cechują się także mniejszą zmiennością wysokości niż  $P_{max}$ .

Zdarzają się miesiące, w których  $P_{max}$  lub  $P_{min}$  występują synchronicznie na wszystkich stacjach (odpowiednio 9 i 17 w 138-leciu). W większości lat jednak na poszczególnych stacjach  $P_{max}$  i  $P_{min}$  występują w więcej niż jednym miesiącu – wyjątkowo do 7.

W seriach 138-letnich, zarówno  $P_{max}$  jak i  $P_{min}$ , występują nieregularne wahania opadów, bez istotnego statystycznie na poziomie istotności 0,05 trendu, co jest zgodne z brakiem trendów ilości opadów na tym obszarze.

Z niektórymi skrajnie wysokimi wartościami  $P_{max}$  występującymi od maja do sierpnia, związane były katastrofalne powodzie na całym obszarze badań lub w jego części. W szczególności dotyczy to powodzi regionalnej w maju 2010 r. i lokalnej lipcu 2001 r. z  $P_{max}$  przekraczającymi 500 mm. W przypadku skrajnie niskich wartości  $P_{min}$  wystąpiły silne niedobory wody opadowej. Na przykład, w listopadzie 2011 r. opadów w ogóle nie było lub ich suma nie przekroczyła 5 mm.

## L i t e r a t u r a

- Bissolli P., Friedrich K., Rapp J., Ziese M., 2011, Flooding in eastern central Europe in May 2010 – reasons, evolution and climatological assessment, *Weather*, 66 (6), 147-153, DOI: 10.1002/wea.759
- Błażejczyk K., 2019, Sezonowa i wieloletnia zmienność niektórych elementów klimatu w Tatrach i Karkonoszach w latach 1951-2015, *Przegląd Geograficzny*, 91 (1), 41-62, DOI: 10.7163/PrzG.2019.1.2
- 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, J. Greła, L. Starkel (red.), Wydawnictwo Oddziału PAN w Krakowie, 21-37

- 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
- Fal B., Bogdanowicz E., Dobrzyńska I., 2002, Powódź w 2001 roku – opis syntetyczny, *Gospodarka Wodna*, 2, 52-60
- Kossowska-Cezak U., Bajkiewicz-Grabowska E., 2008, *Podstawy hydrometeorologii*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 268 s.
- Lupikasza E., Niedźwiedź T., Pinskwar I., Ruiz-Villanueva V., Kundzewicz Z.W., 2016, Observed changes in air temperature and precipitation and relationship between them, in the Upper Vistula Basin, [w:] *Flood Risk in the Upper Vistula Basin*, Z. Kundzewicz, M. Stoffel, T. Niedźwiedź, B. Wyźga (red.), Springer International Publishing, 155-188, DOI: 10.1007/978-3-319-41923-7\_8
- Maciejewski M., Ostojki M.S., Walczykiewicz T. (red), 2011, *Dorzecze Wisły, monografia powodzi maj-czerwiec 2010*, IMGW-PIB, Warszawa, 236 s.
- Niedźwiedź T., Obrębska-Starkłowa B., 1991, *Klimat*, [w:] *Dorzecze górnej Wisły. Część I.*, I. Dynowska, M. Maciejewski (red.), Wydawnictwo PWN, Kraków, 68-84
- 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, DOI: 10.1007/s00704-009-0122-0
- Twardosz R., 2019, Anomalously warm months in 2018 in Poland in relation to circulation patterns, *Weather*, 74 (11), 374-382, DOI: 10.1002/wea.3588
- Twardosz R., Cebulska M., 2014, Anomalnie wysokie miesięczne opady atmosferyczne w polskich Karpatach i na ich przedpołu (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
- Woźniak A., 2012, Opady w 2010 roku w Krakowie na tle wielolecia 1863-2010, *Przegląd Geofizyczny*, 3-4, 407-420
- Woźniak A., 2013, Opady w 2010 roku w Karpatach Polskich na tle wielolecia 1881-2010, *Prace Geograficzne*, 133, 35-48
- Wypych A., Ustrnul Z., Schmatz D.R., 2018, Long-term variability of air temperature and precipitation conditions in the Polish Carpathians, *Journal of Mountain Science*, 15 (2), 237-253, DOI: 10.1007/s11629-017-4374-3
- Żmudzka E., 2011, Współczesne zmiany klimatu wysokogórskiej części Tatr, *Prace i Studia Geograficzne*, 47, 217-226

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

Scharakteryzowano najwyższe ( $P_{max}$ ) i najniższe ( $P_{min}$ ) sumy opadów miesięcznych w roku z 18 stacji w polskich Karpatach Zachodnich i ich przedpołu z okresu 138-letniego 1881-2018. W pracy tej skoncentrowano się na charakterystyce ich zmienności rocznej i wieloletniej. Karpaty Polskie, ze względu na urozmaiconą rzeźbę, są obszarem w Polsce o największym zakresie zróżnicowania ilości opadów tak w przestrzeni, jak i w czasie, od całkowitego braku opadów do 500 mm w miesiącu.  $P_{max}$  mają bardziej wyrazisty przebieg roczny częstości niż  $P_{min}$ . Skrajne sumy opadów miesięcznych w 138-leciu, zarówno  $P_{max}$  jak i  $P_{min}$ , nie wykazują istotnego statystycznie trendu zmian, co jest zgodne z brakiem trendu w ogólnej ilości opadów na tym obszarze.

Słowa kluczowe: ekstremalne opady, opady miesięczne, polskie Karpaty.

## S u m m a r y

Abstract. The paper focuses on the highest ( $P_{max}$ ) and lowest ( $P_{min}$ ) monthly precipitation totals over a period of one year from 18 sites in the Polish Western Carpathians and their foreland over the 138-year period from 1881 to 2018. It then uses the results to discuss the characteristics of the annual and long-term variability of such precipitation. On account of their varied relief, the Polish Carpathian Mountains display the greatest temporal and spatial variability of precipitation in Poland, ranging from complete absence to 500 mm per month. While  $P_{max}$  demonstrates a more pronounced annual frequency pattern than  $P_{min}$ , neither of them follows a statistically significant trend of variation. This is consistent with the absence of a trend as regards overall precipitation volumes in this area.

Key words: extreme precipitation, monthly precipitation, Polish Carpathians.