

Agnieszka KOWALCZYK¹, Andrzej JAGUŚ²

¹ Institute of Technology and Life Sciences – National Research Institute, Falenty, Hrabska Av. 3, 09-090 Raszyn, Poland

² University of Bielsko-Biala, Department of Environmental Protection and Engineering, Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biala, Poland

ORCID / e-mail:

¹ 0000-0003-3730-7359 / a.kowalczyk@itp.edu.pl

² 0000-0001-9364-1744 / ajagus@ubb.edu.pl

Retencja wody w zróżnicowanych geograficznie zlewniach górskich

Słowa kluczowe:

obszary górskie, cechy zlewni, zasoby wodne, spływ powierzchniowy, odpływ wody

Water retention in geographically diverse area of mountain catchments

Keywords:

mountain areas, catchment features, water resources, water runoff, water outflow

Abstract

The article describes the research on the retention capacity of two mountain catchments in the Polish Carpathian Mts. These are the catchments of the Czarna Woda and Biała Woda streams. These catchments are adjacent, have a similar area (about 11 km² each), but are geographically diverse. Their geomorphology, hydrographic network, soil water permeability and land use were analyzed. The Czarna Woda catchment is a forest catchment, and the Biała Woda catchment is a forest and agricultural catchment with pasture areas. The geographical analysis of the catchment showed that the Czarna Woda catchment most likely has greater retention capacity.

Theoretical analyzes were verified on the basis of long-term measurements of flows in both streams. Outflows were calculated for the entire study period (2006-2022), as well as annual, monthly and daily outflows. The measurements were carried out using the overflow method in permanent measurement cross-sections. The total outflow from both catchments was similar, so they had similar water resources. In particular years, months and days, outflow often differed significantly between catchments. It was found that during the periods of increased water runoff (from precipitation, from snowmelt) the outflow from the Biała Woda catchment was higher, while in the periods without precipitation the outflow from the Czarna Woda catchment prevailed. Short-term flood outflows were at least several dozen percent higher in the Biała Woda catchment. The measurement data confirmed that water was better retained in the Czarna Woda catchment and the outflow was slower. Water retention processes in the Czarna Woda catchment allowed to maintain minimum outflows at a level several times higher than in the Biała Woda catchment.

The studies have shown that in a very small mountain area there can be a large variation in outflow in individual streams. Retention capacity of the catchment depends on environmental conditions and human activity.

1. WSTĘP

Obszary górskie bywają nazywane wodorodnymi (rodzącymi wodę), gdyż w ich obrębie za pośrednictwem obfitych opadów powstaje znacząca część zasobów wodnych. W Polsce obszary górskie, zajmujące 9% powierzchni kraju, dostarczają około 30% wody [Kostuch 1976]. Dużą rolę gór w tworzeniu zasobów wodnych w skali regionalnej i globalnej naświetlają Viviroli i Weingartner [2004].

Dla zaopatrzenia ludności i gospodarki w wodę ważna jest dynamika odpływu wody z terenów górskich. Odpływ gwałtowny wywołany opadami lub intensywnymi roztopami, wynikający ze spływu powierzchniowego, wiąże się z utratą zasobów wodnych – jeśli woda nie zostaje zretencjonowana w sztucznych zbiornikach (głównie zaporowych), to często tworzy sytuacje powodziowe i odpływa do morza. Dmitruk i in. [2012] oceniają, że deficyt retencji zbiornikowej w Polsce wynosi aż 6% średniego rocznego odpływu rzek. Pożądanym jest zatem spowolniony odpływ wód opadowych bądź roztopowych, aby możliwe było zretencjonowanie fal wezbraniowych. Duże zdolności retencyjne terenu wyrażone spowolnieniem odpływu nie tylko wpływają na ograniczenie zjawisk powodziowych, ale także niedoborów wody w korytach cieków w okresach bezdeszczowych [Ryffel i in. 2014, Stoffel i in. 2016].

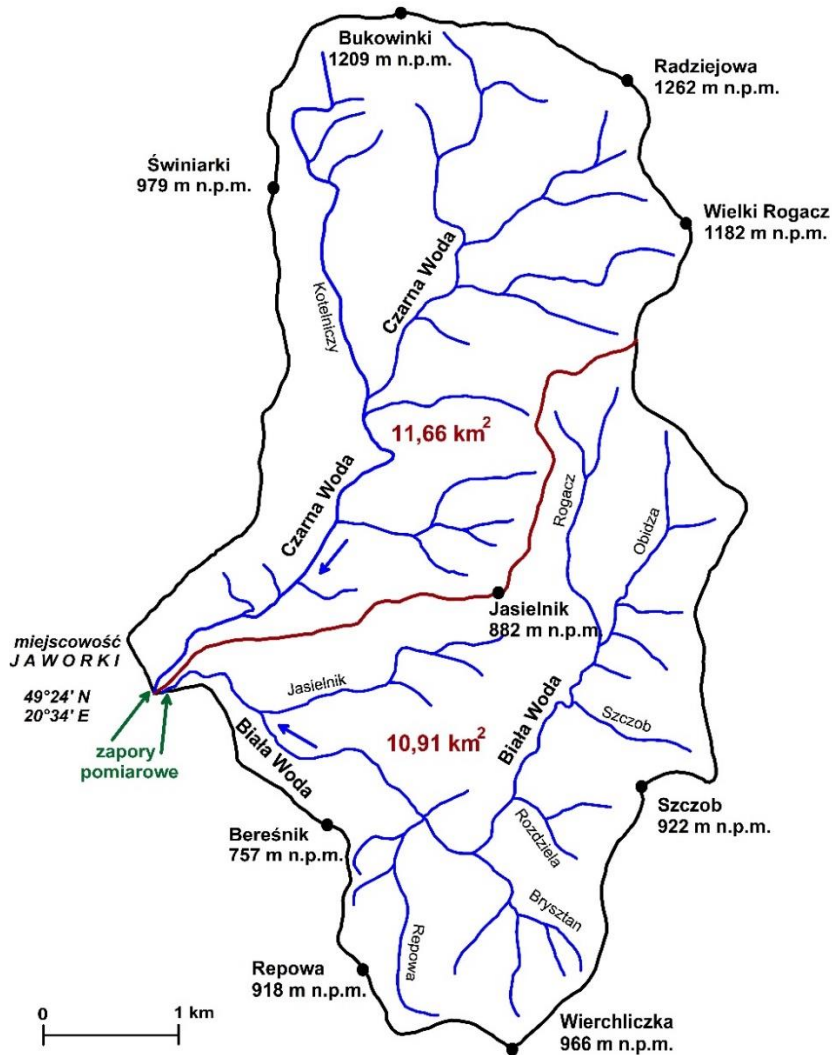
Zagadnienie dynamiki odpływu z terenów górskich jest problematyczne ze względu na ich duże zróżnicowanie geograficzne (m.in. topograficzne, meteorologiczne, glebowe i roślinne), wpływające na zasoby wodne [Becker i McDonnell 1998, Kozak i in. 2019]. W polskich obszarach karpackich, których dotyczy niniejszy artykuł, cechy podłoża skalno-glebowego oraz nachylenie terenu ogólnie nie sprzyjają infiltracji wód opadowych, co potencjalnie generuje duży udział spływu powierzchniowego w odpływie wody ze zlewni [Dynowska 1991]. Możliwe jest jednak zwiększenie zdolności retencyjnych zlewni poprzez właściwe zagospodarowanie i użytkowanie terenu [Wyźga i in. 2018]. Niestety polskie obszary karpackie nie są właściwie zagospodarowane – struktura użytkowania terenu i cechy przekształconych przez człowieka geosystemów odbiegają od optymalnych dla ochrony zasobów wodnych [Kurek 1990, Jaguś 2019].

W niniejszym artykule opisano badania nad dynamiką odpływu wody z dwóch zlewni górskich w Karpatach Polskich. Do badań wybrano sąsiadujące z sobą zlewnie, które – mimo sąsiedztwa – w znacznym stopniu różnią się pod względem geograficznym. Celem badań była ocena zdolności retencyjnych tych zlewni i analiza porównawcza odpływów. Badania miały też na celu rozpoznanie różnic w zasobach wodnych na małym obszarze górskim.

2. OBSZAR I METODY BADAŃ

Do badań wybrano zlewnie potoków Czarna Woda i Biała Woda położone na pograniczu Pienin i Beskidu Sądeckiego. Zlewnie te sąsiadują z sobą, a wymienione potoki łączą się w znanej miejscowości turystycznej Jaworki (Rys. 1) i płyną dalej jako potok o nazwie Grajcarek, który przepływa przez uzdrowskie miasto Szczawnica. Powierzchnia zlewni jest bardzo zbliżona (około 11 km² każda), jednak naturalne warunki przyrodnicze oraz historyczne uwarunkowania zagospodarowania tego terenu zadecydowały o ukształtowaniu różnej przestrzeni geograficznej w obu zlewniach.

Analizę obszaru zlewni pod kątem zdolności retencyjnych oparto na własnych obserwacjach i dokumentacji z marszrut terenowych, a także na dostępnych pracach naukowych przedstawiających środowisko zlewni, zawierających często materiały kartograficzne. Każdorazowe wykorzystanie danych liczbowych oraz informacji opatrzone cytowaniem źródła. Ogólną strukturę użytkowania terenu w formie graficznej sporządzono i pokazano na podstawie materiałów serwisu informacji przestrzennej Geoportal <https://www.geoportal.gov.pl/> (Baza Danych Obiektów Topograficznych – BDOT10k).



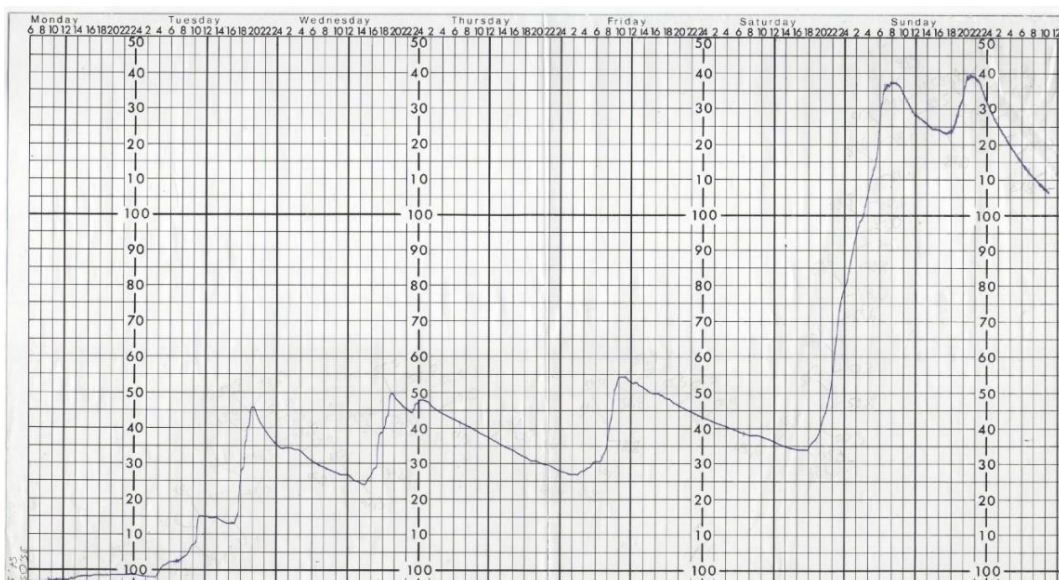
Rys. 1. Zlewnie potoków Czarna Woda i Biała Woda.
Fig. 1. The catchments of the Czarna Woda and Biała Woda streams.

Do celów weryfikacji analiz teoretycznych nad zdolnościami retencyjnymi zlewni wykorzystano wartości odpływów wody ze zlewni z lat hydrologicznych 2006-2022 (od 1 listopada 2005 r. do 31 października 2022 r.). Odpływy określano na podstawie pomiarów przepływów, które realizowano w przekrojach zamykających zlewnie tuż przed połączeniem potoków w Jaworkach. Koryta obu potoków obmurowano i przegrodzono stopniami spiętrzającymi wodę, tworząc w ten sposób niewielkie zbiorniki. W środkowej części każdego ze stopni wykonano wycięcie, w którym zainstalowano metalowy przelew, przez który swobodnie przelewa się woda (Rys. 2). Przy stopniach zamocowano także łąty wodowskazowe, pozwalające na odczyt wysokości warstwy wody przelewającej się przez przelew. Wykorzystano więc powszechnie znaną metodę pomiaru przepływu za pomocą przelewu. Należy dodać, że w sytuacjach wezbraniowych woda przelewa się przez cały stopień (wyposażony w metalowy grzebień), który staje się przelewem ograniczonym murami brzegowymi. Stany wody w przelewach były rejestrowane w sposób ciągły przez limnigrafy znajdujące się w studniach wykopanych obok zbiorników (układ naczyń połączonych). Raz na dobę kontrolowano pracę limnigrafów, dodatkowo odnotowując stany wody wskazywane przez łąty wodowskazowe. Limnigrafy kreśliły przebieg stanów wody na paskach papieru, obejmujących okres tygodnia (Rys. 3). Opisane pomiary były realizowane w ramach działalności badawczej Instytutu Technologiczno-Przyrodniczego – Państwowego Instytutu Badawczego w Falentach (ITP-PIB).



Rys. 2. Stopień pomiarowy w korycie potoku Czarna Woda (fot. A. Jaguś).
Fig. 2. Measurement dam on the Czarna Woda stream (photo by A. Jaguś).

Analizując limnigramy, stany wody określono w odstępie czasowym co 30 minut z dokładnością do 0,1 cm. Dla każdego stanu wody, na podstawie parametrów przelewów, obliczono przepływ ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$). Dysponowano więc wartościami przepływu co 30 minut. Pozwoliło to bardzo dokładnie obliczyć objętość wody, jaka odpłynęła w ciągu każdej doby ($\text{m}^3 \cdot \text{doba}^{-1}$) i dłuższych okresów czasu. Wszystkie dane dotyczące odpływów, w celach porównania dwóch zlewni, podano przeliczone na odpływy z jednostki powierzchni (z 1 km^2).



Rys. 3. Przykładowy limnigram dla przekroju pomiarowego na potoku Biała Woda w maju 2020 r. (dokumentacja Oddziału ITP-PIB w Krakowie).

Fig. 3. An example of a limnigraph record in the cross-section on the Biała Woda stream in May 2020 (documentation of the ITP-PIB, Branch in Kraków).

3. CECHY RETENCYJNE ZLEWNI

W literaturze wyróżnia się kilka form retencji zlewniowej [Mioduszewski 1999]: krajo-brazową związaną z rozmieszczeniem form użytkowania terenu, glebową, śnieżną, retencję wód podziemnych (uzależnioną od litologii podłoża), retencję wód powierzchniowych. Ostatnia z wymienionych praktycznie nie występuje w badanych zlewniach, gdzie brak jest naturalnych bądź sztucznych zbiorników wodnych. Na zdolności retencyjne obszaru zlewniowego wskazuje także wiele jego parametrów geomorfologicznych i hydrograficznych, a także warunki klimatologiczne. Poniższe podrozdziały stanowią próbę ogólnej oceny wybranych cech zlewniowych pod kątem zdolności retencyjnych terenu. Zlewnie Czarnej Wody i Białej Wody zostały scharakteryzowane w wielu publikacjach naukowych, przy czym należy wśród nich wyróżnić obszerne opracowanie Prochala [1962], przedstawiające stosunki fizjograficzne terenu w powiązaniu z siecią hydrograficzną, a także opracowania Dobrzańskiego i in. [1958, 1962], charakteryzujące pokrywy glebowe.

3.1. Ukształtowanie terenu

Zlewnia Czarnej Wody rozciąga się w przedziale wysokościowym 566–1262 m n.p.m., zatem deniwelacja wynosi 696 m. Poniżej 700 m n.p.m. leży 11,2% powierzchni zlewni, od 700 do 900 m n.p.m. – 40,5%, od 900 do 1100 m n.p.m. – 37,6%, powyżej 1100 m n.p.m. – 10,7%. Przeciętne wzniesienie terenu jest równe 895,44 m n.p.m., a deniwelacje mierzone od wododziału do dna dolin wynoszą średnio około 252,5 m [Prochal 1962]. Obszar zlewni charakteryzują duże spadki – ponad połowa obszaru (55,3%) posiada spadki większe od 30%, a miejscami (wysokie brzegi, partie szczytowe) przekraczają one 45%. Spadki na blisko ćwiartce zlewni (23,1%) mieszczą się w przedziale 20–30%. Przeciętny spadek terenu wynosi aż 31% [Prochal 1962].

Rozciągłość hipsometryczna zlewni Białej Wody jest znacznie mniejsza niż Czarnej Wody, bowiem wynosi 493 m – od 567 do 1060 m n.p.m. Poniżej 700 m n.p.m. jest położone 20,6% zlewni, od 700 do 900 m n.p.m. – 59,2%, a powyżej 900 m n.p.m. – 20,2%. Przeciętne wzniesienie terenu jest równe 842,07 m n.p.m., a deniwelacje od wododziału do dna dolin wynoszą średnio około 120 m [Prochal 1962]. Spadki terenu powyżej 30% dotyczą prawie jednej trzeciej powierzchni zlewni (31,9%), a na ponad połowie zlewni (53,6%) wynoszą 10–30%. Przeciętny spadek terenu wynosi 24% [Prochal 1962].

Porównanie podstawowych parametrów morfologicznych obu zlewni pozwala wskazywać zlewnię Czarnej Wody jako tę o mniejszych zdolnościach retencyjnych. Wiąże się to zwłaszcza z dużymi spadkami terenu. Dolina Czarnej Wody z wyjątkiem partii ujściowej ma profil poprzeczny typowego „V”. Dotyczy to także dolin dopływów. Dolina Białej Wody nabiera charakteru typowo wciosowego dopiero w górnej części. Dodatkowo w zlewni Czarnej Wody występują wąwozy mogące przyspieszać odpływ wody, które zajmują około 5% jej powierzchni. W zlewni Białej Wody formy te nie są spotykane.

Spadki terenu w obu zlewniach są związane ze spadkami podłużnymi koryt cieków. Dla lepszej przejrzystości tekstu ich wartości zostaną podane w kolejnym podrozdziale, lecz już tutaj – w części dotyczącej ukształtowania terenu – należy zaznaczyć, że są one większe w zlewni Czarnej Wody, co teoretycznie sprzyja szybszemu odwodnieniu terenu, a dodatkowo rozwojowi procesów erozyjnych.

3.2. Hydrografia

Źródło Czarnej Wody znajduje się na wysokości 1085 m n.p.m. w szczytowej partii góry Radziejowa. Długość Czarnej Wody (od źródła do połączenia z Białą wodą) wynosi 6,95 km, a średni spadek koryta potoku jest równy 75‰. W partii źródłowej osiąga on prawie 270‰, jednak wraz ze spadkiem wysokości bezwzględnej profil podłużny doliny ulega łagodzeniu, dzięki czemu w dolnym odcinku na długości około 3,5 km Czarna Woda płynie ze spadkiem niespełna 40‰. Średnie spadki koryt dopływów Czarnej Wody kształtują się w granicach 108–210‰ [Prochal 1962]. Potok Biała Woda wypływa na wysokości 935 m n.p.m. i początkowo płynie jako potok Obidza. Długość Białej Wody (od źródła Obidzy do połączenia z Czarną wodą) wynosi 7,29 km, a średni spadek koryta potoku jest równy 51‰. Spadek Obidzy nieznacznie przekracza 90‰, zaś Biała Woda w odcinku ujściowym na długości około 2,6 km płynie ze spadkiem poniżej 30‰. Średnie spadki koryt dopływów Białej Wody kształtują się w granicach 91–151‰ [Prochal 1962].

Zlewnie obu potoków różnią się pod względem kształtu. Zlewnia Czarnej Wody posiada kształt regularny z owalnym obszarem zbiorczym w swej górnej części oraz wydłużoną szyją w części dolnej. Spływ wody ze zlewni jest więc raczej regularny – potok główny jest sukcesywnie zasilany dopływami wraz z przyrostem zlewni. Kształt zlewni Białej Wody jest nieregularny z obszarem zbiorczym rozwiniętym zwłaszcza w środkowym biegu. Może to sprzyjać koncentracji odpływu.

Niewątpliwie znaczenie dla tempa odpływu wody ze zlewni ma charakter sieci cieków. Według Prochala [1962] w zlewni Czarnej Wody sieć cieków ma układ dłoniasty i gęstość $2,37 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ (składa się na nią 27,66 km stałych cieków). Poza tym autor ten zidentyfikował w zlewni 54 źródła – niemal wszystkie zwietrzelinowe o małej wydajności (tylko dwa szczelinowe). Z kolei w zlewni Białej Wody Prochal [1962] zinwentaryzował 34,34 km stałych cieków, co daje gęstość $3,15 \text{ km} \cdot \text{km}^{-2}$ w układzie pierzastym. Ilość źródeł określił na 99, w tym 94 zwietrzelinowe i 5 szczelinowych o małej wydajności. W rekonesansie terenowym zwraca uwagę w tej zlewni dodatkowo częste występowanie młak.

Parametry typowo hydrograficzne, zwłaszcza gęstość i układ sieci cieków oraz uźródłowienie terenu, wskazują na mniejsze zdolności retencyjne zlewni Białej Wody ze względu na rozwiniętą sieć odwadniającą.

3.3. Pokrywa glebowa

Pokrywa glebowa jest elementem środowiska geograficznego, który przyjmuje wodę opadową i decyduje (współ z roślinnością) o jej częściowym zatrzymaniu oraz dystrybucji na spływ powierzchniowy lub infiltrację [Adamczyk 1980]. Szereg cech gleby wpływa na jej zdolności retencyjne i wodoprzepuszczalne, lecz skład granulometryczny (uziarnienie) ma w tym zakresie rolę dominującą.

Zgodnie z ówczesnie stosowaną systematyką gleb, Dobrzański i in. [1962] podali następującą strukturę przestrzenną genetycznych typów gleb w zlewni Czarnej Wody: brunatne – 65,4%, bielcowe – 29,2%, gleby szkieletowe ze skał fliszowych – 3%, czarne ziemie – 2%, rędziny węglanowe – 0,2%, gleby bagienne – 0,2%. W pracy podano także klasyfikację granulometryczną gleb. Materiałem o największej wodoprzepuszczalności jest piasek gliniasty, który zalega na 12% powierzchni zlewni (w jej górnej części). W zlewni zdecydowanie dominuje glina lekka (zarówno wśród gleb brunatnych, jak i bielcowych) – ten rodzaj materiału zalega na co najmniej 63% powierzchni zlewni. Gлина średnia występuje na 13,9% powierzchni zlewni, a glina ciężka – 5,7%. W zlewni Czarnej Wody nie spotyka się materiału ilastego.

W zlewni Białej Wody poszczególne typy gleb zajmują następujący odsetek powierzchni [Dobrzański i in. 1958]: gleby brunatne – 83,6%, gleby szkieletowe ze skał fliszowych – 8,2%, rędziny węglanowe – 3,2%, gleby bagienne – 2,1%, gleby bielcowe – 1,8%, czarne ziemie – 1,1%. Pod względem granulometrycznym nie występują tu piaski gliniaste. Na przeszło połowie obszaru (50,9%) zalegają gliny lekkie, na 22,7% – gliny średnie i na 10,9% – gliny ciężkie. Pokrywy ilaste zidentyfikowano na 0,9% zlewni. W zlewni Białej Wody zwraca uwagę znaczny odsetek gleb szkieletowych, do czego niewątpliwie przyczynia się obecność skałek wapiennych. Skałki zajmują 1,8% powierzchni tej zlewni.

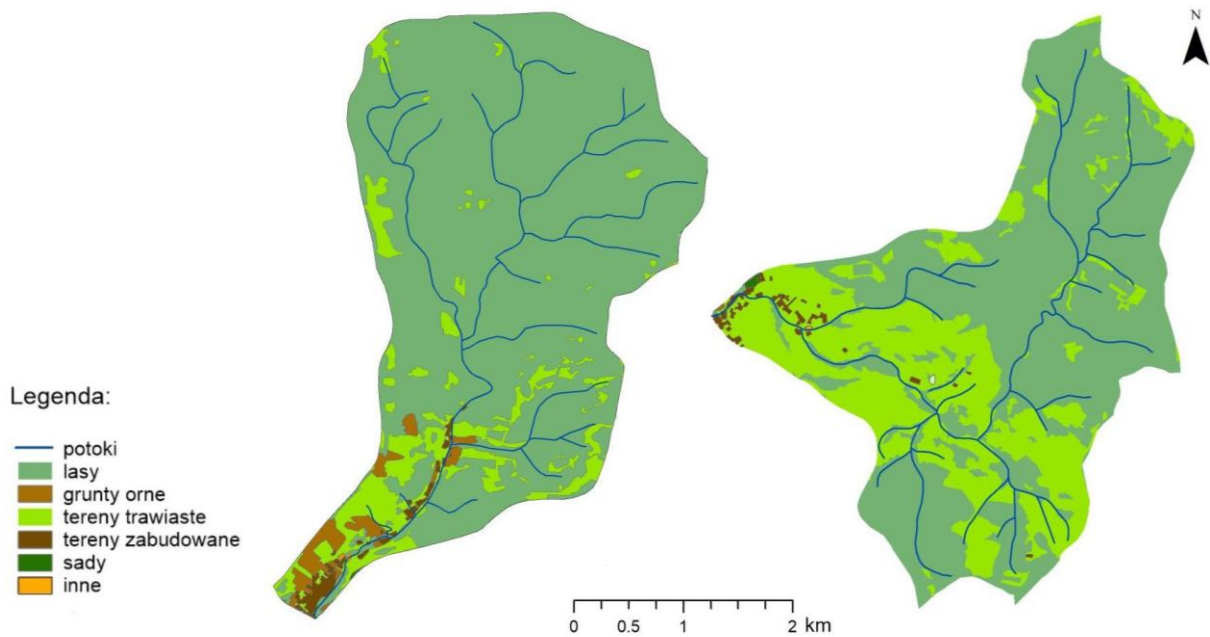
Z powyższych danych dotyczących uziarnienia wynika, że pokrywy glebowe o gorszej przepuszczalności są bardziej rozpowszechnione w zlewni Białej Wody. Występujące tu także wspomniane skałki i inicjalne gleby naskałkowe są dla wody opadowej praktycznie nieprzepuszczalne.

3.4. Użytkowanie terenu

Omawiane zlewnie są różnie zagospodarowane i użytkowane. W uogólnieniu zlewnia Czarnej Wody jest zlewnią w głównej mierze zajęta przez tereny leśne, gdzie prowadzona jest gospodarka leśna. Zlewnia Białej Wody to zlewnia leśno-rolnicza, gdzie obok gospodarki leśnej znaczna część terenu jest użytkowana jako pastwiska dla owiec. Wynika to z historycznych uwarunkowań działalności człowieka na tym terenie. Zlewnia Białej Wody była obszarem znacznie wylesionym przez ludność łemkowską zamieszkującą te tereny przed drugą wojną światową, a po przesiedleniu tej ludności została przeznaczona wraz dużą częścią Małych Pienin na potrzeby wypasu owiec z Podhala. Wypas jest prowadzony do chwili obecnej, choć na znacznie mniejszą skalę [Jaguś 2020]. Ogólne użytkowanie terenu obu zlewni przedstawiono na Rys. 4. Tereny leśne i zadrzewione w zlewniach Czarnej Wody i Białej Wody zajmują odpowiednio około 85% i 65%. Dla terenów trawiastych odsetek jest następujący: 11% – zlewnia Czarnej Wody, 34% – zlewnia Białej Wody. Zabudowa w obu zlewniach zajmuje około 1% ich powierzchni. W dolnej partii zlewni Czarnej Wody znajdują się też poletka upraw ornych. Warto dodać, że w okresie badań areal zajęty przez poszczególne formy gospodarowania ulegał zmianom [Kopacz i in. 2021]. W obu zlewniach o kilka procent wzrosła powierzchnia terenów leśnych i jednocześnie zmniejszyła się powierzchnia terenów trawiastych. W ostatnich kilku latach dość intensywnie zabudowywane są ujściowe partie zlewni, zwłaszcza w dolinie Białej Wody.

Ogólna struktura użytkowania zlewni wskazuje, że pod tym względem większe zdolności retencyjne należy przypisywać zlewni Czarnej Wody głównie z powodu znacznego zalesienia terenu. Parametry retencyjne lasu (intercepcja, infiltracja, zużycie wody itd.) zależą jednak od wielu czynników, m.in. składu gatunkowego i kondycji drzewostanów, a nawet technik pielęgnacji lasu. Las z pewnością ogranicza spływ powierzchniowy, choć jego rola przeciwpowodziowa jest dyskusyjna zwłaszcza w warunkach obfitych i długotrwałych opadów. Mniejszą lub większą rolę retencyjną lasu w obszarach górskich potwierdzają liczne badania w różnych regionach świata [Dubicki i Woźniak 1993, Yang i in. 2005, He i in. 2012, Reinhardt-Imjela i in. 2018].

Tereny trawiaste również mogą odgrywać dużą rolę w spowalnianiu odpływu, jednak zwłaszcza w sytuacji użytkowania łąkowego [Kopeć 1990] lub, co widać w terenie, gdy nie są użytkowane. Taka sytuacja dotyczy zlewni Czarnej Wody. W zlewni Białej Wody tereny trawiaste są użytkowane jako pastwiska dla owiec. Jak łatwo zaobserwować zwierzęta często zgryzają roślinność prawie do powierzchni gleby, a także niszczą tę powierzchnię racicami. Powoduje to nasilenie spływu powierzchniowego, zwłaszcza w warunkach słaboprzepuszczalnej pokrywy glebowej.



Rys. 4. Użytkowanie terenu w zlewniach Czarnej Wody i Białej Wody na podstawie materiałów kartograficznych BDOT10k.

Fig. 4. Land use in Czarna Woda and Biała Woda catchments based on BDOT10k cartographic materials.

Jak wspomniano, w zlewni Czarnej Wody występują grunty orne, lecz nie zaobserwowano, by powodowały przyspieszenie odpływu wody, ponieważ są na ogół oddzielone od koryta potoku użytkami zielonymi i strefą zabudowy.

3.5. Ocena retencji

Podsumowując charakterystykę badanych zlewni pod kątem możliwości retencyjnych (spowalniania odpływu) można twierdzić, że według większości cech zlewniowych większe zdolności retencyjne posiada zlewnia Czarnej Wody (Tab. 1). Obok rozważań teoretycznych, również obserwacje terenowe mogą skłaniać do takiej oceny – fale wezbraniowe odpływające ze zlewni Czarnej Wody wydają się bardziej spłaszczone i bardziej długotrwałe.

Tab. 1. Porównanie cech badanych zlewni pod kątem możliwości spowalniania odpływu wody.

Tab. 1. Comparison of the studied catchments in terms of the possibility of water retention.

Zespół cech zlewniowych	Zdolności retencyjne	
	Zlewnia Czarnej Wody	Zlewnia Białej Wody
Cechy geomorfologiczne	mniejsze	większe
Cechy hydrograficzne	większe	mniejsze
Cechy gruntowe	większe	mniejsze
Użytkowanie terenu	większe	mniejsze

Będąc podczas deszczu choćby w miejscowości Jaworki dostrzega się, że w korycie potoku Biała Woda przepływ dość szybko wzrasta i staje się burzliwy, a woda ulega silnemu zmętnieniu – po pewnym czasie niesie tak dużo cząstek glebowych, że nie posiada żadnej przezroczystości, a jej barwa jest brązowa. W korycie potoku Czarna Woda przepływ również wzrasta, ale wody nie ma tak dużo i jej zabrudzenie jest mniejsze. Z kolei po deszczu daje się

zauważyć dość szybki spadek przepływu Białej Wody (cały czas jest brudna), a w tym samym czasie Czarna Woda ciągle prowadzi jeszcze dużo wody.

Ciekawe obserwacje można poczynić w okresie wczesnowiosennym, gdy w dzień śnieg ulega topnieniu i zachodzi powierzchniowe spływanie wody, a nocą panują temperatury ujemne i topnienie jest zatrzymane. Codzienne fale wezbraniowe są wtedy widoczne zwłaszcza na potoku Biała Woda, bowiem pokrywa śnieżna zalegająca na terenach pastwiskowych podlega bezpośredniemu nasłonecznieniu i łatwo się topi. Śnieg zalegający w lesie pozostaje w cieniu – jest tam zdecydowanie chłodniej. W związku z tym topnienie śniegu w zlewni Czarnej Wody nie jest tak gwałtowne i trwa znacznie dłużej.

4. DYNAMIKA ODPLYWÓW

Rozważania na temat zdolności retencyjnych badanych zlewni najlepiej weryfikują wyniki pomiarów przepływów w obu potokach, które realizowano w latach hydrologicznych 2006-2022. Podstawowe wartości odpływów ze zlewni dla różnych przedziałów czasowych zaprezentowano w Tab. 2. Jak widać, w skali wielolecia odpływ z obu zlewni był bardzo zbliżony, a więc zasoby wodne były porównywalne, jednak porównując odpływy roczne pomiędzy zlewniami dostrzega się, że co prawda w niektórych latach były one prawie takie same (np. 2012, 2013), ale zdarzały się też lata z dużymi różnicami. Największe różnice w odpływie rocznym z obu zlewni sięgały około 20% i wystąpiły w roku 2008 (większy odpływ ze zlewni Czarnej Wody) i w roku 2014 (większy odpływ ze zlewni Białej Wody).

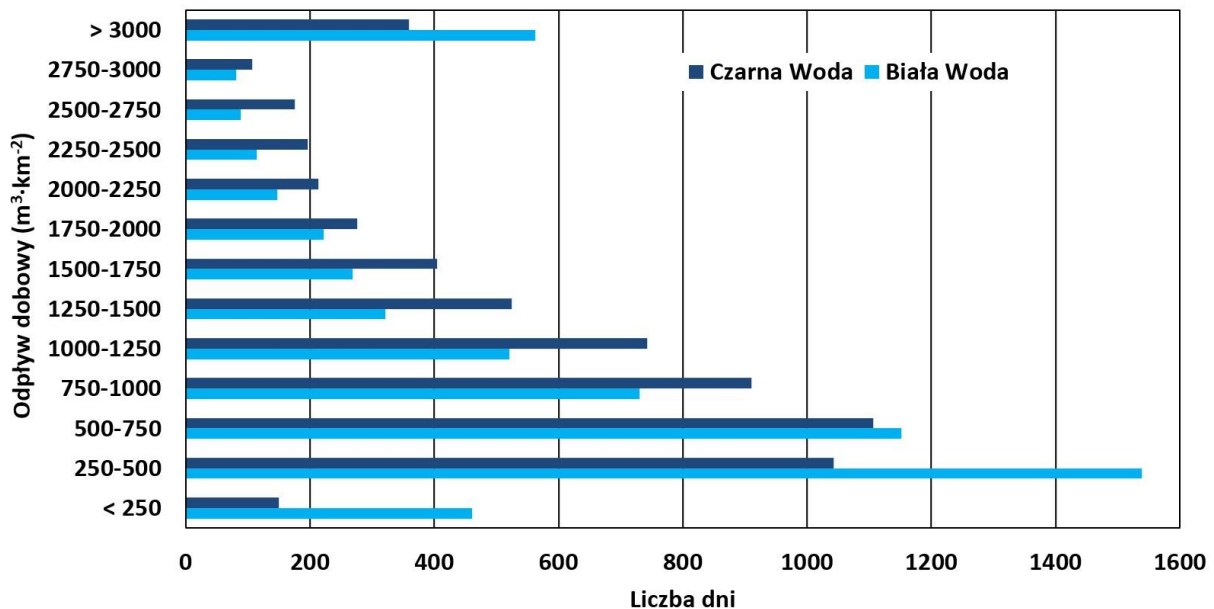
Odpływy miesięczne z obu badanych zlewni były zróżnicowane w ciągu roku. Najmniejsze występowały w okresie zimowym – od grudnia do lutego, a największe wiosną i na początku lata (Tab. 2). Porównanie wyników z obu zlewni wykazało, że miesięczne odpływy ze zlewni Czarnej Wody częściej były większe od odpływów ze zlewni Białej Wody. Odpływy ze zlewni Czarnej Wody przeważały głównie w sierpniu (14 z 17 analizowanych sierpniów). Miesiącem, w którym zdecydowanie przeważał odpływ ze zlewni Białej Wody był marzec (16 marców). Przewaga ta dotyczyła też stycznia (10 styczniów) i lutego (10 lutych). Wyraźnie większe amplitudy odpływów miesięcznych stwierdzono dla zlewni Białej Wody.

Problem zdolności retencyjnych badanych zlewni dobrze naświetlają dobowe wartości odpływów. W przypadku zlewni Białej Wody miały one po pierwsze zdecydowanie większą amplitudę, a więc spadały do małych wartości, ale także osiągały bardzo duże wartości w porównaniu z Czarną wodą. Po drugie różna była częstość występowania odpływów o określonych wartościach dla okresu badań, obejmującego 6209 dni (Rys. 5). W zlewni Białej Wody odpływy do $500 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ występowały przez 32,2% dni, a odpływy ponad $3000 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$ przez 9,1% dni. Z kolei w zlewni Czarnej Wody czas trwania tych samych odpływów wynosił odpowiednio 19,2% dni i 5,8% dni. Zatem w zlewni Białej Wody znaczny udział miały odpływy zarówno o małych, jak i dużych wartościach. W zlewni Czarnej Wody częściej występowały odpływy o wartościach $750\text{--}3000 \text{ m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$. Potwierdza to opisane wcześniej obserwacje, wskazujące na to, że teren zlewni Białej Wody po zasileniu opadami lub roztopami dość szybko ulega odwodnieniu. Woda spływa w postaci fal wezbraniowych i w warunkach dłuższego braku zasilania, w korycie występują niedobory wody. Zlewnia Czarnej Wody dłużej utrzymuje wodę, przez co zasilanie cieku odbywa się w większej mierze (w porównaniu z Białą wodą) za pośrednictwem odpływu podziemnego.

Tab. 2. Charakterystyka odpływu ze zlewni Czarnej Wody i Białej Wody w wieloleciu hydrologicznym 2006-2022.

Tab. 2. Outflow characteristics from the Czarna Woda and Biała Woda catchments in the hydrological multi-year period 2006-2022.

Rodzaj odpływu z jednostką	Odpływ – wartość lub przedział wartości	
	Czarna Woda	Biała Woda
Sumaryczny 2006-2022 ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	8 707 942	8 889 268
Roczny ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	263 451 – 1 164 102	288 786 – 1 327 591
Średni roczny ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	512 232	522 898
Miesięczny ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	4356 – 261 317	2514 – 417 297
Średni miesięczny ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	42 686	43 575
listopad	30 655	30 548
grudzień	25 960	25 899
styczeń	26 613	26 716
luty	26 469	29 270
marzec	51 272	62 293
kwiecień	62 229	60 289
maj	62 887	67 687
czerwiec	63 961	65 505
lipiec	51 609	51 914
sierpień	36 128	27 926
wrzesień	37 727	38 894
październik	36 722	35 959
Dobowy ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	87 – 51 741	37 – 168 151
Średni dobowy ($\text{m}^3 \cdot \text{km}^{-2}$)	1406	1432
Chwilowy minimalny ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	0,82	0,18
Średni chwilowy ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	16,37	16,35
Chwilowy maksymalny ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$)	599	1946

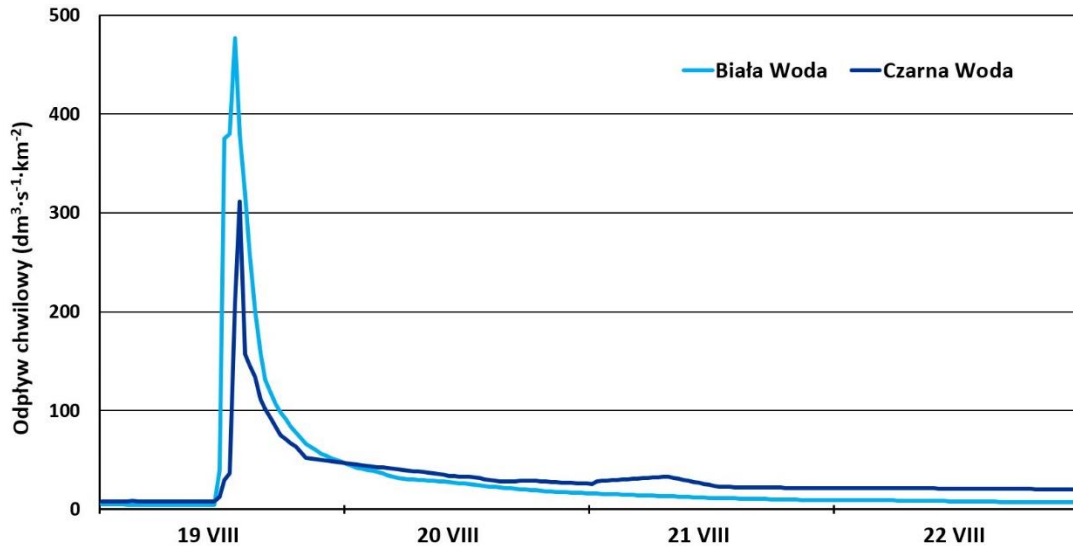


Rys. 5. Histogram częstości odpływów dobowych ze zlewni Czarnej Wody i Białej Wody w wieloleciu hydrologicznym 2006-2022.

Fig. 5. Histogram of the frequency of daily outflows from the Czarna Woda and Biała Woda catchments in the hydrological multi-year period 2006-2022.

Odpływ chwilowy (podawany w $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) jest w Polsce podstawową miarą zasobów wodnych na określonym obszarze [Dynowska 1991]. Średni odpływ w polskich obszarach karpackich przekracza $10 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (w najwyższym paśmie górskim – Tatrach – sięga ponad $50 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), w regionach wyżynnych wynosi do kilku $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a na nizinach często

nie osiąga $2 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$. Obliczenia wykazały, że średnie odpływy chwilowe były podobne w obu zlewniach – dla zlewni Czarnej Wody na poziomie $16,37 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, a dla zlewni Białej Wody $16,35 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przy czym odpływy chwilowe minimalne były większe w zlewni Czarnej Wody, a odpływy chwilowe maksymalne były większe w zlewni Białej Wody (Tab. 2). Szczegółowe analizy danych pokazały, że krótkotrwałe odpływy o charakterze wezbraniowym były co najmniej o kilkadziesiąt procent większe w zlewni Białej Wody (Rys. 6).



Rys. 6. Przykład przebiegu fali wezbraniowej w zlewniach Czarnej Wody i Białej Wody w sierpniu 2020 roku.

Fig. 6. An example of the course of a flood wave in the Czarna Woda and Biała Woda catchments in August 2020.

5. WNIOSKI

1. W badanych, sąsiadujących zlewniach górskich, mimo zróżnicowania geograficznego, zasoby wodne w skali wielolecia były zbliżone. W krótszych okresach, zwłaszcza miesiąca lub doby, notowano często znaczne różnice.
2. Analiza geograficzna obszarów zlewniowych pokazała, że większe zdolności retencyjne posiada zlewnia Czarnej Wody, a przyczyn można poszukiwać m.in. w większej przepuszczalności podłoża oraz większym zalesieniu. Potwierdziły to dane pomiarowe odpływów z obu zlewni.
3. W okresach nasilonego spływania wody (z topnienia śniegu, z opadów) wyraźnie przeważał odpływ ze zlewni Białej Wody, natomiast w okresach bezopadowych przeważał odpływ ze zlewni Czarnej Wody. Świadczy to o odmiennej strukturze zasilania potoków ze spływu powierzchniowego i odpływu podziemnego.
4. Odpływy podczas przechodzenia fal wezbraniowych były zdecydowanie mniejsze w zlewni Czarnej Wody. Procesy retencjonowania wody w zlewni Czarnej Wody prowadziły także do zachowania odpływów minimalnych na poziomie kilkakrotnie wyższym niż w zlewni Białej Wody.

Informacja od Wydawcy

Temat prezentowany podczas II Konferencji Naukowo-Technicznej „Nauka-Technologia-Środowisko” w dniach 27-29 września 2023 r. w Wiśle. Konferencja finansowana przez Ministra Edukacji i Nauki w ramach programu „Doskonała nauka” – moduł „Wsparcie konferencji naukowych” (projekt nr DNK/SP/546599/2022).

LITERATURA

- Adamczyk B. 1980. Rola gleby w regulowaniu dyspozycyjnych zasobów wodnych w Karpatach. *Zeszyty Problemowe Postępów Nauk Rolniczych*, 235, 59–82.
- Becker A., McDonnell J.J. 1998. Topographical and ecological controls of runoff generation and lateral flows in mountain catchments. *IAHS Publication „Hydrology, Water Resources and Ecology in Headwaters”*, 248, 199–206.
- Dmitruk U., Kloze J., Sieński E. 2012. Zamulenie polskich zbiorników retencyjnych. Diagnoza stanu i proponowane przeciwdziałania. [W:] *Zrównoważone gospodarowanie zasobami wodnymi oraz infrastrukturą hydrotechniczną w świetle prognozowanych zmian klimatycznych* (red. W. Majewski, T. Walczykiewicz). Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej PIB, Warszawa, 161–229.
- Dobrzański B., Gliński J., Guz T., Pomian J. 1958. Gleby terenu dorzecza Białej Wody. *Roczniki Nauk Rolniczych*, F, 72, 3, 963–990.
- Dobrzański B., Gliński J., Guz T., Pomian J. 1962. Charakterystyka erodowanych gleb dorzecza Czarnej Wody. *Roczniki Nauk Rolniczych*, D, 96, 63–92.
- Dubicki A., Woźniak Z. 1993. Wpływ degradacji leśnego środowiska w Sudetach zachodnich na zmianę odpływu rzek górskich. *Zeszyty Naukowe AR we Wrocławiu*, 232 – *Inżynieria Środowiska*, III, 77–85.
- Dynowska I. 1991. Współczesne środowisko przyrodnicze – obieg wody. [W:] Starkel L. (red.): *Geografia Polski. Środowisko przyrodnicze*. PWN, Warszawa, 355–387.
- He Z.B., Zhao W.Z., Liu H., Tang Z.X. 2012. Effect of forest on annual water yield in the mountains of an arid inland river basin: a case study in the Pailugou catchment on northwestern China's Qilian Mountains. *Hydrological Processes*, 26, 4, 613–621.
- Jaguś A. 2019. Water retention problem in the mountain areas: a case of Sola river flows, Polish Carpathians. *Journal of Ecological Engineering* 20(11):167–177.
- Jaguś A. 2020. The impact of extensive grazing on the fertility of mountain streams on the example of the Biała Woda valley in the Pieniny range (Polish Carpathians). *Journal of Ecological Engineering*, 21, 4, 112–119.
- Kopacz M., Kowalewski Z., Santos L., Mazur R., Lopes V., Kowalczyk A., Bar-Michalczyk D. 2021. Modelling of long term low water level in the mountain river catchments area. *Journal of Water and Land Development*, 51, 225–232.
- Kopeć S. 1990. Wpływ sposobu użytkowania gruntu na wielkość spływu powierzchniowego po stoku i stężenia unoszonych składników nawozowych. *Materiały Seminaryjne IMUZ*, 26, 61–68.
- Kostuch R. 1976. Przyrodnicze podstawy gospodarki łąkowo-pastwiskowej w górach. PWRiL, Warszawa.
- Kozak J., Cebulak D., Stec T., Jaguś A. 2019. Variation of precipitation gradient in mountain areas based on the example of the Western Beskids in the Polish Carpathians. *Journal of Ecological Engineering*, 20(9), 261–266.
- Kurek S. 1990. Użytkowanie ziemi a ochrona wód. *Materiały Seminaryjne IMUZ*, 27, 83–94.
- Mioduszewski W. 1999. Ochrona i kształtowanie zasobów wodnych w krajobrazie rolniczym. Wydawnictwo IMUZ, Falenty.
- Prochal P. 1962. Charakterystyka sieci hydrograficznej źródlowych potoków Grajcarka na tle stosunków fizjograficznych. *Roczniki Nauk Rolniczych*, D, 96, 13–61.
- Reinhardt-Imjela C., Imjela R., Bolscher J., Schulte A. 2018. The impact of late medieval deforestation and 20th century forest decline on extreme flood magnitudes in the Ore Mountains (Southeastern Germany). *Quaternary International*, 475, 42–53.
- Ryffel A.N., Rid W., Gret-Regamey A. 2014. Land use trade-offs for flood protection: A choice experiment with visualizations. *Ecosystem Services*, 10, 111–123.
- Stoffel M., Wyzga B., Marston R.A. 2016. Floods in mountain environments: A synthesis. *Geomorphology*, 272, 1–9.
- Viviroli D., Weingartner R. 2004. The hydrological significance of mountains: from regional to global scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 8(6), 1016–1029.
- Wyzga B., Kundzewicz Z., Konieczny R., Piniewski M., Zawiejska J., Radecki-Pawlik A. 2018. Comprehensive approach to the reduction of river flood risk: Case study of the Upper Vistula Basin. *Science of the Total Environment* 631-632, 1251–1267.
- Yang G.J., Xiao D.N., Zhou L.H., Tang C.W. 2005. Hydrological effects of forest landscape patterns in the Qilian Mountains – A case study of two catchments in northwest China. *Mountain Research and Development*, 25, 3, 262–268.