Przegląd Geograficzny
2021, 93, 1, s. 43-58
https://doi.org/10.7163/PrzG.2021.1.3

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk

https://www.igipz.pan.pl/przeglad-geograficzny.html

Wpływ cyrkulacji atmosferycznej na opady w Tatrach oraz Czarnohorze

Influence of atmospheric circulation on precipitation in Tatra and Chornohora Mts.

Oleh Skrynyk[1] Krzysztof Błażejczyk[2]

[1]Uniwersytet Warszawski
Wydział Geografii i Studiów Regionalnych
ul. Krakowskie Przedmieście 30, 00-927 Warszawa
[2]Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN
ul. Twarda 51/55, 00-818 Warszawa
o.skrynyk@uw.edu.pl • k.blaz@twarda.pan.pl

Zarys treści. W opracowaniu przedstawiono warunki cyrkulacyjne i wybrane charakterystyki opadów atmosferycznych oraz ich natężenie w Tatrach i Czarnohorze. Zbadano zależności natężenia opadów od cyrkulacji atmosferycznej. Wykonano porównanie opadów w analizowanych masywach w ciągu ostatnich lat, także w kontekście zmian cyrkulacji atmosferycznej. Oceniono, czy i na ile zmieniła się w badanym okresie intensywność opadów. Zastosowano klasyfikację typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia (2017). Obliczono, roczne wartości wskaźników cyrkulacji P (przepływ zachód-wschód), S (przepływ południe-północ) i C (sytuacja cyklonalna/antycyklonalna). W opracowaniu wykorzystano dobowe sumy opadów ze stacji Pożyżewska (PO, 1451 m n.p.m., ϕ 48˚09'N i λ 24˚32'E) położonej na północno-wschodnim skłonie Czarnohory i stacji Hala Gąsienicowa (HG, 1520 m n.p.m., ϕ 49°14'N i λ 20°00'E) leżącej na północnym skłonie Tatr, za okres 1961-2015. Największe zmiany zaobserwowano w przypadku wskaźnika napływu strefowego P i wskaźnika cykloniczności C. Ogólnie, trend rocznych sum opadów jest dodatni, ale nie jest istotny statystycznie. Trend zmian liczby dni z opadem jest ujemny zarówno w Czarnohorze, jak i w Tatrach (-7,3 dni/10 lat i -7,59 dni/10 lat, odpowiednio). Natomiast trend zmian liczby dni z opadem o większym natężeniu, np. >10mm jest dodatni w Czarnohorze (+1,23 dni/10 lat) i ujemny w Tatrach (-0,6 dni/10 lat).

Słowa kluczowe: opad orograficzny, góry, Karpaty, zmienność, trendy, zmiana klimatu.
Keywords*: orographic precipitation, mountains, Carpathians, variability, trends, climate change.*

Wstęp

Góry są barierą klimatyczną, a przepływające nad nimi masy powietrza powodują opady atmosferyczne o dużych natężeniach (tzw. opady orograficzne; Bokwa et al., 2013; Cheval et al., 2014; Spinoni et al., 2015). Czarnohora to najwyższe pasmo górskie Karpat na terenie Ukrainy, z sześcioma szczytami o wysokości ponad 2000 m n.p.m., stanowiące barierę klimatyczną wzdłuż linii NW-SE (Skrynyk, 2019). Główny grzbiet Tatr Wysokich jest jeszcze wyższy i przebiega wzdłuż linii W-E. Każdy z masywów ma długość około 30 km, a odległość pomiędzy nimi wynosi blisko 350 km (Skrynyk i Rymarowicz, 2018). Po ich najwyż-

szych graniach przebiegają główne działy wodne. Tatry oddzielają zlewiska Wisły i Dunaju, a Czarnohora – Prutu i Cisy, wody których następnie wpadają do Dunaju.

Wiosną w Karpatach Wschodnich oraz w sezonie letnim w Karpatach Zachodnich, ekstremalne opady powodują katastrofalne powodzie o dużym zasięgu. Ostatnio w badanych regionach powodzie stają się coraz częstszym zjawiskiem spowodowanym właśnie intensywnymi opadami w górach. Czynnik orograficzny sprawia, że eksponowane na północ skłony pasma tatrzańskiego są dotknięte ekstremalnie wysokimi opadami (Migała, 2005; Ustrnul et al., 2015), których suma dobowa osiąga 300 mm, co jest najwyższą wartością, jaką do tej pory zarejestrowano w Polsce (Niedźwiedź, 2003).

Ekstremalne zdarzenia opadowe odgrywają istotną rolę w procesach morfogenetycznych oraz w intensyfikacji systemu denudacyjnego w górach powodując silną erozję oraz tworzenie spływów gruzowych (Niedźwiedź, 2003). Intensywność tych zjawisk wydaje się być tak duża, jak w okresie małej epoki lodowej (Konček, 1974; Niedźwiedź, 1996). Wzrost liczby ekstremalnych zdarzeń w górach jest związany z ogólnym przyspieszeniem obiegu energii i materii spowodowanym rosnącym efektem cieplarnianym (Błażejczyk et al., 2013) i w zależności od ilości pary wodnej oraz innych warunków powodujących opady, globalny trend opadów może rosnąć o ok 7% na stopień ocieplenia (Trenberth, 2011).

Badania na podstawie opadów w Tatrach, szczególnie w Dolinie Suchej Wody prowadzone są od dawna (Cebulak, 1983; Niedźwiedź, 1992, 2003; Błażejczyk, 2019). W obszernym regionie Polskich i Ukraińskich Karpat stwierdzono duże miesięczne natężenia opadów, a przy ich charakterystyce wzięto pod uwagę cyrkulację atmosferyczną (Kholiavchuk i Cebulska, 2019). Niemniej, badaniami tymi nie objęto ani Tatr, ani Czarnohory. W ostatnich latach powstały prace oparte na długiej serii pomiarów z regionu Czarnohory, w których scharakteryzowano podstawowe cechy klimatu oraz jego zmiany, z częściowym uwzględnieniem natężenia opadów i cyrkulacji atmosferycznej (Błażejczyk i Skrynyk, 2019a, 2019b).

Głównym celem niniejszej pracy jest przedstawienie wybranych charakterystyk opadów atmosferycznych oraz ich natężenia w Tatrach i Czarnohorze w kontekście zmian cyrkulacji atmosferycznej, a także ich porównanie w badanych masywach w ciągu ostatnich lat. Podjęto również próbę oceny zmian w natężeniu i intensywności opadów w okresie 1961-2015.

Materiały i metody

Klimat północnej części Karpat, w której leżą badane pasma Tatr i Czarnohory, jest kształtowany przez podobne masy powietrza, dlatego stosuje się dla niego klasyfikację typów cyrkulacji atmosferycznej Niedźwiedzia (Niedźwiedź, 2017). Kalendarz ten obejmuje okres od roku 1873 do chwili obecnej. Klasyfikacja jest w pełni reprezentatywna dla północnych Karpat w obszarze 49-51°N i 18-24°E. Ponieważ Czarnohora znajduje się bardzo blisko wschodniej granicy obszaru klasyfikacji przyjęto (podobnie jak Kholiavchuk i Cebulska, 2019), że dobrze reprezentuje także ten masyw górski. Klasyfikacja zawiera codzienne informacje o dominujących kierunkach adwekcji powietrza (21 lub 11 kategorii) oraz o masach powietrza (tab. 1).

W analizach warunków opadowych oparto się na sumach i maksymalnych wartościach dobowych, miesięcznych, sezonowych i rocznych oraz na liczbie dni z opadem ≥0,1 mm

Tabela 1. Opis typów cyrkulacji i mas powietrza według klasyfikacji Niedźwiedzia (2017)
Described types of atmospheric circulation and air masses according in line with the Niedźwiedź classification (2017)

Typy cyrkulacji atmosfery		Masy powietrzne
Typy antycyklonalne:	Typy cyklonalne:	
Na – Północna NEa – Północno-Wschodnia Ea – Wschodnia SEa – Południowo-Wschodnia Sa – Południowa SWa – Południowo-Zachodnia Wa – Zachodnia NWa – Północno-Zachodnia Ca – centralna sytuacja antycyklonalna (wyż) Ka – klin antycyklonalny lub wał wysokigo ciśnienia	Nc – Północna NEc – Północno-Wschodnia Ec – Wschodnia SEc – Południowo-Wschodnia Sc – Południowa SWc – Południowo-Zachodnia Wc – Zachodnia NWc – Północno-Zachodnia Cc – centralna sytuacja cyklonalna (niż) Bc – bruzda niskiego ciśnienia (różne kierunki przepływu powietrza)	PA – arktyczne PPm – polarne morskie PPms – polarne morskie stare PPmc – polarne morskie ciepłe PPk – polarne kontynentalne PZ – zwrotnikowe rmp – różne masy powietrza w ciągu doby
x – typ nieokreślony		

(RRdays), ≥10 mm (RR>10mm) i ≥30 mm (RR>30mm) w okresie 1961-2015 oraz na ich częstości w różnych typach cyrkulacji atmosferycznej i w różnych masach powietrza. W badaniach wykorzystano dobowe sumy opadów ze stacji Pożyżewska (PO, 1451 m n.p.m., ϕ 48˚09'N i λ 24˚32'E) położonej na północno-wschodnim skłonie Czarnohory i stacji Hala Gąsienicowa (HG, 1520 m n.p.m., ϕ 49°14'N i λ 20°00'E) leżącej na północnym skłonie Tatr, za okres 1961-2015. Stacje znajdują się na podobnej wysokości nad poziomem morza, nad powierzchniami trawiastymi w pobliżu górnej granicy lasu i są reprezentatywne dla opisu stosunków opadowych w badanych masywach.

Do weryfikacji stopnia wpływu cyrkulacji atmosferycznej na wielkość opadów i ich długoterminowe zmiany, obliczono kompleksowe wskaźniki cyrkulacji P (wskaźnik strefowy), S (wskaźnik południkowy) i C (wskaźnik cykloniczności). Zastosowano za Niedźwiedziem (1993) metodę Murraya i Lewisa (1966). Wskaźniki oblicza się w następujący sposób (Błażejczyk i Skrynyk, 2019b):

$$P = \sum_{n=1}^{365\,(366)} Pi \qquad S = \sum_{n=1}^{365\,(366)} Si \qquad C = \sum_{n=1}^{365\,(366)} Ci$$

gdzie: *Pi*, *Si*, i *Ci* są liczbą punktów (od-2 do +2) dla każdej doby, zależnie od typu cyrkulacji.

Dobowe wartości punktów dla wyliczenia poszczególnych wskaźników cyrkulacji (*Pi*, *Si*, *Ci*) zestawiono w tabeli 2. Dodatnie wartości wskaźnika *P* reprezentują lata czy sezony z dużą przewagą zachodniego napływu powietrza, a ujemne – adwekcji ze wschodu. Dodatnie wartości wskaźnika *S* mówią o napływie południowym, a ujemne o napływie północnym. Dodatnie wartości *C* informują o przewadze układów cyklonalnych, a ujemne – antycyklonalnych.

Tabela 2. Liczba punktów do wyznaczenia wskaźników cyrkulacji dla poszczególnych kierunków adwekcji lub typów cyrkulacji
Number of points used in determining circulation indicators for different advection directions or weather types

Wskaźniki cyrkulacji	Kierunek adwekcji lub typ cyrkulacji	Liczba punktów
P (przepływ zachód-wschód)	W NW, SW NE, SE E inne	*Pi* = +2 *Pi* = +1 *Pi* =-1 *Pi* =-2 *Pi* = 0
S (przepływ południe-północ)	S SW, SE NW, NE N inne	*Si* = +2 *Si* = +1 *Si* =-1 *Si* =-2 *Si* = 0
C (sytuacja cyklonalna/antycyklonalna)	Cc, Bc inne cyklonalne Ca, Ka inne antycyklonalne	*Ci* = +2 *Ci* = +1 *Ci* =-2 *Ci* =-1

Wyniki

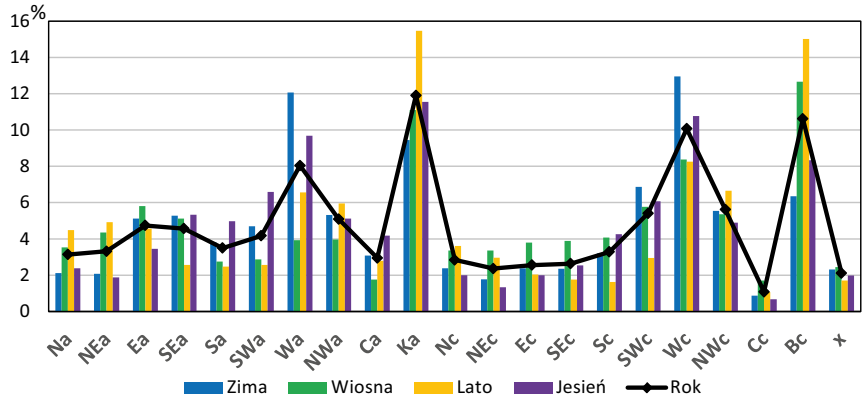
Ogólne cechy warunków cyrkulacyjnych i opadowych

W północnych Karpatach przez około 51% dni w roku dominuje cyrkulacja antycyklonalna, a w prawie 46% – cyklonalna (ryc. 1). Wartości podobne do rocznych częstości cyrkulacji antycyklonalnej i cyklonalnej występują zimą (53% i 45%), latem (52% i 46%) oraz jesienią (55% i 43%). Natomiast wiosną proporcje te są odwrócone i wynoszą odpowiednio 45% i 52%.

Napływ powietrza z sektora zachodniego obserwuje się przez około 28% dni w roku. Odsetek dni z napływem powietrza z innych kierunków jest prawie zawsze dwa razy mniejszy i wynosi: 14% dla kierunku północnego, 14% dla wschodniego i 15% dla południowego. Natomiast analizując wszystkie typy cyrkulacji, to najczęstsze są typy: Ka (12%) oraz Wc i Bc (po około 10% dni w roku). Stosunkowo często występuje (około 8%) również cyrkulacja zachodnia antycyklonalna (Wa).

Cyrkulacja atmosferyczna różni się w przebiegu rocznym (w skali miesięcy i sezonów). W północnych Karpatach występują znaczące różnice sezonowe dla prawie każdego typu cyrkulacji (ryc. 1). Na przykład, latem częste w skali roku typy Ka i Bc, występują jeszcze częściej (po około 15% dni w sezonie), a w przypadku Bc także wiosną (12,5%). W przypadku typów Wa i Wc zwiększoną ich częstość notuje się zimą (odpowiednio, około 12% i 13%) i jesienią (około 10%).

Warunki opadowe w obu regionach są zróżnicowanie, zachowując pewne podobieństwa. Średni roczny opad na stacji Pożyżewska (PO) wynosi 1446 mm, natomiast na Hali Gąsienicowej (HG) jest on większy – 1712 mm. Sumy opadów charakteryzują się znaczącymi różnicami pomiędzy poszczególnymi sezonami i stacjami. Udział opadów wiosennych i jesiennych na badanych stacjach różni się nieznacznie między sobą (PO, odpowiednio 25% i 23%; HG, odpowiednio 23% i 22%). Natomiast opady zimowe w Czarnohorze (PO) stanowią 19%, a w Tatrach (HG) 13% sumy rocznej. Latem jest sytuacja odwrotna: w Karpatach Wschodnich spada około 1/3 rocznej sumy opadów (PO, 33%), a w Tatrach (HG) – ponad 40%.



Ryc. 1. Częstość (%) typów cyrkulacji atmosferycznej według klasyfikacji Niedźwiedzia, 1961-2015
Frequency (%) of types of atmospheric circulation in line with the Niedźwiedź classification, 1961-2015

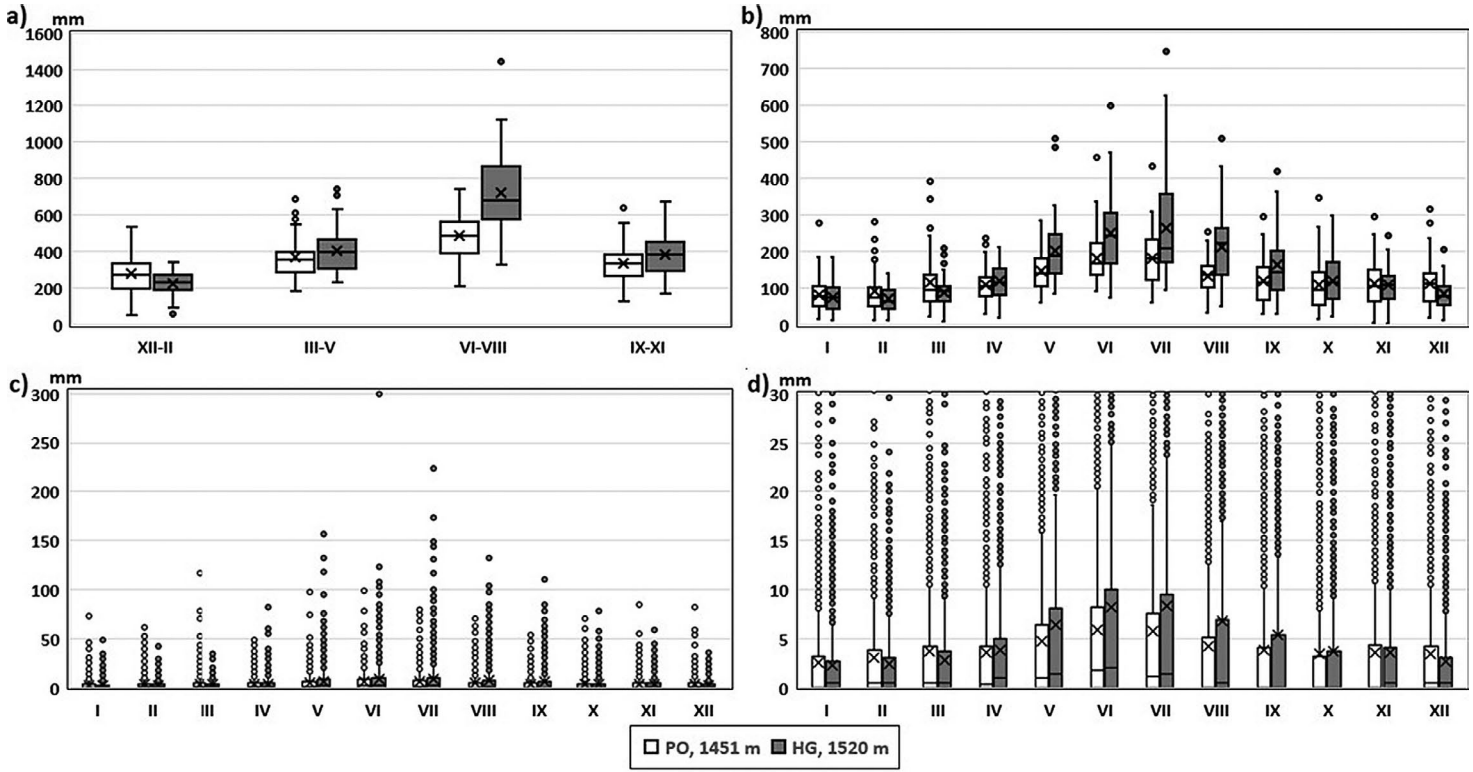
Obliczono współczynniki korelacji pomiędzy sezonowymi sumami opadów zanotowanymi na obydwu stacjach w okresie 1961-2015. Współczynniki te są stosunkowo niskie i wynoszą: zimą 0,39, wiosną – 0,27, latem – 0,53, jesienią – 0,58. Także dla wartości rocznych współczynnik korelacji jest niski i wynosi 0,21. Współczynniki te podkreślają odrębność warunków opadowych w poszczególnych sezonach.

Zimą w Czarnohorze przeważnie notowano większe sumy opadów niż w Tatrach (ryc. 2). Tylko w 18 latach te sumy były mniejsze niż w Tatrach, głównie w pierwszej połowie okresu badań. Dla przykładu wysokie sumy opadów zimą na Pożyżewskiej wynosiły: w roku 1970 – 504,7 mm, 1999 – 526,6 mm, 2007 – 530,2 mm i 2010 – 498,6 mm. Na Hali Gąsienicowej wysokie zimowe opady wystąpiły natomiast w następujących latach: 1966 (326,0 mm), 1974 (311,9 mm), 1982 (318,9 mm) i 1988 (337,8 mm).

Letnie sumy opadów w Tatrach prawie w całym okresie były większe niż w Czarnohorze (ryc. 2). Tylko w trzech przypadkach (1976, 1979 i 1998) było ich na HG niewiele mniej niż na PO. Latem największe sumy opadów wystąpiły w Tatrach w latach: 1980 (1120,3 mm), 2001 (1439,3 mm) i 2010 (1023,0 mm), natomiast w Czarnohorze – 1969 (731,3 mm), 2001 (740,3 mm) i 2010 (717,0 mm). Na wiosnę oraz jesienią w Tatrach prawie zawsze było więcej opadów niż w Czarnohorze (ryc. 2a).

Roczny rozkład opadów w poszczególnych miesiącach odzwierciedlają ich sezonowe sumy. Sumarycznie zimą w każdym miesiącu w Czarnohorze opady są większe niż w Tatrach. Od maja w obu masywach miesięczne sumy opadów zaczynają wzrastać, a ich kulminacja następuje w lipcu. W sierpniu w Czarnohorze jest znacznie mniej opadów w porównaniu do sąsiednich miesięcy (ryc. 2b).

Największa dobowa suma opadów w Tatrach (300 mm) została zarejestrowana 30 czerwca 1973 r. przy północnej sytuacji cyklonalnej, a w Czarnohorze (117 mm) – 5 marca 2001 r. przy północnym napływie antycyklonalnym. (ryc. 2c). W Tatrach dobowe opady ponad 100 mm występują od maja do września. Natomiast w Czarnohorze tylko raz zdarzył się opad o dobowej sumie ponad 100 mm. Mediana jest najwyższa w maju, czerwcu oraz lipcu (ryc. 2d).



Ryc. 2. Rozkład sezonowych (a), miesięcznych (b), dobowych (c) oraz dobowych z powiększoną skalą (d) sum opadów na stacjach Pożyżewska (PO) oraz Hala Gąsienicowa (HG), 1961-2015

Distribution of (a) seasonal, (b) monthly, (c) daily and (d) daily with increased scale precipitation totals at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gasienicowa stations (PO and HG), 1961-2015

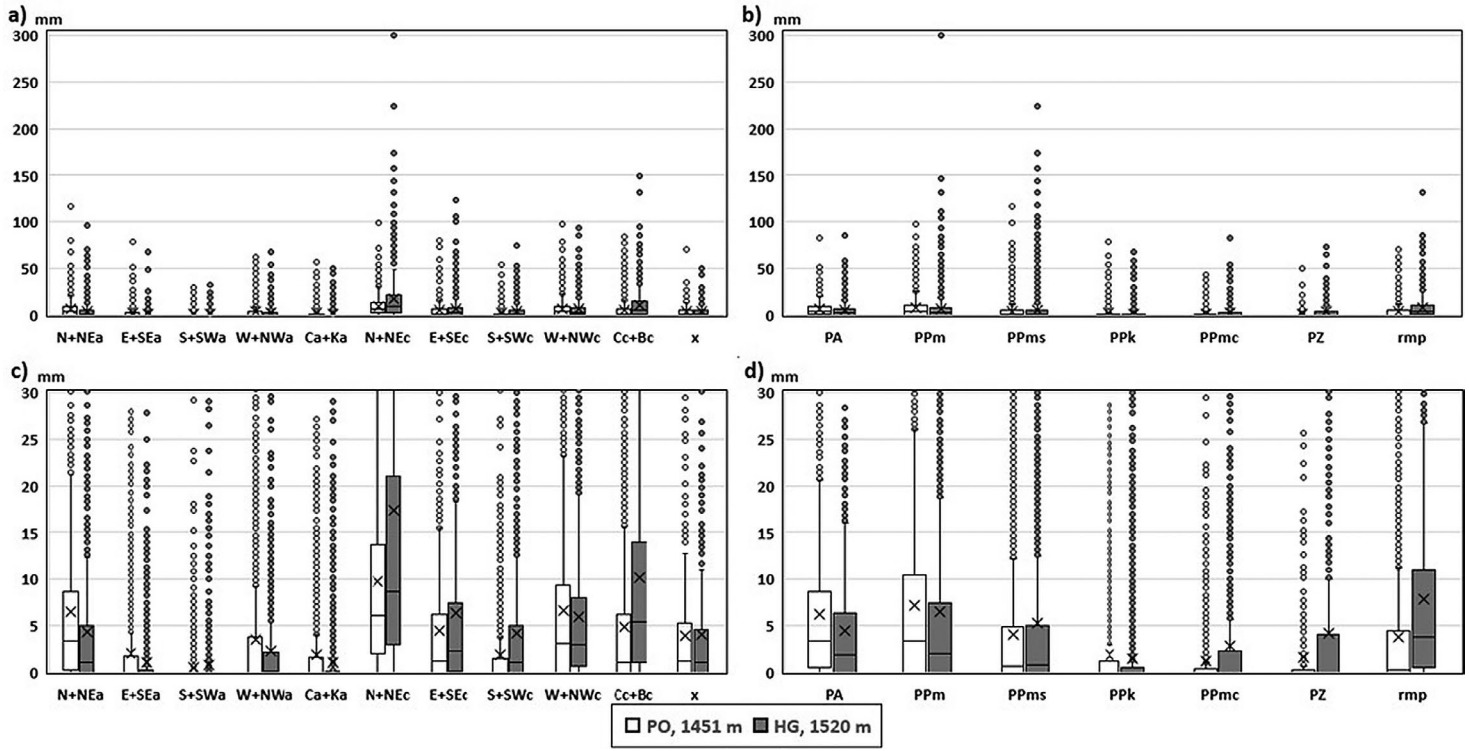
Opady a cyrkulacja atmosferyczna

Dla określenia cyrkulacyjnych uwarunkowań natężenia ekstremalnych opadów dobowych wykorzystano uproszczoną klasyfikację typów cyrkulacji (11 typów) oraz klasyfikację mas powietrza Niedźwiedzia (ryc. 3). Wyraźnie widać, że sytuacja cyklonalna generowała najobfitsze opady. Największe dobowe sumy opadów przypadały podczas sytuacji N+NEc oraz Cc+Bc. Pozostałe typy niekiedy powodowały ulewny deszczy (N+NEa, E+SEc, W+NWc). Sytuacja jest podobna w obu masywach i różni się wielkością sum opadów (ryc. 3a i 3c). Największe dobowe sumy opadów przypadały na dni z powietrzem arktycznym, polarnym morskim oraz polarnym morskim starym (ryc. 3b i 3d). Powietrze polarne morskie ciepłe i kontynentalne oraz zwrotnikowe było znacznie uboższe w opady.

Wzięto także pod uwagę liczbę dni z opadem dobowym powyżej 10 mm oraz powyżej 30 mm (ryc. 4). Wyraźnie widać różnicę pomiędzy stacjami dla poszczególnych typów cyrkulacji. Adwekcja powietrza N+NEa i W+NWc wiązała się z większym odsetkiem dni z opadem powyżej 10 mm w Czarnohorze niż w Tatrach, a podczas adwekcji N+NEc, E+SEc i Cc+Bc sytuacja była przeciwna (ryc. 4a). Największy odsetek dni z opadami ponad 30 mm zarejestrowano podczas adwekcji N+NEc (ryc. 4c). Na Hali Gąsienicowej było ich prawie trzy razy więcej (17%) niż na Pożyżewskiej (6%). Także w Tatrach podczas adwekcji Cc+Bc było 8% dni z opadem powyżej 30 mm (ryc. 4c).

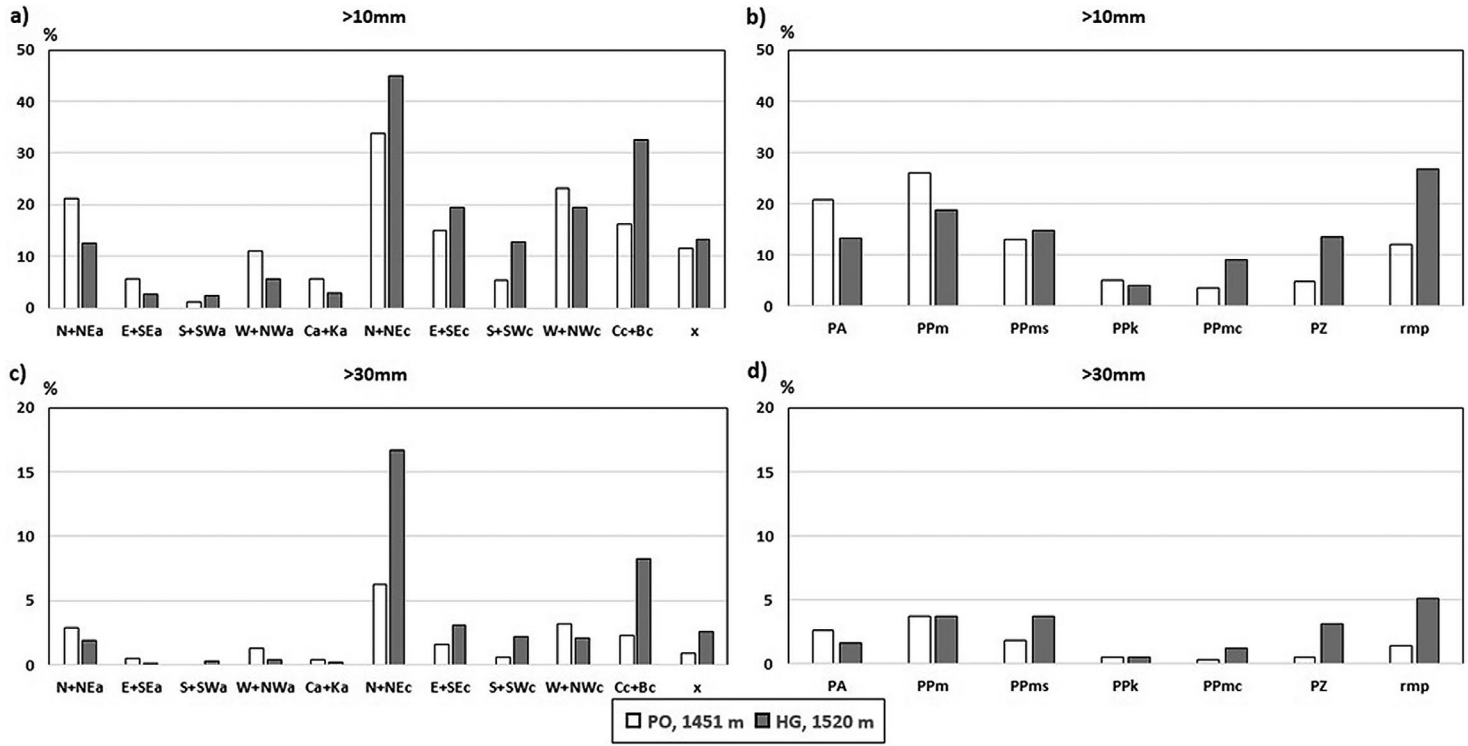
W Czarnohorze, w porównaniu z Tatrami, w dniach opadowych znacząco większy jest udział sytuacji antycyklonalnych (ryc. 3a, 3c, 4a i 4c). Jest to spowodowane odległością rzędu 350 km. Przy takiej odległości ma miejsce przesunięcie czasowe wkraczania nad obszar Czarnohory opadów związanych z cyklonalną cyrkulacją zachodnią, z którą głównie są związane strefy opadowe. W tym czasie nad Tatrami może już panować cyrkulacja antycyklonalna. Sugeruje to, że w badaniach obejmujących całą północną część Karpat (łącznie z pasmem Czarnohory) należałoby korzystać ze specjalnie przygotowanego dla tego obszaru kalendarza typów cyrkulacji i mas powietrza.

Analizując wpływ mas powietrza na natężenie opadów warto zaznaczyć, że w przypadku liczby dni z opadem >30 mm nie znaleziono prawie żadnych zależności (ryc. 4d). Najmniejszy odsetek dni z opadem >30 mm wystąpił w czasie zalegania mas PPk i PPmc. Natomiast w przypadku liczby dni z opadem powyżej 10 mm obserwujemy zwiększony odsetek dni podczas mas powietrza arktycznego i polarnego morskiego, w Czarnohorze niż w Tatrach (odpowiednio 21% i 26% oraz 13% i 19%). W czasie zalegania mas powietrza polarnego morskiego ciepłego, zwrotnikowego i niesklasyfikowanego sytuacja była przeciwna (ryc. 4b).



Ryc. 3. Rozkład dobowych sum opadów w różnych: typach cyrkulacji (a), typach cyrkulacji z powiększoną skalą (b), masach powietrza (c) i masach powietrza z powiększoną skalą (d) na stacjach Pożyżewska (PO) oraz Hala Gąsienicowa (HG), 1961-2015

Distribution of daily precipitation totals under different: (a) circulation types, (b) circulation types (with enlarged scale), (c) air masses, and (d) air masses with increased scale, at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gasienicowa stations (PO and HG), 1961-2015

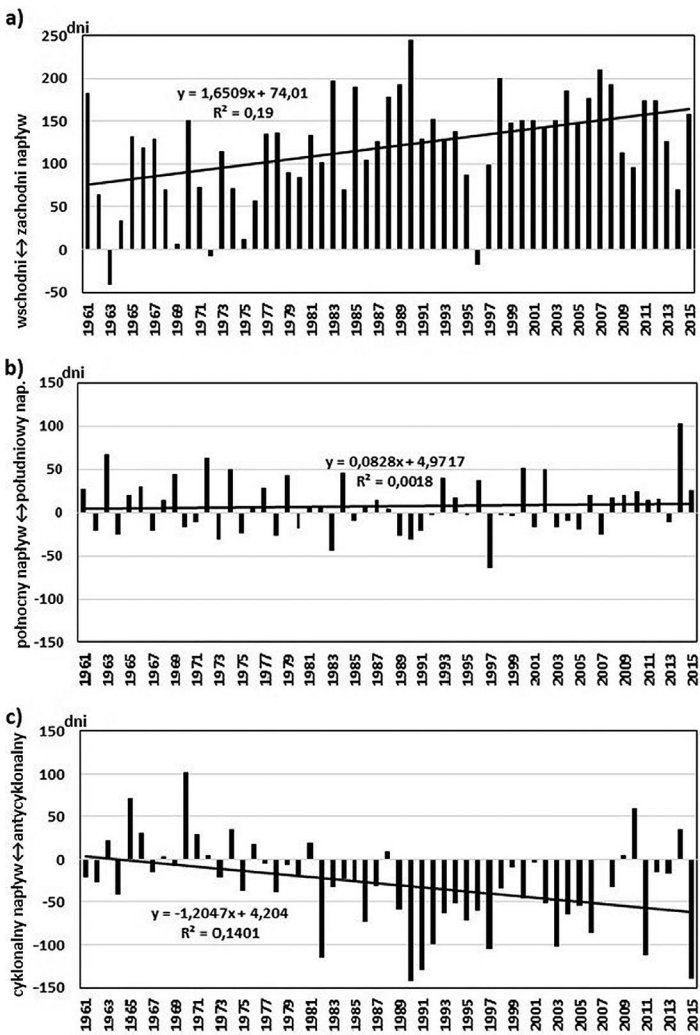


Ryc. 4. Częstość (%) liczby dni z opadem >10 mm i >30 mm w różnych: typach cyrkulacji (a i c) oraz masach powietrza (b i d) na stacjach Pożyżewska (PO) oraz Hala Gąsienicowa (HG), 1961-2015

Frequency of occurrence (%) of days with precipitation >10 mm and >30 mm under different circulation types (a and c) and air masses (b and d) at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gasienicowa stations (PO and HG), 1961-2015

Wieloletnie zmiany opadów i cyrkulacji atmosferycznej

Wahania i zmiany klimatu, telekoneksje oraz inne czynniki powodują zmienność w cyrkulacji atmosfery z roku na rok prawie w każdej części świata. W północnych Karpatach także nastąpiły zmiany w cyrkulacji atmosferycznej w badanym okresie (ryc. 5). Największe zmiany zaobserwowano w przypadku wskaźnika napływu strefowego (*P*) i wskaźnika cykloniczności (*C*) (ryc. 5a i 5c). Podczas gdy w ciągu pierwszych 10 lat dominowały układy cyklonalne to po 1981 r. częstsze były układy antycyklonalne. Wyjątkiem był rok 2010 i 2014 kiedy sytuacje niżowe występowały częściej wyżowej pogody. W przypadku wskaźnika *P*, obserwujemy stopniową intensyfikację napływu powietrza z sektora zachodniego. Nie

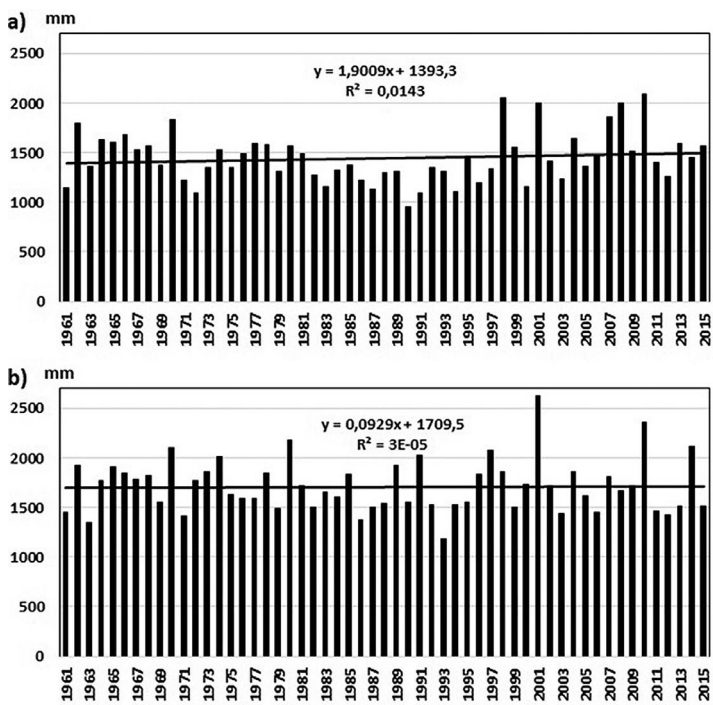


Ryc. 5. Roczne wartości wskaźników cyrkulacji P (a), S (b) i C (c) w północnych Karpatach, 1961-2015
Annual values for the P, S and C circulation indices in the northern Carpathians (a, b and c respectively), 1961-2015

można natomiast wskazać żadnych systematycznych zmian wartości wskaźnika *S* (ryc. 5b). W poszczególnych latach dominował napływ mas powietrza z południa, bądź z północy.

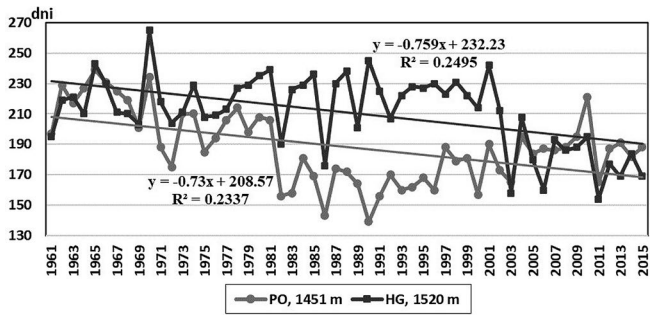
Na Hali Gąsienicowej sumy opadów były zawsze większe niż na Pożyżewskiej, co niewątpliwie wiąże się z większym wyniesieniem nad poziomem morza głównej grani masywu Tatr, co generuje zwiększone opady orograficzne. W okresie 1961-2015 trend zmian rocznych sum opadów jest podobny w obu masywach (ryc. 6). W pierwszym dziesięcioleciu (do 1970 r.) zarejestrowano ich wyraźny wzrost opadów w obydwu masywach. Przy czym od 1971 r. obserwuje się ich spadek na obydwu stacjach. W przypadku Pożyzewskiej trwało to do 1990 r. (ryc. 6a), a na Hali Gąsienicowej do 1993 r. (ryc. 6b). Wyjątkiem był rok 1980, gdy sumy opadów w Tatrach były wyższe, niż wskazywał ogólny trend ich zmian. Po okresie zmniejszenia sum opadów wyraźnie widać ich wzrost aż do roku 2010. W ostatnich 5 latach badanego okresu miało miejsce zmniejszenie sum opadów.

Jedynie w latach 2001 i 2010 w obu masywach zarejestrowano maksymalne sumy opadów (ryc. 6). W roku 2001 było 19 dni z cyrkulacją Ca+Ka, 18 z Cc+Bc, 12 z W+NWa, 11 z N+NEc i W+NWc. Najwięcej było dni z powietrzem polarnym morskim starym (39), polarnym morskim (23) oraz polarnym kontynentalnym (12). Natomiast w 2010 r. było 17 dni z cyrkulacją Cc+Bc, 16 dni z Ca+Ka, 13 dni z N+NEc oraz 10 dni z N+NEa i W+NWc. W 2010 masy powietrza charakteryzowały się większą różnorodnością niż w 2001, najwięcej było dni z powietrzem polarnym morskim starym (29), polarnym morskim (19) oraz polarnym kontynentalnym (15).

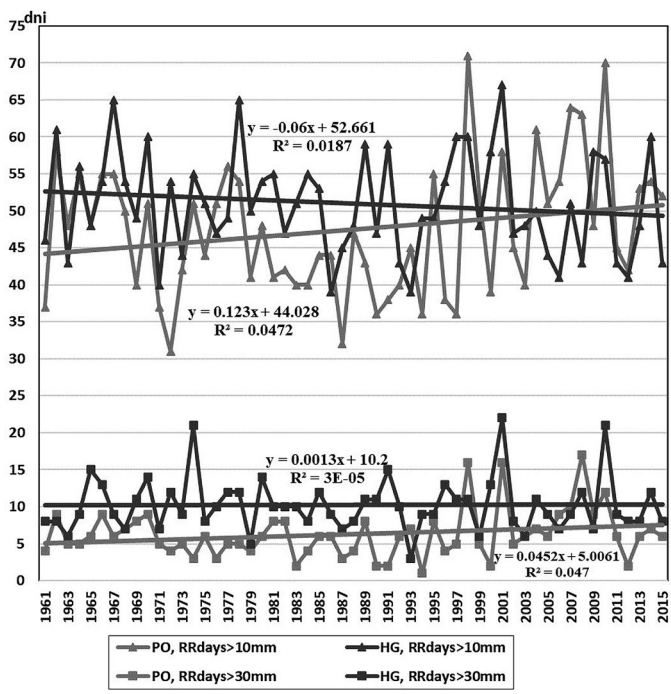


Ryc. 6. Roczne sumy opadów (mm) na stacjach Pożyżewska (a) i Hala Gąsienicowa (b), 1961-2015
Annual (mm) precipitation totals at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gasienicowa stations (a and b respectively), 1961-2015

W obydwu masywach pod koniec badanego okresu rejestrowano coraz częstsze przypadki ekstremalnych sum opadów. Jednak bardzo ważne jest określenie rocznych zmian liczby dni z opadem ≥0,1 mm oraz dni z opadem >10 mm i >30 mm. W Czarnohorze do 1990 r. obserwuje się spadek liczby dni z opadem ≥0,1 mm (do 139 dni), po czym miał miejsce ich wzrost (ryc. 7), co jednak nie przeszkodziło, że ogólny trend zmian jest ujemny



Ryc. 7. Roczna liczba dni z opadem ≥0,1 mm (RRdays) na stacjach Pożyżewska (PO) i Hala Gąsienicowa (HG), 1961-2015
Annual numbers of days with precipitation (RR days ≥ 0.1 mm) at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gąsienicowa stations (PO and HG), 1961-2015



Ryc. 8. Roczna liczba dni z opadem >10 mm (RRdays>10mm) i >30 mm (RRdays>30 mm) na stacjach Pożyżewska (PO) i Hala Gąsienicowa (HG), 1961-2015
Annual numbers of days with precipitation more than 10 mm (RR days >10mm) and more than 30 mm (RR-days>30mm) at the Ukrainian Pozhyzhevska and Polish Hala Gąsienicowa stations (PO and HG), 1961-2015

(-7,3 dnia/10 lat). Liczba dni z opadem >10 mm i >30 mm (ryc. 8) wzrastała (odpowiednio, 1,23 dni i 0,45 dni na 10 lat). Także w Tatrach ogólny trend zmian liczby dni z opadem był podobny jak w Czarnohorze i wyniósł -7,59 dnia/10 lat (ryc. 7). W przypadku liczby dni z opadem >10 mm (ryc. 8) trend zmian jest ujemny (0,6 dni/10 lat). Natomiast liczba dni z opadem >30 mm wzrosła, lecz nieznacznie (0,013 dni/10 lat).

Podsumowanie i wnioski

W rejonie północnych Karpat dominuje napływ powietrza z kierunków zachodnich (28% dni w roku). Najczęstsze są typy: Ka (12%), Bc (10%) i Wc (10%) oraz Wa (8%). W miesiącach letnich typy Ka i Bc występują jeszcze częściej (po około 15% dni w roku), natomiast zimą typy Wc i Wa notowane są z częstością13% i 12%. Jesienią odsetek tych typów wynosi po około 10%.

Średnie roczne sumy opadów w Tatrach (1712 mm) są większe niż w Czarnohorze (1446 mm). Należy to wiązać z różną wysokością grani głównych grzbietów Tatr i Czarnohory; Tatry są o wiele wyższym masywem górskim. Również ma znaczenie położenie w stosunku do deszczonośnych mas powietrza albo innymi słowami – orientacja Tatr (W-E) i Czarnohory (NW-SE). Średnioroczny procent dni napływu powietrza w roku: 28 z kierunku zachodniego, 14 – północnego, 14 – wschodniego i 15 – południowego. Stacja Pożyżewska znajduje się po zawietrznej stronie masywu górskiego w większości dni w roku. Także Przy odległości 350 km ma miejsce przesunięcie czasowe wkraczania nad obszar Czarnohory opadów związanych z cyklonalną cyrkulacją zachodnią, z którą głównie są związane strefy opadowe.

Pewne znaczenie może także mieć rzeźba otoczenia terenów badań. Na północ od Tatr znajdują się pasma: Gorce, Beskid Średni i Wyspowy, a na północ i północny-wschód od Czarnohory: Beskidy Pokucko-Bukowińskie i Gorgany. Ogólna wysokość grani ostatnich jest wyższa od otoczenia Tatr. Klimat Czarnohory cechuje się bardziej kontynentalnym charakterem niż klimat Tatr (Koliavchuk i Cebulska, 2018; Błażejczyk, 2019; Błażejczyk i Skrynyk, 2019a, 2019b). Rozkład sezonowy opadów wiosną i jesienią w obu masywach jest podobny, natomiast zimą jest ich więcej w Czarnohorze, a latem w Tatrach. Największe sumy opadów występują w ciepłym półroczu, przy adwekcji z N+NEc, podczas sytuacji cyklonalnych, a także w masach PA, PPm, PPms, rmp.

Ogólnie trend rocznych sum opadów jest dodatni, ale nie jest istotny statystycznie. Błażejczyk (2019) dla serii obserwacyjnej 1951-2015 stwierdził dla Kasprowego Wierchu nieistotny statystycznie ujemny trend wielkości opadów. Dodatnie i ujemne, nieistotne statystycznie trendy zmian są obserwowane w wielu regionach świata. Najczęściej, obserwowany jest wzrost opadów tam, gdzie obecnie są one wysokie, oraz spadek w regionach gdzie jest ich niedobór (Trenberth, 2011). Wielkość trendu zmian jest pochodną emisji gazów cieplarnianych (IPCC, 2013). Projekcja zmian opadów na podstawie pięciu modeli wskazuje wzrost rocznej ich sumy w górach wysokich Polski nawet o 400 mm w latach 2061-2090 (Szwed, 2019).

Natomiast istotny jest trend liczby dni z opadem, która zmniejsza się w Czarnohorze na -7,3 dni/10 lat, a w Tatrach na -7,59 dni/10 lat. Dla Kasprowego Wierchu Błażejczyk (2019) określił nieistotny trend ujemny wynoszący -1,3 dnia na 10 lat.

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że liczba dni z opadem zarówno w Tatrach, jak i w Czarnohorze zmniejsza się. W przypadku deszczy intensywnych (≥10 i ≥30 mm) zmiany w badanych masywach są rozbieżne: trend ujemny w Tatrach a dodatni w Czarnohorze (choć w obydwu przypadkach zmiany te są niewielkie i nieistotne statystycznie). Wyniki obecnych badań sugerują, aby w przyszłych badaniach obejmujących północną część Karpat (łącznie z pasmem Czarnohory) korzystać ze specjalnie przygotowanego dla tego obszaru kalendarza typów cyrkulacji i mas powietrza.

Ryciny i tabele, pod którymi nie zamieszczono źródła, są opracowaniami własnymi autorów artykułu.

Piśmiennictwo

Błażejczyk, K. & Skrynyk, O. (2019a). Long term changes of air temperature, precipitation and snow cover in three mountain ridges of Central Europe. W: L. Kolendowicz, E. Bednorz, & A. M. Tomczyk (red.), *Zmienność klimatu Polski i Europy oraz jej cyrkulacyjne uwarunkowania* (s. 53-70). Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.

Błażejczyk, K., & Skrynyk, O. (2019b). Principal features of Chornohora climate (Ukrainian Carpathians). *Bulletin of Geography, Physical Geography Series*, *17*(1), 61-76. https://doi.org/10.2478/bgeo-2019-0015

Błażejczyk, K. (2019). Sezonowa i wieloletnia zmienność niektórych elementów klimatu w Tatrach i Karkonoszach w latach 1951-2015. *Przegląd Geograficzny*, *91*(1), 41-62. https://doi.org/10.7163/przg.2019.1.2

Błażejczyk, K., Baranowski, J., Błażejczyk, A., & Szmyd, J. (2013). Klimat i bioklimat Hali Gąsienicowej. W: Z. Rączkowska, & A. Kotarba (red.), *Dolina Suchej Wody w Tatrach. Środowisko i jego współczesne przemiany*. Prace Geograficzne, *239* (s. 67-95). Warszawa: Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN.

Bokwa, A., Wypych, A., & Ustrnul, Z. (2013). Climate Changes in the Vertical Zones of the Polish Carpathians in the Last 50 Years. W: J. Kozak, K. Ostapowicz, A. Bytnerowicz, & B. Wyżga (red.), *The Carpathians: Integrating Nature and Society Towards Sustainability*. Environmental Science and Engineering. Berlin, Heidelberg: Springer.

Cebulak, E. (1983). Maximum daily rainfalls in the Tatra Mountains and Podhale Basin. *Zeszyty naukowe UJ*, *Prace Geograficzne*, *57*, 337-343.

Cheval, S., Birsan, M. V., & Dumitrescu, A. (2014). Climate variability in the Carpathian Mountains Region over 1961-2010. *Global and Planetary Change*, *118*, 85-96. https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.04.005

IPCC. (2013). Summary for Policymakers. W: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M.M.B. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, & P. M. Midgley (red.). *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 1-30). Cambridge: University Press.

Kholiavchuk, D. & Cebulska, M. (2019). The highest monthly precipitation in the area of the Ukrainian and the Polish Carpathian Mountains in the period from 1984 to 2013. *Theoretical and Applied Climatology*, *138*(3-4), 1615-1628. https://doi.org/10.1007/s00704-019-02910-z

Konček, M. (1974). *Klimat Tatr*. Folia Geographica, 4, Bratysława: Wydawnictwo Słoweńskiej Akademii.

Migała, K. (2005). *Piętra klimatyczne w górach Europy a problem zmian globalnych*. Acta Universitatis Wratislaviensis 2718. Studia Geograficzne 78, Wrocław: Wydawnictwo Uniwersytetu Wrocławskiego.

Murray, R., & Lewis, R.P. (1966). Some aspects of the synoptic climatology of the British Isles as measured by simple indices. *Meteorological Magazine*, *95*, 193-203.

Niedźwiedz, T. (2003). Extreme precipitation events on the northern side of the Tatra mountains. *Geographia Polonica*, *76*(2), 15-23.

Niedźwiedź, T. (1996). Wieloletnia zmienność temperatury powietrza i opadów w Tatrach. W: A. Kotarba (red.), *Przyroda Tatrzańskiego Parku Narodowego a Człowiek, 1, Nauki o Ziemi* (s. 161-163), Kraków-Zakopane: Materiały I Ogólnopolskiej Konferencji, Zakopane, 6-9 października 1995.

Niedźwiedź, T. (1992). Climate of the Tatra Mountains. *Mountain Research and Development*, *12*(2), 131-146. https://doi.org/10.2307/3673787

Niedźwiedź, T. (2017). *Kalendarz typów cyrkulacji atmosfery dla Polski południowej – zbiór komputerowy*. Sosnowiec: Uniwersytet Śląski, Katedra Klimatologii.

Skrynyk, O. (2019). First results and perspectives of the meteorological research at the Observatory at Pip Ivan Mt. *Bulletin of Taras Shevchenko National University of Kyiv. Geography*, *74*(1), 82-88. https://doi.org/10.17721/1728-2721.2019.74.14

Skrynyk, O., & Rymarowicz, L. (2018). Meteorological observations at Pip Ivan (Chornohora) and Kasprowy Wierch (Tatras) before the Second World War. *Przegląd Geofizyczny*, *63*(4), 363-373.

Spinoni, J., Szalai, S., Szentimrey, T., Lakatos, M., Bihari, Z., Hiebl, J., Auer, I., Milkovic, J., Štepánek, P., Zahradnícek, P., Kilar, P., Limanowka, D., Pyrc, R., Cheval, S., Dumitrescu, A., Deak, G., Matei, M., Antolovic, I., Nejedlík, P., & et al. (2015). Climate of the Carpathian Region in the period 1961-2010: climatologies and trends of 10 variables. *International Journal of Climatology*, *35*(7), 1322-1341. https://doi.org/10.1002/joc.4059

Szwed, M. (2019). Variability of precipitation in Poland under climate change, *Theoretical and Applied Climatology*, *135*, 1003-1015. https://doi.org/10.1007/s00704-018-2408-6

Trenberth, K. E. (2011). Changes in precipitation with climate change. *Climate Research*, *47*, 123-138. https://doi.org/10.3354/cr00953

Ustrnul, Z., Walawender, E., Czekierda, D., Štasny, P., Lapin, M., & Mikulova, K. (2015). Precipitation and snow cover. W: K. Dąbrowska, & M. Guzik (red.), *Atlas of the Tatry Mountains. Abiotic nature*. Zakopane: Tatra National Park.

Summary

While significant increases in air temperature are being observed in the context of climate change, precipitation characteristics, indicators and indices seem to be changing in a more regionally-variable manner. High-mountain areas prove particularly subject to fluctuations and changes of climate, given that mountains serve as barriers to masses of air flowing over them, with the result that atmospheric precipitation totals are high in the context of the so-called orographic rainfall. Overall, the Chornohora represents the highest range anywhere in Ukraine's Carpathian Mountains, as there are six peaks over 2000 m a.s.l. capable of serving as a barrier running NW-SE. Nevertheless, the main ridge of the High Tatras (of the Slovakia-Poland borderland) is even higher and runs W-E. Each massif is some 30 km in length, while the two ranges are separated by a distance of almost 350 km. Main drainage divides run along the highest ridges here, with the Tatras se-

parating the drainage basins of the Vistula and Danube, while the Chornohora represent a divide between the Prut and Tysa basins. However, the later destination of the latter's waters are in both cases the Danube.

The aim here has been to present characteristics (intensities and it's trends) of atmospheric precipitation in Tatra and Chornohora Mts. as these are seen to relate to atmospheric circulation. To this end, the dependent relationship between intensity of precipitation and atmospheric circulation was examined exhaustively, with changes in the latter considered from the point of view of intensity of precipitation in the massifs under study, and with trends for precipitation over the study period also looked for.

The Niedźwiedź (2017) classification of types of atmospheric circulation was applied, with annual values calculated for circulation indicators P (a west-east inflow), S (a south--north inflow) and C (a cyclonic/anticyclonic inflow). Overall, the study drew on 1961-2015 daily precipitation data from the north-eastern slope of Chornohora Mts. (as represented by Ukraine's Pozhyzhevska weather station, PO, 1451 m a.s.l., ϕ 48˚09'N and λ 24˚32'E), as well as the north slope of the Tatra Mts. (as represented by Poland's Hala Gasienicowa weather station, HG, 1520 m a.s.l., ϕ 49°14'N and λ 20°00'E).

An air inflow from western directions was found to have prevailed over 28% of the days in the average year (Fig. 1). The most frequent types involved here were: Ka (12%), Bc (10%), Wc (10%) and Wa (8%). During the summer months (JJA), it is the Ka and Bc types that are even more frequent (present on approx. 15% of summer days). Types Wc and Wa in turn occur more frequently in winter (DJF) – respectively 13% and 12% of the time. In autumn, these types reach a level of occurrence around 10%.

At 1712 mm, the average annual rainfall total for Tatra Mountains is higher than that for the Chornohora (on 1446 mm). While the seasonal distribution of rainfall in spring and autumn looks almost the same in the two massifs, winter brings more precipitation in the Chornohora, while summer is a wetter season in the Tatras (Fig. 2). Largest amounts of precipitation nevertheless fall in the warm half-year, in the circumstances of N+NEa advection, cyclonic situations and under arctic, polar-marine or polar-marine transformed air masses (Figs. 3 and 4).

The largest changes over time are to be observed for the zonal inflow index (P) and the cyclonic index (C). The P index points to increased numbers of days with a western circulation, while the C index confirms the domination of anticyclonic circulation (Fig. 5). The trend for annual rainfall totals is an upward one overall in both regions, but in neither does this achieve statistical significance (Fig. 6). Equally, there is a downward trend line for numbers of days featuring precipitation (RRdays) in the cases of both the Chornohora and Tatra ranges (equal to -7.3 days/10 years and -7.59 days/10 years respectively) (Fig. 7). On the other hand, the trend for numbers of days with higher rainfall, e.g. with RRdays>10mm is upward for the Chornohora (at +1.23 days/10 years), but downward for the Tatra Mountains (at -0.6 days/10 years) (Fig. 8).

[Wpłynęło: kwiecień 2019; poprawiono: czerwiec 2020]