



Zmiany w strukturze odpływu wody ze zlewni karpackich w półroczu hydrologicznym zimowym w latach 1981-2020

Changes in water-runoff patterns in Carpathian catchments during the winter hydrological half-years of the 1981-2020 period

Witold Bochenek  Małgorzata Kijowska-Strugała 

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania im. S. Leszczyckiego PAN

Stacja Badawcza w Szymbarku

38-311 Szymbark 430

witold.bochenek@zg.pan.krakow.pl • mkijowska@zg.pan.krakow.pl

Zarys treści. Postępujące zmiany klimatyczne (wzrost temperatury powietrza, zmiana rozkładu opadów w ciągu roku) wywierają wpływ na genezę zasilania cieków (opadowe, roztopowe i gruntowe). Głównym celem badań było przestrzenne i czasowe określenie struktury odpływu korytowego i kierunków jej zmian w wybranych zlewniach rzecznych w Karpatach Zachodnich w zimowym półroczu hydrologicznym, w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Badaniami objęto cztery zlewnie, reprezentujące cechy rzeźby beskidzkiej (Soła i Oślawa) oraz pogórskiej (Skawinka i Stobnica), dla których określono genezę zasilania cieków w okresie 40 lat (1981-2020). Do badań wykorzystano średnie dobowe przepływy w profilach zamykających wybrane zlewnie. Interpretację genyzy zasilania umożliwiły dane meteorologiczne: suma i rodzaj opadu, grubość pokrywy śnieżnej i temperatura powietrza. Średni odpływ półroczu zimowego (H_{WHY}) kształtował się od 150,3 mm (Skawinka) do 348,8 mm (Oślawa), natomiast udział H_{WHY} w odpływie rocznym (H_A) wyniósł średnio od 50,9% (Soła) do 60,4% (Stobnica). W latach 1981-2020 H_{WHY} nie wykazywał statystycznie istotnych kierunków zmian. Ujemne trendy H_{WHY} stwierdzono od 2000 r. W badanych zlewniach wystąpiło zróżnicowanie dominujących źródeł zasilania cieków w H_{WHY} . W zlewni Soły największy udział miało zasilanie roztopowe (40,1%), w zlewni Oślawy – zasilanie opadowe (38,0%), zaś w zlewni Skawinki przeważało zasilanie gruntowe (43,4%). W zlewni Stobnicy udział zasilania opadowego i gruntowego był podobny (36-38%). We wszystkich zlewniach wystąpiła recesja odpływu spowodowanego roztopami i wzrost roli zasilania gruntowego. Zmiany pokrycia terenu wpłynęły na wielkość współczynnika odpływu α . Znikoma zmiana α w badanym okresie w zlewni Skawinki spowodowana była 5-krotnym wzrostem obszarów zabudowy, natomiast największe zmniejszenie współczynnika odpływu α , które wystąpiło w zlewni Stobnicy, było spowodowane spadkiem udziału gruntów ornych z 61,0% (1990 r.) do 46,4% (2018 r.) i równoczesnym wzrostem obszaru lasu z 32,1% do 43,4%.

Słowa kluczowe: opad śnieżny, odpływ rzeczny, półrocze zimowe, Karpaty Zachodnie.

Keywords: snowfall, river runoff, winter hydrological half-year, Western Carpathians.

Wstęp

Globalne zmiany klimatyczne dotyczą głównie wzrostu ilości energii słonecznej docierającej do Ziemi (natężenie promieniowania słonecznego i usłonecznienie) (Yang et al., 2022). Ma to wpływ na kształtowanie się i stabilność mas powietrza i skutkuje wzrostem temperatury (Hassan i Nile, 2021). Wzrost temperatury powietrza nasilił się w okresie ostatnich 40 lat i występuje ze zróżnicowanym natężeniem w skali świata (Krusell i Smith, 2022). Zróżnicowanie to obserwowane jest także w mniejszej skali przestrzennej (Karp

Zachodnich), modyfikowane przez piętrowość klimatyczną, pokrycie terenu oraz rozwój ośrodków miejskich (Bokwa et al., 2013; Wypych et al., 2018).

Wzrost temperatury powietrza wpływa na wielkość parowania terenowego i możliwość tworzenia się chmur opadowych (Beljaars, 1996). Dodatkowo trendy zmian temperatury powietrza w zimowym półroczu hydrologicznym, będące skutkiem coraz mniejszej roli stacjonarnych, antycyklonalnych ośrodków barycznych, powodują zmniejszenie udziału opadu śnieżnego w sumie opadu tej części roku. Skutkiem hydrologicznym takiej sytuacji jest recesja odpływu roztopowego (suma i udział w odpływie w półroczu hydrologicznym) (Qin et al., 2020). Wiele modeli wskazuje, że ocieplenie wpływa na hydroklimat w skali globalnej, regionalnej i lokalnej (Randal et al., 2007).

Zmiany w strukturze przepływu wody i udziale wód roztopowych w odpływie rzeczonym są ważnym wskaźnikiem zmian klimatycznych (Hodgkins et al., 2003; Shen et al., 2018), jednak są stosunkowo słabo zbadane. Niezwykle ważne jest zrozumienie wpływu zmian klimatu w odniesieniu do sezonowych zmian struktury odpływu w skali zlewni. Zmiany klimatu wpływają na wysokość opadów stałych, czas i prędkość topnienia pokrywy śnieżnej i dostarczania wody roztopowej do gleby. Zmiana relacji między opadami śnieżnymi i deszczowymi ma istotny wpływ na zarządzanie zasobami wodnymi w danym regionie. Zmiany te odgrywają szczególną rolę w obszarach górskich, gdzie wzrost temperatury powietrza jest większy w porównaniu z obszarami nizinnymi (Lemke et al., 2007).

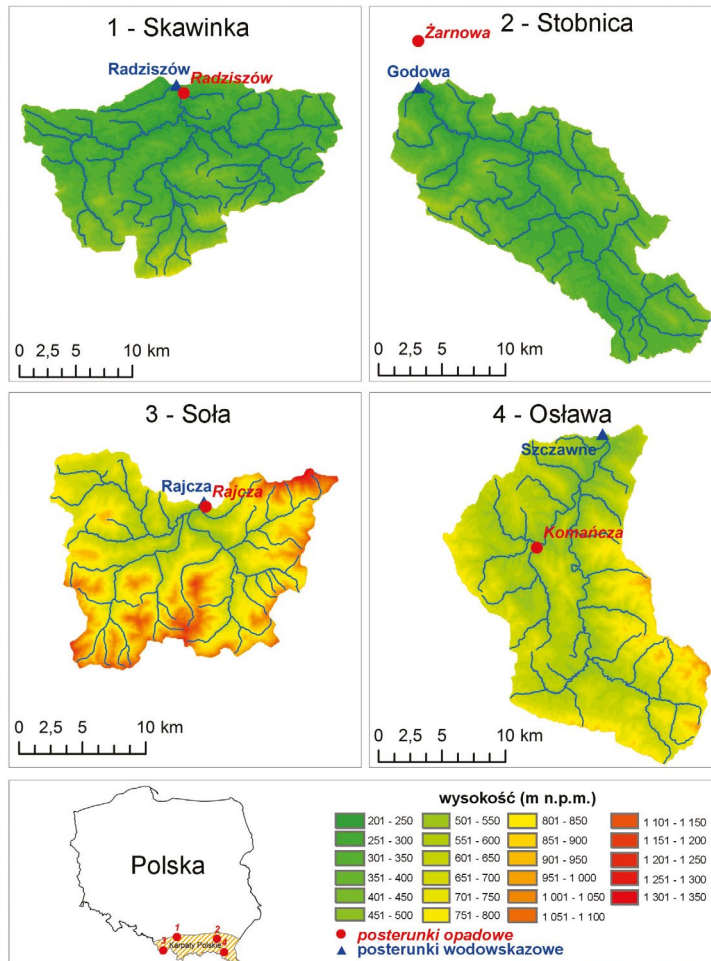
Głównym celem badań było przestrzenne i czasowe określenie struktury odpływu korytowego i kierunków jej zmian w wybranych zlewniach rzecznych w Karpatach Zachodnich w zimowym półroczu hydrologicznym, w warunkach zmian klimatu i narastającej antropopresji. Przyjęto roboczą hipotezę, że wzrost temperatury powietrza, mający w zimowym półroczu hydrologicznym statystycznie istotny trend dodatni (0,4-0,6°C na 10 lat), spowoduje zmniejszenie opadu w postaci śniegu i zmniejszenie odpływu o genezie roztopowej. Główny cel badań zrealizowano poprzez cele cząstkowe:

- obliczenie udziału opadu śnieżnego (SF) w rocznej (P_A) i półrocznej (półroczne sumie opadu (P_{WHY}); określenie kierunków zmian w latach 1981-2020 na podstawie sum rocznych (półrocznych),
- określenie genezy dobowych przepływów w profilach wodowskazowych zamykających badane zlewnie, z podziałem na odpływ: gruntowy ($H_{WHY(G)}$), opadowy ($H_{WHY(P)}$) i roztopowy ($H_{WHY(S)}$); określenie kierunków zmian w latach 1981-2020 na podstawie sum rocznych (półrocznych),
- obliczenie współczynnika odpływu α dla zimowego półroczu hydrologicznego (WHY) oraz dla opadu deszczowego i śnieżnego, a także wskazanie kierunku zmian tego parametru.

Obszar i metody badań

Do badań wybrano 4 zlewnie w Karpatach Zachodnich: Soły (204 km²) i Oslawy (302 km²) w beskidzkiej części oraz Skawinki (317 km²) i Stobnicy (324 km²) w części pogórskiej (ryc. 1).

Średnie nachylenie i wysokości bezwzględne w zlewniach pogórskich wynoszą: 7° i 343 m n.p.m., a w beskidzkich: 12° i 717 m n.p.m. Szczegółowe zestawienie parametrów fizjograficznych wybranych zlewni zawiera tabela 1. W zlewniach pogórskich występują utwory płaszczowiny śląskiej, a w zlewniach beskidzkich płaszczowiny magurskiej (pia-



Ryc. 1. Lokalizacja zlewni, stanowisk pomiarowych i hipsometria

Locations of catchment areas and measuring stations against the relevant hypsometric background

skowce, łupki, zlepieńce, mułowce i iłowce wieku od kredy do oligocenu) i dukielskiej (piaskowce, łupki, mułowce, iłowce, margle) (Unrug, 1969; Żyto et al., 1973).

W wybranych zlewniach w okresie między 1990 r. a 2020 r. odnotowano istotne zmiany pokrycia terenu i użytkowania ziemi (Bochenek i Kijowska-Strugała, 2021), co jest związane m.in. ze zmianami politycznymi i gospodarczymi po 1989 r. oraz przystąpieniem Polski do Unii Europejskiej w 2004 r. Odnotowano zmniejszenie powierzchni gruntów ornych, nawet o 46% (Soła), i wzrost powierzchni użytków zielonych, lasów oraz obszarów zabudowanych (maksymalnie o 495%, zlewnia Skawinki).

Badania obejmują 40 letni okres pomiarów (1981-2020) w profilach wodowskazowych zamykających zlewnie, ze szczególnym uwzględnieniem zimowych półroczy hydrologicznych (WHY), w polskiej literaturze hydrologicznej rozumianych jako okres od listopada do kwietnia (włącznie).

Do badań wykorzystano dane udostępnione publicznie w serwisie IMGW (https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/), tj. dobowe przepływy wody w badanych profilach wodowskazowych (tab. 1). Do określenia genezy odpływu posłużono się dobowymi danymi klimatycznymi: sumą i formą opadu (deszcz/śnieg), miąższością pokrywy śnieżnej i temperaturą powietrza. Dane te pozwalały rekonstruować klimatyczne uwarunkowania wzrostu lub recesji odpływu.

Tabela 1. Podstawowe parametry zlewni pogórskich i beskidzkich
Basic characteristics of catchments located in foothill and mountain areas in the Beskids (Polish Western Carpathians)

Lp.	Zlewnia	Lokalizacja wodowskazu	Powierzchnia zlewni (km ²)	Średnia wysokość (min-max) (m n.p.m.)	Średnie nachylenie (°)	Gęstość sieci rzecznej (km-km ²)	Lokalizacja deszczomierza (m n.p.m.)
1	Skawinka	Radziszów	317	339 (215-727)	6,66	2,62	Radziszów (220)
2	Stobnica	Godowa	324	346 (224-687)	7,04	3,01	Żarnowa (245)
3	Soła	Rajcza	294	798 (486-1320)	13,26	3,07	Rajcza (490)
4	Ośława	Szczawne	302	636 (391-1063)	9,82	2,78	Komańcza (470)

Obliczono sumy i udział opadu i odpływu WHY w sumach rocznych (P_A , H_A) oraz określono kierunki zmian w okresie 40 lat. Obliczono współczynnik odpływu α dla WHY (Formuła 1):

$$\alpha = \frac{H}{P} \quad (1)$$

gdzie: H – półroczna suma odpływu [mm], P – półroczna suma opadu [mm].

Obliczono także współczynniki odpływu spowodowane opadem deszczowym i opadem śnieżnym dla WHY.

Ponadto, obliczono współczynnik zmienności C_v (Formuła 2) rocznych i półrocznych sum opadu i odpływu w badanym wieloleciu:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \quad (2)$$

gdzie: σ – odchylenie standardowe, \bar{x} – wartość średnia.

Analiza danych umożliwiła określenie genezy odpływu wody. W badaniach przyjęto założenie, że zasilanie gruntowe występuje przy przepływie niższym od średniego z wielolecia (SSQ), obliczonego dla każdego profilu wodowskazowego. Przepływ SSQ obliczono oddzielnie dla okresu listopad-styczeń i luty-kwiecień (tab. 2). Przesłanką ku temu były duże różnice między średnimi wartościami w wyróżnionych 3-miesięcznych okresach.

Zlewnia	A	B
Skawinka	2,43	3,68
Stobnica	2,62	4,54
Soła	4,06	7,57
Ośława	4,97	8,78

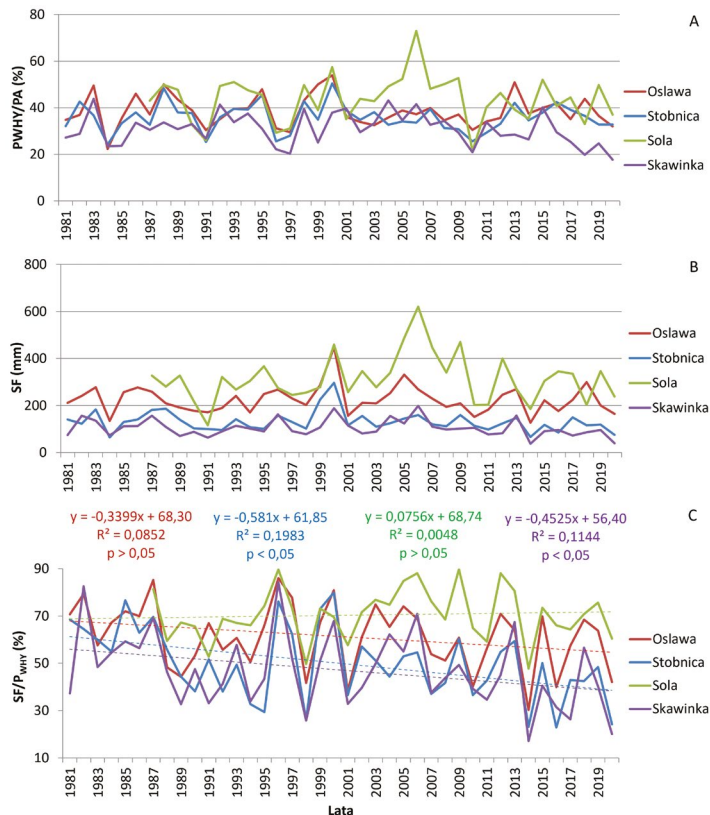
Tabela 2. Średnie 3-miesięczne przepływy (SSQ) w okresie listopad-styczeń (A) i luty-kwiecień (B) w badanych zlewniach w latach 1981-2020 (w m³·s⁻¹)
Average 3-month discharge (SSQ) in November-January (A) and February-April (B) in the studied catchments in 1981-2020 (in m³·s⁻¹)

Wyniki

Opad atmosferyczny

Średnie roczne sumy opadu P_A (1981-2020) kształtowały się od 752,8 mm (Skawinka) do 1003,2 mm (Sola), wykazując zmienność opisaną współczynnikiem zmienności C_v od 12,4% (Oslawa) do 22,3% (Skawinka), przy równoczesnym braku statystycznie istotnych trendów (tab. 3).

Średnia suma opadu P_{WHY} kształtowała się od 226,5 mm (Skawinka) do 440,6 mm (Sola). Największą „stabilnością” opadu w tym półroczu cechowała się zlewnia Oslawy ($C_v = 18,4\%$), natomiast największą „zmiennością” – zlewnia Soty (23,8%). W okresie badań P_{WHY} charakteryzują się większą zmiennością niż P_A . Średni udział opadów P_{WHY} w rocznej sumie P_A kształtował się od 30,1% (Skawinka) do 43,9% (Sola) i nie wykazywał kierunkowych zmian w żadnej z badanych zlewni (ryc. 2A). Średnie roczne sumy SF w badanym okresie wyniosły od 104,8 mm (Skawinka) do 313,4 mm (Sola). W tych dwóch zlewniach stwierdzono skrajne udziały sum opadu śniegu w sumie opadu zimowego półroczu hy-



Ryc. 2. Zmiany udziału opadu półroczu zimowego (P_{WHY}) w rocznej sumie (P_A) [A], wysokości opadu śnieżnego (SF) [B] i jego udziału w sumie opadu półroczu zimowego [C]
Changes in the contribution made by winter half-year precipitation (P_{WHY}) to annual totals (P_A) [A], and snowfall (SF) [B], as well as the contribution to winter half-year precipitation overall [C]

Tabela 3. Charakterystyka opadów atmosferycznych z uwzględnieniem opadu śniegu w wybranych zlewniach
Characteristics of precipitation (including snowfall) in the selected catchments

Zlewnia	Średni roczny opad P_A (mm) (C_v , %)	Opad w półroczu zimowym P_{WHY} (mm) (C_v , %)	Opad śnieżny SF (mm) (udział opadu śnieżnego w opadzie rocznym, %)
Skawinka	752,8 (22,3)	226,5 (20,3)	104,8 (30,9)
Stobnica	765,1 (18,5)	272,2 (21,9)	131,7 (35,8)
Soła	1003,2 (14,2)	440,6 (23,8)	313,4 (43,7)
Ośława	973,5 (12,4)	372,6 (18,4)	225,4 (38,5)

drologicznego, wynoszące odpowiedni: 30,9% i 43,7%. Roczne sumy SF nie wykazywały statystycznie istotnych kierunków zmian w badanym okresie w żadnej zlewni (ryc. 2B). Udział SF w P_{WHY} tylko w zlewni Soły nie zmieniał się w badanym okresie. W pozostałych 3 zlewniach przyjął kierunek ujemny, przy czym w zlewni Skawinki i Stobnicy (zlewnie pogórskie) miał charakter statystycznie istotnego trendu ($p < 0,05$) (ryc. 2C). Udział SF zmniejszał się około 0,5%·rok⁻¹.

Odptyw wody

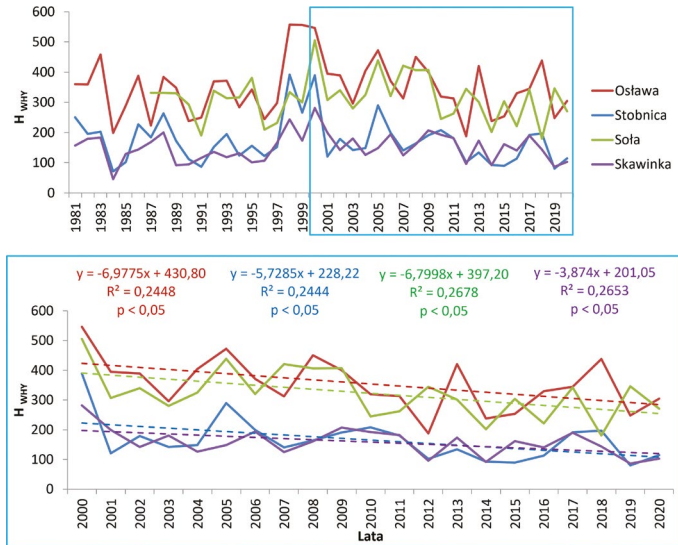
Średnie roczne sumy odpływu (H_A) ze zlewni były zróżnicowane. Najniższe wartości notowano w zlewniach pogórskich: Skawinki i Stobnicy (tab. 4). Zlewnie te charakteryzowała jednakże duża jego zmienność (C_v). Średni odpływ ze zlewni beskidzkich był ponad 2-krotnie wyższy; najwyższy odpływ stwierdzono dla zlewni Soły (621,4 mm). Najniższy średni odpływ w półroczu zimowym (H_{WHY}) zanotowano dla zlewni Skawinki (150,3 mm), natomiast najwyższy – dla zlewni Ośławy (348,8 mm). Zmienność H_{WHY} (C_v) w zlewniach beskidzkich była niska (ok. 25%); najwyższa zmienność H_{WHY} wystąpiła w zlewni Stobnicy.

W okresie 40 lat H_{WHY} wykazywał duże zróżnicowanie. W tak długim okresie nie stwierdzono trendów zmian (ryc. 3A). Po roku 2000 zaobserwowano statystycznie istotne trendy spadkowe H_{WHY} we wszystkich badanych zlewniach w granicach 4-7 mm·rok⁻¹ (ryc. 3B). W tym okresie H_A wskazywał statystycznie istotny trend ujemny dla Soły i Stobnicy.

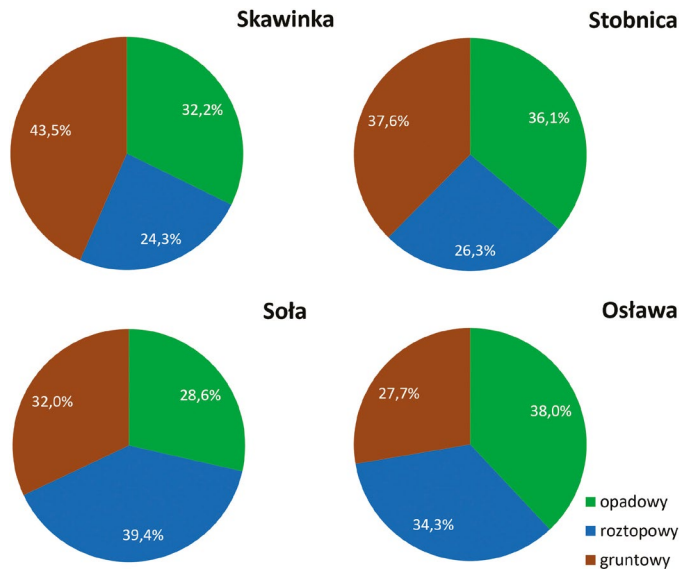
Analiza porównawcza danych hydrologicznych (natężenie przepływu) z danymi meteorologicznymi (temperatura powietrza, wysokość i rodzaj opadu, występowanie i miąższość pokrywy śnieżnej) pozwoliła określić źródła zasilania koryta rzecznoego (opadowy, roztopowy, gruntowy). Najwyższą średnią sumę odpływu roztopowego (S) stwierdzono w zlewni Soły (123,7 mm), która stanowiła 40,1% H_{WHY} (ryc. 4).

Tabela 4. Charakterystyka odpływu wody z wybranych zlewni
Characteristics of water runoff from the selected catchments

Zlewnia	Roczny odpływ H_A (mm) (C_v , %)	Odpływ w półroczu zimowym H_{WHY} (mm) (C_v , %)	Udział H_{WHY} w H_A (%)
Skawinka	291,7 (42,5)	150,3 (30,9)	55,1
Stobnica	289,2 (37,6)	172,4 (42,8)	60,4
Soła	621,4 (24,1)	308,6 (24,6)	50,9
Ośława	584,3 (22,6)	348,8 (26,7)	60,3



Ryc. 3. Dynamika półrocznych sum H_{WHY} w latach 1981-2020 (A) i 2000-2020 (B)
 Dynamics characterising H_{WHY} totals through the periods 1981-2020 (A) and 2000-2020 (B)



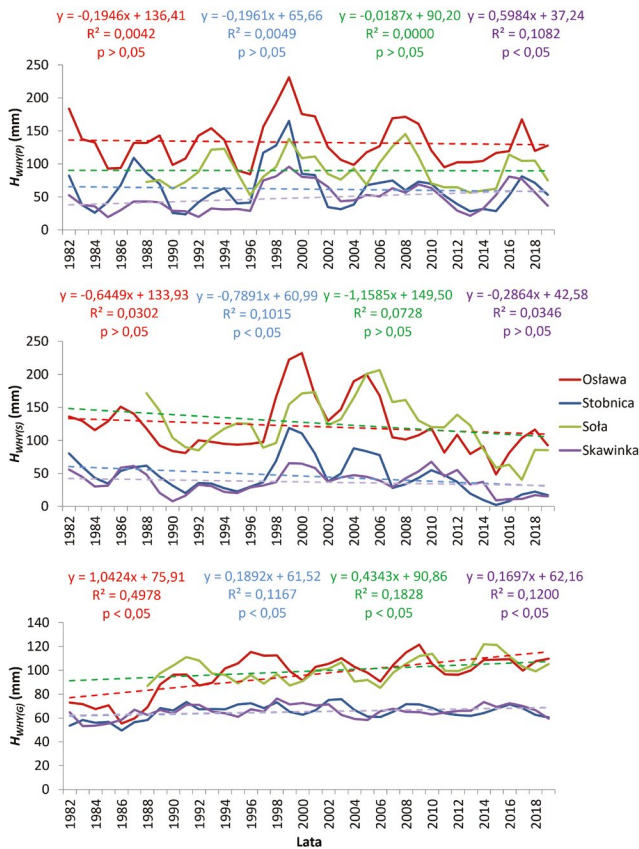
Ryc. 4. Struktura odpływu z badanych zlewni w zimowym półroczu hydrologicznym w latach 1981-2020
 The structure characterising runoff from the catchments studied in winter half-years across the 1981-2020 period

W zlewni Oslawy w zimowym półroczu hydrologicznym przeważał odpływ spowodowany opadami (38,0%). W zlewni Skawinki przeważało zasilanie gruntowe (43,4%), natomiast w zlewni Stobnicy podobny był udział zasilania gruntowego (37,6%) i opadowego

(36,1%). W obydwu zlewniach pogórskich (Skawinka i Stobnica) średnie zasilenie roztopowe było podobne i wyniosło około 25% H_{WHY}

W kolejnych latach sumy dopływu do cieków z różnych form ich zasilenia charakteryzowały się dużą zmiennością. Do określenia dynamiki w badanym okresie zastosowano średnią kroczącą 3-letnią, ograniczającą zasięg zmienności z roku na rok (ryc. 5).

Zasilenie opadowe $H_{WHY(P)}$ w zlewni Skawinki przyjęło statystycznie istotny trend dodatni, wynoszący $0,6 \text{ mm rok}^{-1}$. W zlewni Soły nie stwierdzono zmian w okresie badań. We wschodniej części obszaru badań (Stobnica i Osława) zarysowała się niewielka i nieistotna statystycznie tendencja spadkowa. Zasilenie roztopowe $H_{WHY(S)}$ we wszystkich zlewniach wykazywało tendencję spadkową w ciągu badanych 40 lat w granicach od $0,3 \text{ mm-rok}^{-1}$ (Skawinka) do $1,2 \text{ mm-rok}^{-1}$ (Soła), lecz tylko w zlewni Stobnicy miała ona charakter statystycznie istotnego trendu. Sumy zasilenia gruntowego $H_{WHY(G)}$ we wszystkich zlewniach przyjęły statystycznie istotny trend wzrostowy, wynoszący od $0,17 \text{ mm-rok}^{-1}$ (Skawinka)

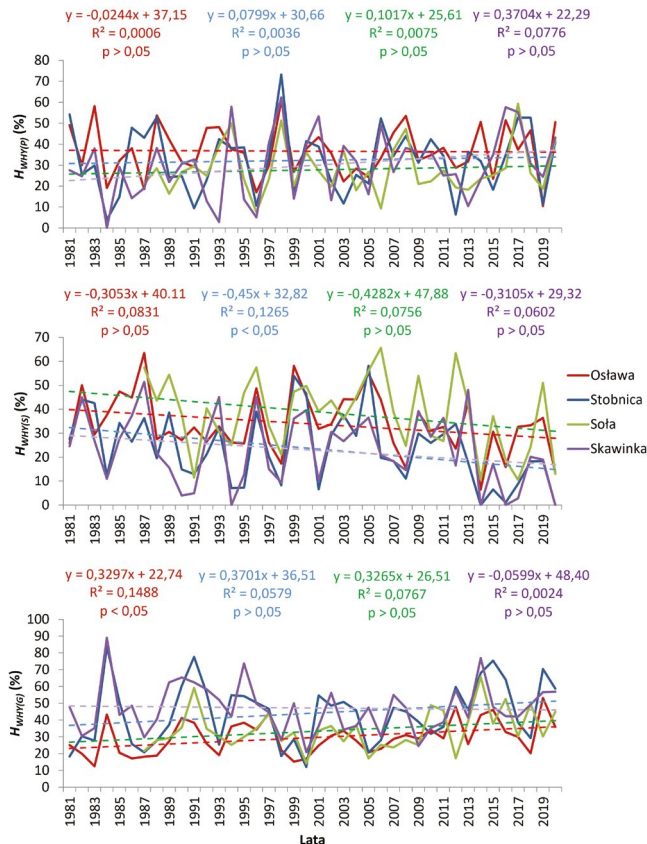


Ryc. 5. Suma H_{WHY} i trendy jego zmian dla poszczególnych rodzajów zasilenia koryt rzecznych ($H_{WHY(P)}$ – opadowy, $H_{WHY(S)}$ – roztopowy, $H_{WHY(G)}$ – gruntowy) w latach 1981–2020 (3-letnia średnia krocząca) 1981–2020 totals noted for H_{WHY} along with trends characteristic for it as regards different types of supply of the river channels (i.e. $H_{WHY(P)}$ – rainfall, $H_{WHY(S)}$ – snowmelt, $H_{WHY(G)}$ – groundwater) (expressed in terms of 3-year moving averages)

do $1,04 \text{ mm}\cdot\text{rok}^{-1}$ (Ośława). Dynamika wzrostu zasilania gruntowego $H_{WHY(G)}$ w zlewniach beskidzkich jest kilkukrotnie wyższa niż w zlewniach pogórskich. Ponadto wykazuje duże zróżnicowanie przestrzenne, podczas gdy w zlewniach pogórskich wygląda podobnie, niezależnie od ich położenia.

Na podstawie rocznych sum zasilania przez różne jego formy wyznaczono liniowe tendencje zmian udziału w strukturze H_{WHY} w latach 1981-2020 (ryc. 6). Z powodu dużej zmienności odpływu w następujących po sobie latach, tylko nieliczne tendencje spełniają kryteria statystycznie istotnego trendu, przy założonej wartości progowej $\alpha = 0,05$.

Udział zasilanie opadowego $H_{WHY(P)}$ w odpływie półroczu zimowego (H_{WHY}) w żadnej z badanych zlewni nie wykazywał statystycznie istotnego trendu. W zlewni Ośławy w okresie 40 lat nie zmienił się, w pozostałych zlewniach przyjął kierunek dodatni, z najwyższym wzrostem ($0,37\%\cdot\text{rok}^{-1}$) w zlewni Skawinki. Udział zasilania roztopowego $H_{WHY(S)}$ we wszystkich zlewniach przyjął ujemny kierunek trendu w granicach $0,30\text{-}0,45\%\cdot\text{rok}^{-1}$, istotny statystycznie ($p < 0,05$) tylko w zlewni Stobnicy, podobnie jak w przypadku zmiany wysokości



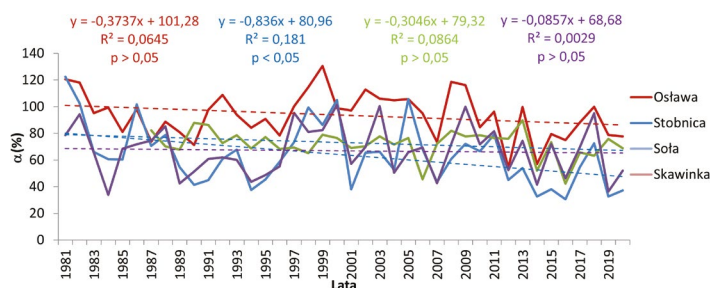
Ryc. 6. Udział wyróżnionych rodzajów zasilania koryt rzecznych ($H_{WHY(P)}$ – opadowy, $H_{WHY(S)}$ – roztopowy, $H_{WHY(G)}$ – gruntowy) w H_{WHY} i trendy zmian w latach 1981-2020

Shares of H_{WHY} accounted for by distinguished types of supply of river channels ($H_{WHY(P)}$ – rainfall, $H_{WHY(S)}$ – snowmelt, $H_{WHY(G)}$ – groundwater), as well as trends noted for these across the 1981-2020 period

odpływu roztopowego. Udział zasilania gruntowego $H_{WHY(G)}$ w badanym okresie zlewni Skawinki utrzymywał się na podobnym poziomie. W pozostałych zlewniach wykazywał dodatni kierunek zmiany, w granicach $0,33\text{-}0,37\%\cdot\text{rok}^{-1}$. W zlewni Osławy kierunek ten spełniał warunki statystycznie istotnego trendu.

Wpływ zmian sum opadów na wielkość odpływu

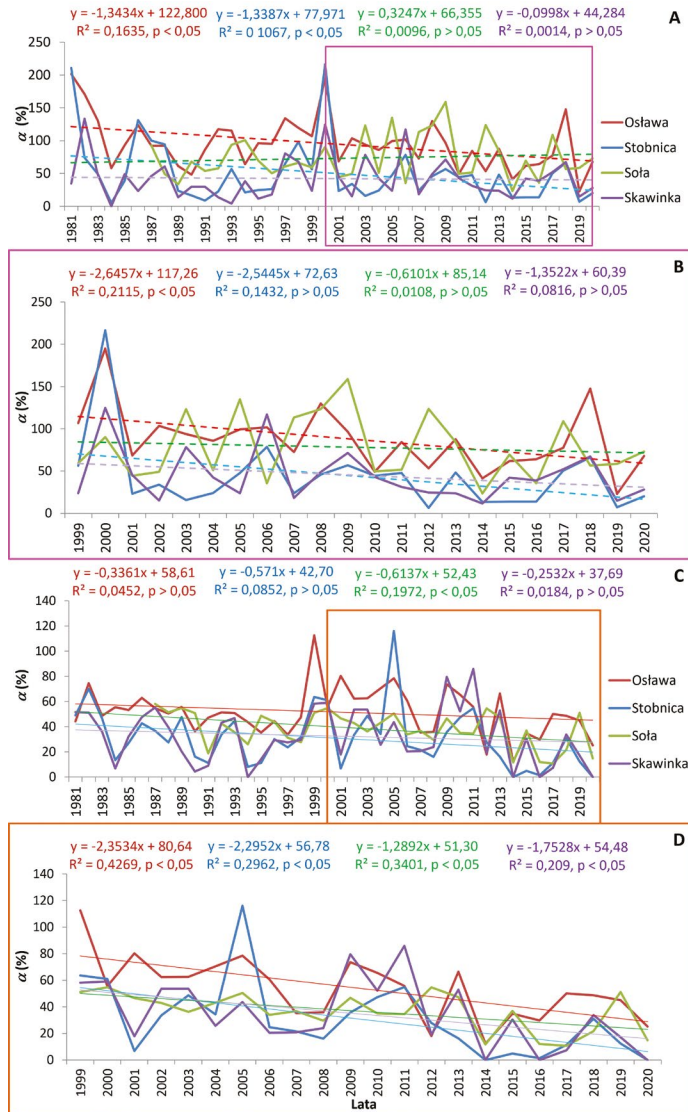
Relacje między opadem i odpływem opisuje współczynnik odpływu α . Współczynnik odpływu α przyjął niższe średnie wartości w zlewniach pogórskich: Stobnicy (64%) i Skawinki (67%). W zlewniach beskidzkich średnie α były wyższe i różnice między zlewniami większe: Soła (72%) i Osława (94%). W badanych zlewniach wyznaczony trend przyjmował ujemny kierunek zmiany, istotny statystycznie tylko w zlewni Stobnicy (ryc. 7). W zlewni Skawinki zmiana tego współczynnika w okresie badań była najmniejsza.



Ryc. 7. Zmiany półrocznych wartości współczynnika odpływu α
Changes in values noted for α half-year runoff coefficients

Zbadano wpływ opadu deszczowego na wielkość odpływu opadowego oraz wpływ opadu śniegu na odpływ roztopowy, obliczając współczynnik odpływu przy tych dwóch formach opadu (ryc. 8A-D). Dla współczynnika odpływu wywołanego przez deszcz stwierdzono regionalne zróżnicowanie zmian. We wschodniej części obszaru badań (zlewnie Stobnicy i Osławy) wystąpił statystycznie istotny trend spadkowy wynoszący około $1,4\%\cdot\text{rok}^{-1}$ (ryc. 8A). W zachodniej części obszaru badań zaobserwowano dodatnią zmianę α (Soła) lub jej brak (Skawinka). W okresie 1999-2020 we wszystkich zlewniach nasiliła się ujemna tendencja współczynnika odpływu α , przy czym tylko w zlewni Osławy spełniała ona kryterium istotnie statystycznego trendu (ryc. 8B).

W ciągu 40 lat we wszystkich badanych zlewniach wystąpiła ujemna tendencja współczynnika odpływu spowodowanego opadem śnieżnym, przy czym statystycznie istotny trend zaobserwowano tylko w zlewni Soły ($-0,61\%\cdot\text{rok}^{-1}$) (ryc. 8C). W latach 1999-2022, podobnie jak dla „deszczowego” współczynnika odpływu, zaobserwowano nasilenie się spadkowej tendencji α , kształtującej się od $1,3$ do $2,4\%\cdot\text{rok}^{-1}$. We wszystkich przypadkach ta spadkowa tendencja miała charakter trendu istotnego statystycznie (ryc. 8D)



Ryc. 8. Zmiany współczynnika odpływu α w badanych zlewniach spowodowanego opadem deszczu (A, B) i śniegu (C, D)

Changes in α runoff coefficients in the studied catchments attributable to rain (A, B) and snow (C, D)

Dyskusja

W Karpatach obserwuje się nierównomierne rozmieszczenie opadów i zasobów wodnych, wyższe opady notowane są w beskidzkich zlewniach, natomiast temperatura jest wyższa w zlewniach położonych na pogórzu. Wcześniejsze badania w Karpatach wykazały istotny wzrost kontynentalnych cech klimatu w zlewniach położonych we wschodniej części

Karpat (Bochenek i Kijowska-Strugała, 2021). W ciągu ostatnich dziesięcioleci w większości regionów Eurazji można zaobserwować tendencję spadkową wysokości i liczby dni z opadami śniegu (Deng et al. 2017; Bai et al. 2019). Dodatkowo, w odpowiedzi na ocieplenie klimatu w ostatnich dziesięcioleciach, na całym kontynencie euroazjatyckim opóźnił się termin wystąpienia pierwszych opadów śniegu, a termin ich zakończenia uległ przyspieszeniu (Lin i Chen, 2021).

Przeprowadzone badania wykazały, że roczne sumy SF nie wykazywały statystycznie istotnych kierunków zmian w analizowanym obszarze. Zastosowana relacja sumy opadów śniegu do całkowitej sumy opadów atmosferycznych jest szeroko stosowana w wielu opracowaniach do wykrywania i monitorowania hydrometeorologicznych odpowiedzi na zmiany klimatu w obszarach górskich. Według Dong i Ming (2022) miara ta jest wiarygodnym wskaźnikiem ocieplenia klimatu. W karpacczych zlewniach w analizowanym 40-leciu kierunek zmian udziału SF w P_{WHY} był ujemny prawie we wszystkich zlewniach, lecz istotny statystycznie jedynie w zlewniach pogórskich (5-6% na 10 lat). Ocieplenie klimatu ma zatem większy wpływ na pokrywą śnieżną na niższych wysokościach niż na obszarach położonych na wyższych wysokościach. Ujemny trend udziału SF/ P_{WHY} był obserwowany również w innych obszarach górskich (Jain et al., 2010; Dong i Ming, 2022), np. w górach Owyhee, przejście z systemu zasilania śnieżnego w kierunku zasilania deszczowego było wyraźniejsze na niższych wysokościach bezwzględnych w porównaniu z obszarami wysokogórskimi (Nayak et al., 2010). W niektórych obszarach górskich długość okresu ze śniegiem zmniejszyła się prawie o miesiąc bez wyraźnych istotnych statystycznie zmian sumy rocznej opadów oraz odpływu wody (*ibidem*). Podobne prawidłowości zostały odnotowane w innych regionach, m.in. Finlandii (Irannezhad et al., 2017). Największy wpływ na zmienność rocznej $H_{WHY(S)}$ miała Oscylacja Arktyczna Wschodniego Atlantyku.

W analizowanym 40-leciu w półroczu zimowym nie odnotowano istotnych trendów wielkości odpływu rzeczno, podobnie jak w przypadku opadu atmosferycznego. Należy jednak podkreślić, że po 2000 r. we wszystkich zlewniach wystąpił spadek odpływu H_{WHY} o 4-6% w zlewniach pogórskich oraz o 7% w zlewniach beskidzkich, odwrotnie niż w przypadku zmian udziału opadu śnieżnego w opadzie w półroczu zimowym. Ponadto w półroczu zimowym w zlewniach pogórskich dominowało zasilanie gruntowe, a w zlewniach beskidzkich roztopowe (Soła) oraz opadowe (Osława). We wszystkich zlewniach widoczna była recesja zasilania roztopowego i wzrost roli zasilania gruntowego.

W wielu obszarach wykazano, że wykrycie wpływu zmieniającego się klimatu na hydrologiczną reakcję rzek może być dodatkowo skomplikowana przez m.in. zmiany w użytkowaniu ziemi (Xu et al., 2019). Kierunek zmian współczynnika odpływu α w analizowanym obszarze Karpat był ujemny, co wskazuje na istotny wpływ zmian użytkowania ziemi. Prawidłowości zachodzących zmian pokrycia terenu i użytkowania ziemi w badanych zlewniach były podobne, lecz natężenie różne, co jest charakterystyczne dla obszaru polskich Karpat Zachodnich (Bucala-Hrabia, 2018; Kijowska-Strugała et al., 2018; Bochenek i Kijowska-Strugała, 2021). Ujemny kierunek zmiany współczynnika odpływu α w analizowanych zlewniach pogórskich i beskidzkich świadczy o wzroście powierzchni „naturalnych”, głównie łąk, obszarów wyłączonych z użytkowania rolniczego, zakrzaczów i lasów, kosztem postępującego zmniejszania się powierzchni gruntów ornych. Znikoma zmiana α w badanym okresie w zlewni Skawinki spowodowana była 5-krotnym wzrostem obszarów zabudowy między 1990 a 2018 r. (Bochenek i Kijowska-Strugała, 2021), o zmniejszeniu przepuszczalności i możliwościach retencji wody, który zniwelował skutki wymienio-

nych wcześniej kierunków zmian pokrycia terenu. Największe zmniejszenie współczynnika odpływu α , które wystąpiło w zlewni Stobnicy, było spowodowane zmniejszeniem udziału w powierzchni zlewni gruntów ornych z 61,0% (1990 r.) do 46,4% (2018 r.) i równoczesnym wzrostem udziału lasu z 32,1% do 43,4%.

Podsumowanie

1. Średnie P_{WHY} w latach 1981-2020 wyniosły od 226,5 mm (Skawinka) do 440,6 mm (Soła). Średni udział opadów P_{WHY} w rocznej sumie P_A kształtował się od 30,1% (Skawinka) do 43,9% (Soła) i nie wykazywał kierunkowych zmian w żadnej z badanych zlewni.
2. Średni H_{WHY} kształtował się od 150,3 mm (Skawinka) do 348,8 mm (Osława), natomiast udział H_{WHY} w H_A wyniósł średnio od 50,9% (Soła) do 60,4% (Stobnica). W latach 1981-2020 H_{WHY} nie wykazywał statystycznie istotnych kierunków zmian. Ujemne trendy H_{WHY} stwierdzono od 2000 r.
3. W badanych zlewniach wystąpiło zróżnicowanie dominujących źródeł zasilania cieków. W zlewni Soły największy udział miało zasilanie roztopowe (40,1%), w zlewni Osławy – zasilanie opadowe (38,0%) zaś w zlewni Skawinki przeważało zasilanie gruntowe (43,4%). W zlewni Stobnicy udział zasilania opadowego i gruntowego był podobny (36-38%).
4. W ciągu 40 lat zasilanie opadowe w trzech wybranych zlewniach wykazuje ujemne kierunki zmian, z wyjątkiem Skawinki, gdzie stwierdzono statystycznie istotny wzrost odpływu wywołanego opadami. We wszystkich zlewniach wystąpiła recesja odpływu spowodowanego roztopami i wzrost roli zasilania gruntowego.
5. Zmiany współczynnika odpływu α świadczą o wpływie zmian pokrycia terenu na relację opad-odpływ. Znikoma zmiana α w badanym okresie w zlewni Skawinki spowodowana była 5-krotnym wzrostem obszarów zabudowy, natomiast największe zmniejszenie współczynnika odpływu α , które wystąpiło w zlewni Stobnicy, było spowodowane spadkiem udziału gruntów ornych z 61,0% (1990 r.) do 46,4% (2018 r.) i równoczesnym wzrostem obszaru lasu z 32,1% do 43,4%.
6. Przedstawione wyniki badań dowodzą, że postępujący wzrost temperatury powietrza wpływa na rodzaj i wysokość opadu, a ten na aktywność poszczególnych form zasilania cieków w wodę. Założona hipoteza robocza znalazła zatem potwierdzenie empiryczne: wielkość i udział odpływu rzecznoego spowodowanego roztopami zmniejsza się.

Przedstawione wyniki badań mają ważne implikacje społeczno-ekonomiczne i środowiskowe, szczególnie w odniesieniu do gospodarki wodnej i strategii zarządzania wodą w obszarach gór średnich w warunkach zmian klimatu i narastania antropopresji.

Piśmiennictwo

- Bai, L., Shi, C., Shi, Q., Li, L., Wu, J., Yang, Y.,... & Meng, J. (2019). Change in the spatiotemporal pattern of snowfall during the cold season under climate change in a snow-dominated region of China. *International Journal of Climatology*, 39(15), 5702-5719. <https://doi.org/10.1002/joc.6182>

- Beljaars, A.C.M., Viterbo, P., Miller, M.J., & Betts, A.K. (1996). The anomalous rainfall over the United States during July 1993: Sensitivity to land surface parameterization and soil moisture anomalies. *Monthly Weather Review*, *124*(3), 362-383. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1996\)124<0362:tarotu>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1996)124<0362:tarotu>2.0.co;2)
- Bochenek, W., & Kijowska-Strugała, M. (2021). Variability of low flow in Polish Carpathians (foothills and Beskidy Mountains) catchments in the period 1988-2017. *Przegląd Geograficzny*, *93*(1), 5-25. <https://doi.org/10.7163/PrzG.2021.1.1>
- 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* (s. 89-109). Berlin, Heidelberg: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-642-12725-0_8
- Bucała-Hrabia, A. (2018). Land use changes and their catchment-scale environmental impact in the Polish Western Carpathians during transition from centrally planned to free-market economics. *Geographia Polonica*, *91*(2), 171-196. <https://doi.org/10.7163/gpol.0116>
- Deng, H., Pepin, N.C., & Chen, Y. (2017). Changes of snowfall under warming in the Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, *122*(14), 7323-7341. <https://doi.org/10.1002/2017jd026524>
- Dong, W., & Ming, Y. (2022). Seasonality and Variability of Snowfall to Total Precipitation Ratio over High Mountain Asia Simulated by the GFDL High-Resolution AM4. *Journal of Climate*, *35*(17), 5573-5589. <https://doi.org/10.1175/jcli-d-22-0026.1>
- Hassan, W.H., & Nile, B.K. (2021). Climate change and predicting future temperature in Iraq using CanESM2 and HadCM3 modeling. *Modeling Earth Systems and Environment*, *7*(2), 737-748. <https://doi.org/10.1007/s40808-020-01034-y>
- Hodgkins, G.A., Dudley, R.W., & Huntington, T.G. (2003). Changes in the timing of high river flows in New England over the 20th century. *Journal of Hydrology*, *278*(1-4), 244-252. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(03\)00155-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(03)00155-0)
- Irannezhad, M., Ronkanen, A.K., Kiani, S., Chen, D., & Kløve, B. (2017). Long-term variability and trends in annual snowfall/total precipitation ratio in Finland and the role of atmospheric circulation patterns. *Cold Regions Science and Technology*, *143*, 23-31. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.008>
- Jain, S.K., Goswami, A., & Saraf, A.K. (2010). Assessment of snowmelt runoff using remote sensing and effect of climate change on runoff. *Water resources management*, *24*(9), 1763-1777. <https://doi.org/10.1016/j.coldregions.2017.08.008>
- Kijowska-Strugała, M., Bucala-Hrabia, A., & Demczuk, P. (2018). Long-term impact of land use changes on soil erosion in an agricultural catchment (in the Western Polish Carpathians). *Land Degradation & Development*, *29*(6), 1871-1884. <https://doi.org/10.1002/ldr.2936>
- Krusell, P., & Smith, Jr, A.A. (2022). Climate change around the world. Working Paper Serie, 30338. National Bureau of Economic Research. <https://doi.org/10.3386/w30338>
- Lemke, P., Ren, J., Alley, R.B., Allison, I., Carrasco, J., Flato, G., Fujii, Y., Kaser, G., Mote, P., Thomas, R.H., & Zhang, T. (2007). Observations: Changes in Snow, Ice and Frozen Ground. W: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, & H.L. Miller (red.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 337-383). Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.

- Lin, W., & Chen, H. (2022). Changes in the spatial-temporal characteristics of daily snowfall events over the Eurasian continent from 1980 to 2019. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1841-1853. <https://doi.org/10.1002/joc.7339>
- Nayak, A., Marks, D., Chandler, D.G., & Seyfried, M. (2010). Long-term snow, climate, and stream-flow trends at the Reynolds Creek experimental watershed, Owyhee Mountains, Idaho, United States. *Water resources research*, 46(6). <https://doi.org/10.1029/2008WR007525>
- Qin, Y., Abatzoglou, J.T., Siebert, S., Huning, L.S., AghaKouchak, A., Mankin, J.S., & Mueller, N.D. (2020). Agricultural risks from changing snowmelt. *Nature Climate Change*, 10(5), 459-465. <https://doi.org/10.1038/s41558-020-0746-8>
- Randall, D.A., Wood, R.A., & et al. (2007). Climate models and their evaluation. W: S. Solomon, D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor, & H.L. Miller (red.), *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contributions of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (s. 589-662). United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press.
- Shen, Y.J., Shen, Y., Fink, M., Kralisch, S., Chen, Y., & Brenning, A. (2018). Trends and variability in streamflow and snowmelt runoff timing in the southern Tianshan Mountains. *Journal of hydrology*, 557, 173-181. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.035>
- Unrug, R. (red.). (1969). *Przewodnik geologiczny po zachodnich Karpatach fliszowych*. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- 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. <https://doi.org/10.1007/s11629-017-4374-3>
- Xu, S., Qin, M., Ding, S., Zhao, Q., Liu, H., Li, C.,... & Ji, X. (2019). The impacts of climate variation and land use changes on streamflow in the Yihe River, China. *Water*, 11(5), 887. <https://doi.org/10.3390/w11050887>
- Yang, Y., Javanroodi, K., & Nik, V.M. (2022). Climate Change and Renewable Energy Generation in Europe – Long-Term Impact Assessment on Solar and Wind Energy Using High-Resolution Future Climate Data and Considering Climate Uncertainties. *Energies*, 15(1), 302. <https://doi.org/10.3390/en15010302>
- Żytko, K., Gucik, S., & Ślącza, A. (1973). *Przewodnik po wschodnich Karpatach fliszowych*. Warszawa: Wydawnictwo Geologiczne.

Summary

Ongoing changes in climate (increases in air temperature, changes in the distribution of precipitation over the year) exert an influence on the genesis of watercourse supply, as expressed in relation to the three sources represented by rain, snowmelt and groundwater. In that context, to the work detailed here had as its aim the spatial and temporal determination of the structure (and trends) characterising winter hydrological half-year runoff from selected river catchments in the Western Carpathians, in the assumed circumstances of a changing climate and growing anthropopressure. To ensure adequate characterisation of the situation, the study took in four drainage basins, representing both the Beskid Mountains as such (in the catchments of the Soła and Oslawa), as well as their Foothills (in the catchments of the Skawinka and Stobnica). It was in relation to these four watercourses that the nature of the supply was determined over the 40-year

(1981-2020) period, in regard to mean daily flows in the profiles closing the selected catchments. Interpretation of the nature of supply was made possible by meteorological data concerning precipitation totals and types, thickness of snow cover and air temperature. Mean values for winter half-year precipitation totals (P_{WHY}) ranged from 226.5 mm (Skawinka) to 440.6 mm (Soła). The share of annual total precipitation (P_A) accounted for by P_{WHY} ranged on average from 30.1% (Skawinka) to 43.9% (Soła). The average winter half-year totals for snowfall (SF) in the study period ranged from 104.8 mm (Skawinka) to 313.4 mm (Soła). It was thus in the latter two catchments that the extreme shares of overall precipitation in the winter hydrological half-year accounted for by snowfall were to be found, at 30.9% and 43.7% respectively. Average values for runoff in the winter half-year (H_{WHY}) ranged from 150.3 mm (in the Skawinka catchment) to 348.8 mm (in the Ośława catchment), while the share of annual outflow (H_A) accounted for by H_{WHY} averaged between 50.9% (Soła) and 60.4% (Stobnica). The 1981-2020 period was not found to be characterised by any statistically significant directions of change in H_{WHY} though negative H_{WHY} trends could be noted for all the catchments studied in regard to the years since 2000, with the range of relevant values being 4-7 mm·year⁻¹. The 4 catchments showed a diversity of dominant sources of supply in H_{WHY} . In the case of the Soła, it was supply by snowmelt that took the largest (40.1%) share, while in the Ośława supply by rainfall prevailed (at 38.0%), and in the Skawinka supply by groundwater (on 43.4%). The catchment of the Stobnica featured more or less equal shares of alimentation by precipitation and ground supply (at around 36-38% in each case). All 4 catchments manifested declines over time in snowmelt-induced runoff, albeit with these ranging from 0.3 mm·yr⁻¹ (Skawinka) to 1.2 mm·yr⁻¹ (Soła), while the role of supply involving groundwater is seen to be on the increase by between 0.17 mm·yr⁻¹ (Skawinka) and 1.04 mm·yr⁻¹ (Ośława). In addition, the trend for increase in ground supply was found to be several times more distinct in the catchments of the Beskids as such, compared with their foothills, with marked spatial differentiation being the feature. In the catchments present in the foothills, the increase in ground supply proved similar, regardless of location.

Changes in land cover can be regarded as affecting the magnitudes of values for the α runoff coefficient for the WHY. Average values were lower in the foothills catchments: Stobnica (64%) and Skawinka (67%). In the catchments located in the Beskids *per se*, the average values proved to be higher, with differences between catchments also greater (Soła on 72% and Ośława on 94%). The negligible change over the study period when it came to the Skawinka catchment could be related to a 5-fold increase in built-up areas, even as the most-major reduction in the runoff coefficient noted in the catchment of the Stobnica, was attributable to a reduction in the share of arable land from 61.0% (in 1990) to 46.4% (in 2018), with a concomitant increase in forest cover from 32.1 to 43.4%. Study of the α runoff coefficient attributable to rain revealed regional variations. While a downward trend characterised the eastern part of the research area (i.e. the Stobnica and Ośława catchments), the trend was upward in the western part (where the Soła is located). It was notable how a downward trend for values of the α runoff coefficient either arose or intensified in all catchments across the 1999-2020 sub-period. Furthermore, the whole 40-year study period did witness a downward trend for values of the coefficient for runoff attributable to snowfall in all 4 catchments, with this intensifying further in the 1999-2020 sub-period (hence in the same way as with the coefficient for rain-related runoff).

The research results presented here attest to progressive increases in air temperature affecting precipitation types and totals, and thus also activity as regards the different forms of watercourse supply in water. To this extent the working hypothesis established gained confirmation empirically, with demonstrably declining magnitudes and shares of river runoff accounted for by the thawing of snow and ice.