PRZEGLĄD GEOGRAFICZNY
2017, 89, 1, s. 29-44

Sezonowość odpływu z wybranych zlewni karpackich

Seasonality of outflow in selected Carpathian catchments

PAWEŁ JOKIEL, PRZEMYSŁAW TOMALSKI
Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki,
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88; joker@geo.uni.lodz.pl; tomalski@uni.lodz.pl

Zarys treści. Opracowanie zawiera analizę sezonowości odpływu w 12 zlewniach karpackich. Do badań wykorzystano szeregi dobowych przepływów z lat 1951-2010. Dla badanych przekrojów wodowskazowych obliczono: indeks sezonowości odpływu (IS), wskaźniki: pory koncentracji odpływu (WPK) i koncentracji odpływu (GMO) oraz terminu połowy odpływu (TPO), a także współczynniki ich zmienności wieloletniej i korelacji wzajemnej. Analiza pozwoliła wykryć szereg prawidłowości w ich rozkładzie przestrzennym i dynamice wieloletniej oraz zidentyfikować powiązania między nimi. Z przeprowadzonych badań wynika również, że w polskiej części Karpat nie nastąpiła trwała zmiana sezonowej struktury odpływu rocznego. Dostrzeżone trendy są nieistotne, a obserwowana w wieloleciu zmienność sezonowości ma charakter losowych fluktuacji.
Słowa kluczowe: sezonowość, odpływ rzeczny, Karpaty.

Założenia i uwagi wstępne

Karpaty to obszar o największej w Polsce dynamice procesów hydrologicznych. Jednocześnie wielkość odpływu całkowitego jest tu bardzo zróżnicowana, co wynika ze zmiennej przestrzennie hipsometrii terenu (wpływającej na opady i zdolność do formowania odpływu powierzchniowego i podziemnego) oraz różnic retencyjności wywołanych zróżnicowaną budową geologiczną i tektoniką obszaru. Najwyższe średnie odpływy w Karpatach notowano w zlewniach tatrzańskich (>50 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$), najniższe natomiast na wschodnim pogórzu karpackim (<8 $dm^3 \cdot s^{-1} \cdot km^{-2}$; Soja, 2002). Najmniej zasobne w wodę są zlewnie Wisłoki i Wisłoka, co wynika z relatywnie niskich opadów i małej zdolności retencyjnej budujących je ogniw fliszu. Na wschód i na zachód od tego obszaru zasobność wodna rzek karpackich rośnie – na wschodzie z powodu wzrostu zasobów wodnych występujących tam zbiorników wód podziemnych i zmian reżimu rzecznego, a na zachodzie ze względu na podwyższone opady i wzrost retencyjno-

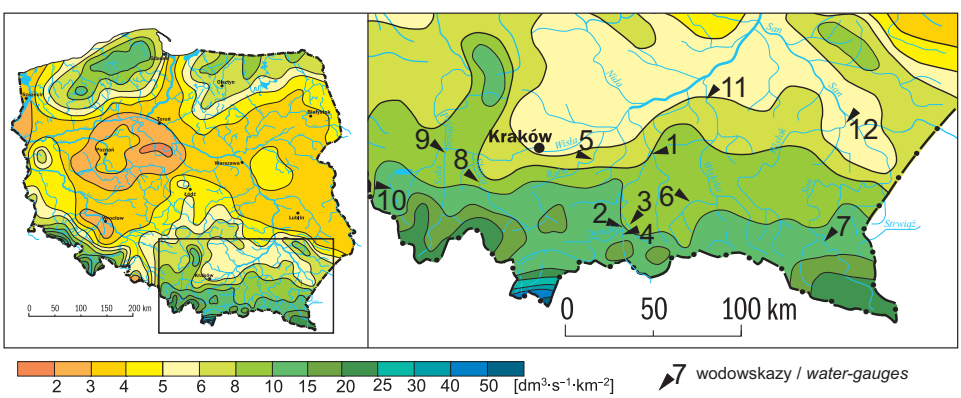
http://dx.doi.org/10.7163/PrzG.2017.1.2

ści uwarunkowany zmianami litologicznymi fliszu i głębokością uszczelinienia górotworu. Karpaty polskie poddawane są silnej i różnokierunkowej presji ze strony człowieka. Za najbardziej przekształconą uznaje się w regionie zlewnię Wisłoka (jest to jednocześnie zlewnia „najuboższa" w wodę), a za najmniej przekształcone – zlewnie Dunajca i Sanu (Soja, 2002).

Występujące w tej części Polski zróżnicowanie przestrzenne odpływu całkowitego jest m.in. skutkiem jego dużej dynamiki sezonowej oraz wyraźnie zaznaczających się fluktuacji wieloletnich (Wrzesiński, 2013, 2016). Podstawowym celem tego opracowania jest zatem zidentyfikowanie, możliwie wszechstronnie i za pomocą różnych miar, kilku aspektów sezonowej zmienności odpływu rzecznego w wybranych zlewniach karpackich położonych w różnych częściach górotworu karpackiego i reprezentujących różnorodne warunki środowiskowe. Analiza ta została poszerzona o ocenę skali i kierunków wieloletniej zmienności sezonowości oraz poszukiwanie trwałych tendencji przemian tej cechy odpływu. Zidentyfikowane zostały również powiązania w wektorze obliczonych charakterystyk sezonowości. Praca powinna też odpowiedzieć na pytanie: czy antropopresja i notowane ostatnio zmiany klimatyczne znajdują swe odbicie w zmianach sezonowej struktury odpływu z badanych zlewni?

Materiał badawczy i metody analiz

Do badań wytypowano 12 rzek (zlewni autochtonicznych) karpackich odwadniających zarówno Beskidy, jak i masyw tatrzański (ryc. 1). Materiał hydrometryczny z przekrojów wodowskazowych pozyskano z bazy danych IMiGW-PIB.



Ryc. 1. Rozmieszczenie przekrojów wodowskazowych na tle średniego odpływu jednostkowego w Polsce. Numery przekrojów zgodne z tabelą 1

Źródło: Jokiel (2004); zmienione.

Locations of water-gauges as set against specific river outflow in Poland. Numbering as in Table 1

Source: Jokiel (2004); as modified.

Dane pochodzą z wielolecia 1951-2010, przy czym długości badanych ciągów są różne i wynoszą od 40 do 60 lat. Dobór wytypowanych rzek jest zdaniem autorów reprezentatywny i oddaje bardzo zróżnicowane warunki formowania się odpływu rzecznego w polskiej części Karpat i pogórzy karpackich.

Na podstawie średnich miesięcznych przepływów obliczono dla każdego z wybranych przekrojów wodowskazowych dwie miary zmienności sezonowej odpływu rzecznego, zaproponowane przez C.G. Markhama (1970). Są to indeks sezonowości (*IS*) i wskaźnik pory koncentracji (*WPK*). Obie miary używane były dotąd do określania sezonowości opadów (Kożuchowski i Wibig, 1988), odpływu rzecznego w środkowej Polsce (Jokiel i Bartnik, 2001; Tomaszewski 2001), wahań zwierciadła wód podziemnych (Tomalski, 2011) oraz do zbadania sezonowej zmienności różnych wskaźników fizykochemicznych wód powierzchniowych i podziemnych (Stolarska, 2008). Założenia metodyczne, algorytmy obliczeniowe i sposoby interpretacji wyników obu wymienionych miar są dobrze opisane w literaturze (Jokiel, 2015).

Wcześniej podjęto już kiedyś próbę określenia sezonowości rzek karpackich (Soja, 2002), jednak przy użyciu nieco inaczej skonstruowanej miary tzw. wskaźnika koncentracji odpływu rzecznego, zaproponowanego przez J.E. Olivera (1980). Do jego konstrukcji, przywołany autor, wykorzystał opracowaną niegdyś przez Gibbsa i Martina miarę służącą badaniu rozmieszczenia opadów w ciągu roku (tzw. reżimu opadowego). Bazuje ona na wielkościach miesięcznych, a zatem na interwałach czasowych, które są również podstawą obliczeń dwu wymienionych wcześniej miar Markhama. Formuła obliczeniowa wskaźnika koncentracji odpływu wygląda następująco:

$$GMO = \frac{\sum (Q_{śrM})^2}{(\sum Q_{śrM})^2} \cdot 100 \tag{1}$$

gdzie:
GMO – wskaźnik koncentracji odpływu,
$Q_{śrM}$ – średni miesięczny przepływ.

Ze sposobu konstrukcji wskaźnika *GMO* wynika, że przy całkowitym braku koncentracji odpływu (jednakowy przepływ we wszystkich miesiącach roku hydrologicznego) jego wartość wynosi 8,3. Przy wystąpieniu odpływu tylko w jednym miesiącu (pełna koncentracja odpływu), wskaźnik jest równy 100.

Krzywa sumowa jest krzywą całkową z pochodną wyznaczoną dla momentu *i* oraz równą natężeniu przepływu w tym czasie – Q_i. Iloraz *dV/di* daje średni przepływ ($Q_{śr}$) w czasie *di* np. w danym roku lub jego części. Krzywą sumową odpływu można uzyskać nie tylko dla poszczególnych lat wielolecia, ale również dla roku przeciętnego. Powstaje ona wówczas na podstawie średnich z wielolecia jednoimiennych odpływów dobowych ze zlewni. Jest zatem obrazem przeciętnego przyrostu sumy odpływu w okresie od początku do końca roku hydrolo-

gicznego, a jej kształt stanowi odzwierciedlenie ustroju wodnego rzeki (Jokiel, 2016). Krzywe sumowe można również przetransformować na krzywe sumowe względne, przyjmując jako ich rzędne, wyrażone w procentach sumy rocznej, skumulowane odpływy w kolejnych dniach roku: $PV_i(kum)$. Tego rodzaju krzywe względne zostały opracowane dla wymienionych rzek karpackich i stały się przedmiotem analiz w prezentowanym artykule. Zidentyfikowano również cechy regionalnej krzywej sumowej odpływu ze zlewni karpackiej.

Na podstawie krzywych sumowych, dla każdego przekroju i każdego roku obliczono również kolejną miarę sezonowej struktury odpływu – termin połowy odpływu *TPO* (Bartnik i Jokiel, 2005; Jokiel, 2016). Uzyskuje się ją na podstawie krzywej sumowej, kumulując dobowe przepływy (lub odpływy) rzeki, aż do momentu osiągnięcia połowy ich rocznej sumy. Dzień roku hydrologicznego, w którym suma odpływu osiągnie połowę wartości rocznej ustala się według formuły:

$$TPO_j = \{i : V_i = V_{(365)j}/2\} \tag{2}$$

gdzie:
TPO_j – dzień osiągnięcia $V_i = V_{(365)j}/2$,
V_i – suma przepływu kumulowana od 1 XI,
$V_{(365)j}$ – roczna suma przepływu dla 365 dni (dla lat przestępnych – 366).

Miara ta umożliwia śledzenie w czasie zmian różnych aspektów sezonowej struktury odpływu. Stosowana wraz z innymi charakterystykami pozwala zidentyfikować hydrologiczne konsekwencje wieloletnich fluktuacji klimatu, a także gospodarczej działalności człowieka (Jokiel, 2016).

Podjęto również próbę oceny siły i kierunków współzmienności poszczególnych charakterystyk sezonowości w aspekcie czasowym i przestrzennym. W tym celu dla każdej pary wskaźników i każdej zlewni obliczono stosowne współczynniki korelacji Pearsona, a ich istotność statystyczną sprawdzano parametrycznym testem t-Studenta na poziomie $\alpha = 0{,}01$. Test ten jest zalecany w badaniach środowiskowych do sprawdzania istotności korelacji między analizowanymi zmiennymi. Ostatnim etapem było poszukiwanie ewentualnych trendów w szeregach czasowych: *IS*, *WPK*, *GMO* i *TPO*. Do sprawdzenia ich istotności statystycznej wykorzystano test F-Snedecora sprawdzający hipotezę zerową o równości wariancji w dwóch próbach niezależnych na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ (Jokiel 2015).

Wyniki analiz

Sezonowość odpływu rzecznego

Indeksy sezonowości rzek karpackich (tab. 1) są niższe od uzyskanych dla miesięcznych sum opadów atmosferycznych (Kożuchowski i Wibig, 1988) oraz wyższe od analogicznych indeksów obliczonych dla rzek wyżynnych i większości

Tabela 1. Miary sezonowości odpływu i ich zmienność wieloletnia w wybranych zlewniach karpackich

Basic information about analyzed catchments and seasonal characteristics of selected Carpathian catchments

Lp. *No.*	Rzeka *River*	Wodowskaz *Water-gauge*	Okres *Period*	*A* [km^2]	*IS* [%]	*CvIS* [%]	*WPK* [dzień/*day*]	*CvWPK* [%]
1	Biała Tarnowska	Koszyce Wielkie	1951-2010	975	24,1	56,6	177	31,1
2	Dunajec	Nowy Sącz	1956-2010	4337	28,1**	41,7	215**	16,6*
3	Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz	1961-2006	237	26,8	51,1	201	22,0
4	Poprad	Stary Sącz	1964-2010	2075	26,6	39,5*	208	17,2
5	Raba	Proszówki	1956-2010	1473	21,5	57,5	192	29,7
6	Ropa	Klęczany	1966-2006	484	22,2	49,7	177	25,7
7	San	Lesko	1956-2010	1617	23,0	56,0	179	25,3
8	Skawa	Wadowice	1960-2010	835	18,7*	66,7	184	30,2
9	Soła	Oświęcim	1958-2010	1357	21,4	71,7	197	30,4
10	Wisła	Skoczów	1956-2006	296	21,4	73,6**	188	29,1
11	Wisłoka	Mielec	1956-2010	3888	23,6	46,1	166	31,3
12	Wisłok	Tryńcza	1957-2010	3524	25,7	57,7	155*	37,4**
Średnia/*Mean*					23,6	55,7	187	27,2

A – powierzchnia zlewni (km^2) / river catchment area (km^2);
IS – indeks sezonowości (%) /seasonality index (%);
WPK – wskaźnik pory koncentracji (dzień) / time of concentration coefficient (day);
CvIS – współczynnik zmienności indeksu sezonowości (%) / variation coefficient of seasonality index (%);
CvWPK – współczynnik zmienności wskaźnika pory koncentracji (%) / variation coefficient of time of concentration (%);
** – wartość największa w całym zbiorze zlewni / highest value in the whole catchment dataset;
* – wartość najmniejsza w całym zbiorze zlewni / lowest value in the whole catchment dataset.

Opracowanie własne / Authors' own elaboration.

nizinnych (Jokiel i Stanisławczyk, 2016). Są też wyraźnie większe od *IS* obliczonych dla miesięcznych sum odpływu podziemnego (Tomaszewski, 2001). Relacje te dowodzą, że w Karpatach dynamika odpływu całkowitego jest tylko w niewielkim stopniu determinowana zmianami retencji i zasilania podziemnego, a o sezonowej strukturze odpływu decyduje głównie rozmieszczenie opadów atmosferycznych w ciągu roku.

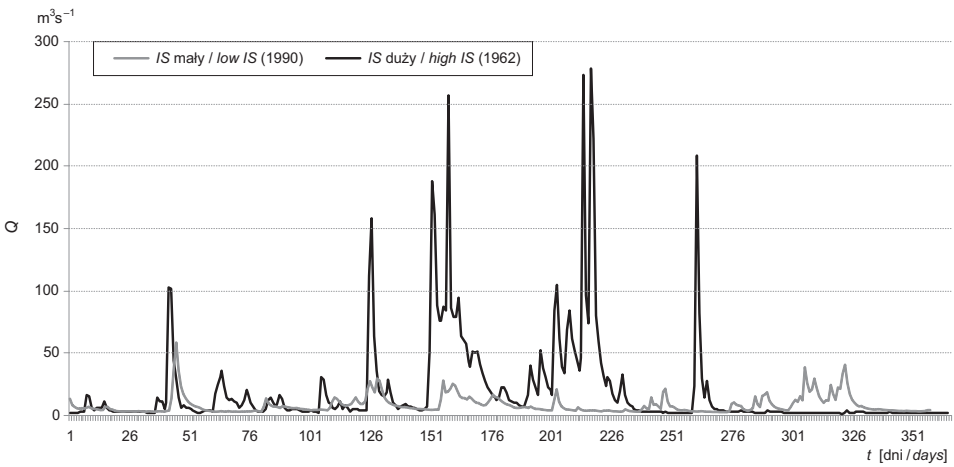
W porównaniu do innych rzek Polski rzeki karpackie charakteryzuje stosunkowo duża sezonowość odpływu. Średnia dla obliczonego zbioru przeciętnych z wielolecia *IS* wynosi 23,6%. Najniższą średnią uzyskano dla Skawy (18,7%), a najwyższą dla Dunajca (28,1%). Przedział zmienności średnich *IS* jest w Karpatach stosunkowo wąski, co jest zapewne skutkiem małego zróżnicowania warun-

ków formowania się odpływu w regionie i to zarówno stacjonarnych (np. rzeźby, retencji wód podziemnych), jak i niestacjonarnych (pogodowo-klimatycznych). Wartości *IS* wskazują, że rzeki karpackie cechują się nie tylko dość dużą zmiennością sezonową odpływu w obrębie roku, ale również wyraźnie zarysowanymi i częstymi zmianami rozmieszczenia odpływu w skali wielolecia oraz wyraźną zmiennością z roku na rok. Rozkład odpływu w obrębie roku, mierzony indeksem sezonowości, zależy w tych zlewniach głównie od zmienności i wysokości opadów półrocza ciepłego. Wpływ terminów stosunkowo stabilnych w ciągu roku wiosennych wezbrań roztopowych oraz niżówek zimowych i letnio-jesiennych jest wyraźnie mniejszy.

Niewielka „powtarzalność" sposobu rozmieszczenia odpływu w obrębie roku i w skali wielolecia sprawia, że średnie współczynniki zmienności wieloletniej indeksów sezonowości są wysokie i wynoszą od 39,5% (Poprad) do ponad 70% dla Wisły i Soły (tab. 1). W skali Polski, zmienność *IS* zidentyfikowaną w Karpatach można uznać za wysoką (Jokiel i Stanisławczyk, 2016). Wysokie i mało zróżnicowane przestrzennie *CvIS* (średni – 55,7%) wskazują, że sezonowe rozmieszczenie odpływu w poszczególnych latach jest zróżnicowane, a dynamika ta jest w skali wielolecia cechą charakterystyczną właściwie wszystkich badanych rzek karpackich. Dobrą ilustracją różnic, które liczbowo odzwierciedla indeks sezonowości są hydrogramy przepływu Skawy wykonane dla lat o małym i dużym indeksie sezonowości (ryc. 2). Mały indeks sezonowości w 1990 r. był skutkiem względnie niskich i rozłożonych w czasie wezbrań roztopowych oraz braku wysokich wezbrań opadowych w okresie letnim. Jednocześnie, na początku i na końcu roku hydrologicznego, wystąpiły wtedy liczne i niezbyt wysokie wezbrania opadowe, mieszane i roztopowe. Niżówki (zwłaszcza letnie) były wówczas krótkie i stosunkowo płytkie. Relatywnie wysokim *IS* cechował się natomiast rok 1962, w którym zanotowano bardzo wysokie wezbrania: wiosenne-roztopowe i letnie-opadowe, w pozostałej części roku zaś długie i głębokie niżówki. Dodajmy, że w seriach rocznych indeksów sezonowości poszczególnych zlewni nie wykryto żadnych statystycznie istotnych trendów.

Średnie z wielolecia wskaźniki pory koncentracji odpływu (*WPK*) w rzekach karpackich są zróżnicowane i zawierają się w przedziale niemal dwu miesięcy (tab. 1). Najwcześniejszy termin średni uzyskano dla Wisłoka (4.04), a najpóźniejszy dla Dunajca (3.06). Przeciętny termin pory koncentracji odpływu w Karpatach (5.05) wypada około 1,5 do 2,0 miesięcy później niż w rzekach niżowej części Polski, gdzie miesiącem wystąpienia *WPK* był w większości wypadków marzec (Jokiel i Bartnik, 2001). Spowodowały to nie tylko późniejsze roztopy w Karpatach niż na nizinach, ale przede wszystkim, większy udział w sumie rocznej odpływu formowanego w ciepłej połowie roku. W przypadku badanych zlewni udział ten jest zwykle większy od 50%, podczas gdy na niżu stanowi zaledwie 40%, a w niektórych przypadkach nieznacznie przekracza 30% odpływu rocznego (Stachy, 1987; Jokiel, 2004). Zaznacza się jednak pewien porządek

przestrzenny. Rzeki odwadniające zachodnią część Beskidów i Tatry mają średni wskaźnik pory koncentracji stosunkowo późny (po 5.05; *WPK*>185), a rzeki wschodniej części Beskidów – stosunkowo wczesny (przed 5 maja). W analizowanej próbie Wisłok wyróżnia się najwcześniejszą porą odpływu i jednocześnie najniższym udziałem w sumie rocznej odpływu uformowanego w ciepłej połowie roku (niewiele ponad 42%). Z przeprowadzonych analiz wynika również, że WPK nie jest skorelowany z powierzchnią zlewni, a w wieloletnich seriach tego wskaźnika nie stwierdzono statystycznie istotnych trendów.



Ryc. 2. Roczne hydrogramy przepływu Skawy w Wadowicach w latach o zróżnicowanym indeksie sezonowości (*IS*)

Annual hydrographs for discharges from the Skawa in Wadowice in years with differentiated seasonality index (*IS*) values

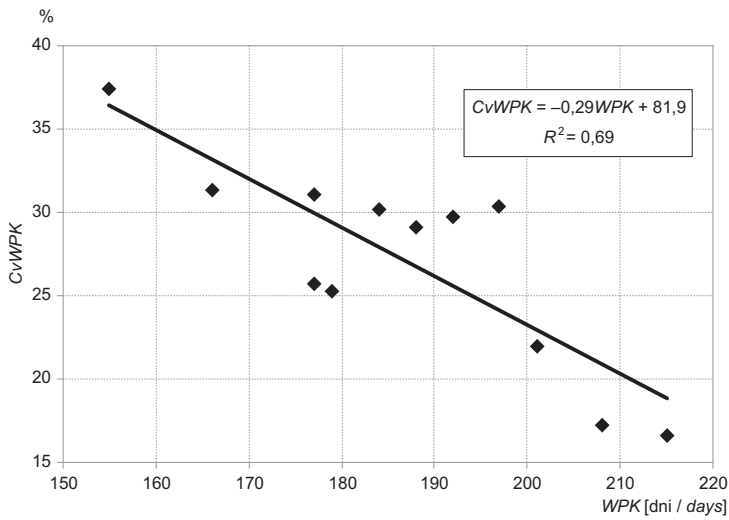
Q – natężenie przepływu / discharge.

Opracowanie własne, podobnie kolejne ryciny / Authors' own elaboration, as with the remaining figures.

Zmienność terminów pory koncentracji odpływu, mierzona *CvWPK* jest w rzekach karpackich wyraźnie mniejsza od uzyskanej dla indeksu sezonowości – *CvIS* (tab. 1). Najmniejszą zmienność pory koncentracji odpływu w wieloleciu ma Dunajec (16,6%), a największą – Wisłok (37,4%). Średni *CvWPK* jest istotnie skorelowany ze średnim *WPK* (ryc. 3). Rzeki w których wskaźnik pory koncentracji odpływu występuje stosunkowo późno (*WPK*>200 dni) charakteryzuje równocześnie mała jego zmienność w wieloleciu (<22%), a rzeki o wczesnym *WPK* – stosunkowo duża (>30%). Zróżnicowanie przestrzenne *WPK* w Karpatach jest równie wyraźne jak zróżnicowanie *CvWPK*.

Interesującym zabiegiem może być też porównanie sezonowości odpływu rzek karpackich w poszczególnych latach zmierzonej wskaźnikami Olivera

(*GMO*) i Markhama (*IS* i *WPK*). Jest to możliwe, gdyż zakresy czasowe serii wykorzystanych w pracy R. Soi (2002) oraz w opracowaniu autorów częściowo się pokrywają (szeregi analizowane przez Soję kończą się w roku 1995). Podobny jest też skład zlewni w obu próbach (dla 10 z 12 analizowanych w tej pracy zlewni Soja obliczył *GMO*). Obliczone dla tych samych lat i 12 rzek wskaźniki skorelowano z sobą uzyskując stosowne współczynniki korelacji. Brakujące wskaźniki *GMO* (dwie zlewnie: Kamienica Nawojowska i San), zostały przez autorów uzupełnione na podstawie dostępnych serii przepływów – tabela 2.



Ryc. 3. Korelacja współczynnika zmienności wskaźnika pory koncentracji (*CvWPK*) i wskaźnika pory koncentracji (*WPK*) dla rzek karpackich

Correlation between the coefficient of variation for the time of concentration indices *CvWPK* and *WPK* in Carpathian rivers

R^2 – współczynnik determinacji / determination coefficient.

Wskaźnik koncentracji odpływu Olivera *GMO* jest w przypadku wszystkich rzek istotnie i mocno skorelowany z indeksem sezonowości Markhama *IS* ($\alpha = 0{,}01$), przy czym wszystkie współczynniki korelacji są liczbowo podobne (tab. 2). Związki korelacyjne między *GMO* i *IS* aproksymowano różnymi funkcjami regresji. W przypadku wszystkich rzek karpackich, najlepsze dopasowanie i najmniejsze błędy standardowe estymacji, zapewniała funkcja eksponencjalna (ryc. 4). Współczynniki korelacji wskaźnika *GMO* ze wskaźnikiem pory koncentracji Markhama *WPK* są zaś bardzo niskie i statystycznie nieistotne. Zatem wskaźnik *GMO* zawiera bardzo podobny ładunek informacji na temat sezonowości odpływu rzecznego jak indeks *IS*, ale różny od tego jaki wnosi wskaźnik

Tabela 2. Korelacje między wybranymi miarami sezonowości odpływu rzek karpackich
Correlations between chosen characteristics of outflow seasonality in Carpathian rivers

Lp. *No.*	Rzeka *River*	Wodowskaz *Water-gauge*	Średni wskaźnik *GMO* *Oliver's index*	Współczynnik korelacji *Correlation coefficient*	
				GMO÷IS	GMO÷WPK
1	Biała Tarnowska	Koszyce W.	14,2	0,784	0,084
2	Dunajec	Nowy Sącz	11,9	0,861	0,186
3	Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz	13,0*	0,808*	0,202*
4	Poprad	Stary Sącz	11,9	0,763	0,222
5	Raba	Proszówki	13,6	0,779	0,124
6	Ropa	Klęczany	12,6	0,745	0,013
7	San	Lesko	12,1*	0,776*	–0,011*
8	Skawa	Wadowice	11,7	0,689	–0,032
9	Soła	Oświęcim	13,3	0,691	0,050
10	Wisła	Skoczów	13,1	0,752	0,025
11	Wisłoka	Mielec	13,1	0,668	–0,052
12	Wisłok	Tryńcza	12,5	0,782	0,028

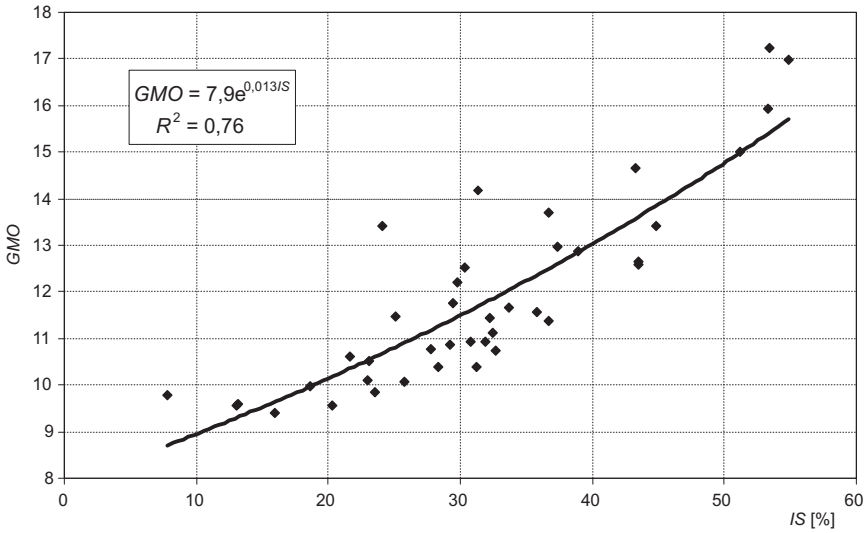
GMO – wskaźnik koncentracji odpływu / outflow concentration index;
* – na podstawie wskaźników *GMO* obliczonych przez autorów / on the basis *GMO* indexes calculated by authors; pogrubiono współczynniki istotne na poziomie 5% / coefficients significant at level 5% was bolded;
pozostałe oznaczenia jak w tab. 1 / other symbols as in Table 1.

Wskaźniki *GMO* na podstawie: Soja (2002), uzupełnione / *GMO* indexes after Soja (2002), completed.

pory koncentracji *WPK*. Uwzględniając dodatkowo sposób konstrukcji *GMO*, uważamy, że miara ta powinna nosić nazwę: „wskaźnik sezonowości odpływu" nie „wskaźnik koncentracji odpływu", pozostawiając termin „wskaźnik pory koncentracji" dla miary zdefiniowanej przez Markhama (*WPK*).

Terminy połowy odpływu i krzywe sumowe

Dla każdego przekroju wodowskazowego i każdego roku wielolecia ustalono również terminy połowy odpływu (TPO_j). Obliczone dla każdej z tych serii współczynniki autokorelacji oraz inne cechy ich rozkładów empirycznych dowodzą, że ciągi te mają w większości charakter losowy, bowiem tylko 3 współczynniki autokorelacji znajdują się na granicy statystycznej istotności (tab. 3). Średnie wieloletnie terminy połowy odpływu ze zlewni karpackich ($TPO_{śr}$) zawierają się w przedziale nieco szerszym niż miesiąc (34 dni). Najwcześniejszy termin średni uzyskano dla Wisłoka (15.04), a najpóźniejszy dla Dunajca (21.05) – zwraca tu uwagę zbieżność z prezentowanymi uprzednio ekstremami *WPK*. Stosunkowo



Ryc. 4. Przykład regresyjnego związku między rocznymi wskaźnikami *GMO* i *IS* dla Dunajca
Example of the regression relationship between annual *GMO* and *IS* index values characterising the River Dunajec

GMO – wskaźnik sezonowości Olivera / Oliver's seasonality index;
IS – indeks sezonowości Markhama / Markham's seasonality index;
R^2 – współczynnik determinacji / determination coefficient.

późne terminy przeciętne są charakterystyczne dla zlewni tatrzańskich. Jednocześnie uwidacznia się pewien porządek przestrzenny. W zlewniach pogórzy, podgórzy i wschodnich partii Beskidów średnie terminy połowy odpływu są nieco wcześniejsze (kwiecień) niż w pozostałych zlewniach. Zarysowuje się nawet pewna umowna granica rozdzielająca obszary o stosunkowo późnych i wczesnych $TPO_{śr}$ – niemal pokrywa się ona ze strefą oddzielającą w Karpatach obszary o pluwialno-niwalnym reżimie odpływu od obszarów z reżimem niwalno-pluwialnym i niwalnym (Dynowska, 1994).

Przedstawiony wcześniej porządek przestrzenny jest nieco słabiej widoczny jeśli przeanalizujemy rozmieszczenie i daty najwcześniejszych terminów połowy odpływu (TPO_{wcz}). Najpóźniejsze TPO_{wcz} występują także w Tatrach, przy czym opóźnienie w stosunku do pozostałych wynosi tylko około 20 dni. Zlewnie o bardzo wczesnym TPO_{wcz} znajdują się nie tylko na wschodzie regionu, ale również na północy (wpływ stosunkowo wczesnych roztopów na terenach podgórzy i pogórzy). Zupełnie inny jest układ najpóźniejszych terminów połowy odpływu: najwcześniejszy TPO_{poz} wystąpił na początku lipca w zlewni Ropy, a najpóźniejszy – w trzeciej dekadzie sierpnia w zlewni Raby. Rozpiętość między najwcze-

Tabela 3. Podstawowe miary statystyczne wieloletnich serii terminów połowy odpływu w zlewniach karpackich

Basic statistical measures of multiannual mean half-outflow term in outflow series

Lp. *No.*	Rzeka *River*	Wodowskaz *Water-gauge*	$TPO_{śr}$	TPO_{wcz}	TPO_{poz}	*CvTPO*	*Ra*
1	Biała Tarnowska	Koszyce W.	179	110	272	22,7**	–0,26
2	Dunajec	Nowy Sącz	202**	163**	266	12,8*	–0,08
3	Kamienica Nawojowska	Nowy Sącz	193	135	266	18,0	–0,10
4	Poprad	Stary Sącz	196	153	253	13,9	–0,09
5	Raba	Proszówki	186	113	296**	22,3	–0,16
6	Ropa	Klęczany	179	120	244*	17,1	–0,19
7	San	Lesko	179	93	252	15,5	–0,15
8	Skawa	Wadowice	181	129	283	20,1	0,04
9	Soła	Oświęcim	189	116	277	22,3	–0,05
10	Wisła	Skoczów	187	134	260	19,2	0,01
11	Wisłoka	Mielec	170	103	261	20,0	–0,29
12	Wisłok	Tryńcza	166*	84*	265	22,2	–0,36
Średnia/*Mean*			184			18,9	–0,10

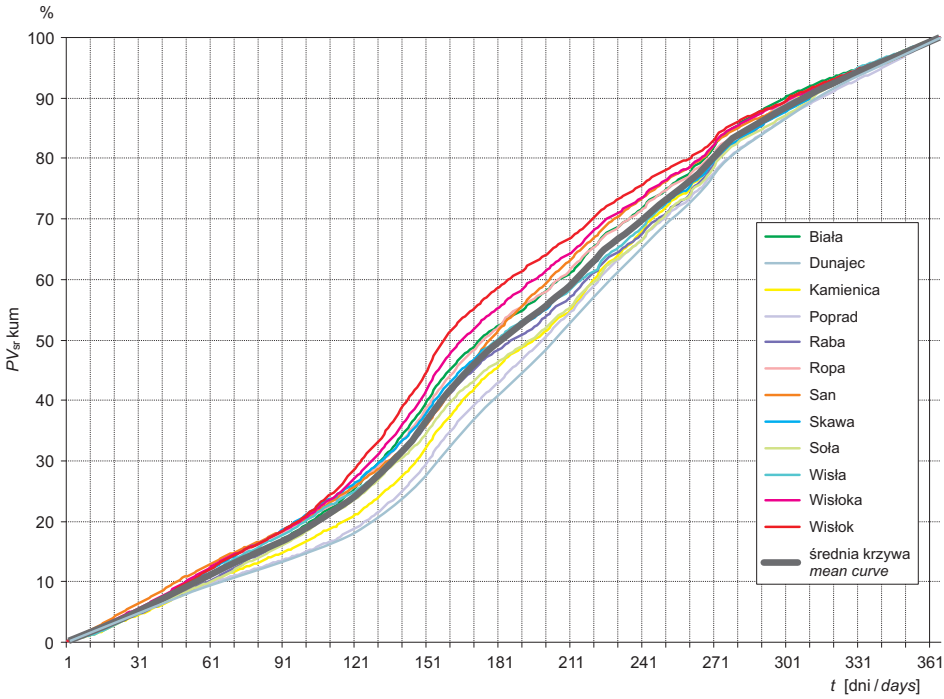
$TPO_{śr}$ – średni termin połowy odpływu (dzień) / mean half-outflow term (day);
TPO_{wcz} – najwcześniejszy termin połowy odpływu (dzień) / earliest half-outflow term (day);
TPO_{poz} – najpóźniejszy termin połowy odpływu (dzień) / latest half-outflow term (day);
CvTPO – współczynnik zmienności terminu połowy odpływu (%) / half-outflow term coefficient of variation (%);
Ra – współczynnik autokorelacji terminu połowy odpływu (pogrubiono istotne na 5%) / half-outflow term autocorrelation coefficient (with significant at the 5% level were bolded);
** – wartość największa w całym zbiorze zlewni / highest value in the whole catchment dataset;
* – wartość najmniejsza w całym zbiorze zlewni / lowest value in the whole catchment dataset.

Opracowanie własne / Authors' own elaboration.

śniejszym (Wisłok; 84 dzień; 22.01) i najpóźniejszym terminem połowy odpływu (Raba; 296 dzień; 21.08) wynosi w Karpatach 212 dni (prawie 7 miesięcy). Jest to wartość bliska odnotowanej w odniesieniu do rzek środkowej Polski – 206 dni (Jokiel, 2016).

Analizując względne krzywe sumowe odpływu poszczególnych zlewni można dostrzec pewne prawidłowości pozwalające zidentyfikować charakterystyczny dla rzeki typ ustroju wodnego (ryc. 5). Na podstawie 12 krzywych uzyskanych dla poszczególnych zlewni ustalono również krzywą przeciętną dla całej grupy zlewni (krzywą regionalną). Powstaje ona po uśrednieniu wartości $PV_{śr}$kum z poszczególnych zlewni w kolejnych dniach roku (Jokiel, 2016).

Z kształtu i parametrów względnej regionalnej krzywej sumowej wynika, że w Karpatach do pierwszych dni maja odpływa około 50% średnich rocznych zasobów wodnych (ryc. 5). W tym samym terminie w zlewniach, w których prze-



Ryc. 5. Średnie, względne krzywe sumowe odpływu z wybranych zlewni karpackich
Relative mean mass diagram curves for outflow in selected Carpathian basins

$PV_{śr}$kum – średni w wieloleciu skumulowany procent odpływu rocznego / $PV_{śr}$kum –multiannual mean cumulative percentage of annual outflow

waża zasilanie śnieżne (reżim niwalno-pluwialny lub niwalny) udział odpływu w sumie rocznej zbliża się do 60% (np. Wisłok), a w zlewniach rzek o przewadze zasilania opadowego (reżim pluwialno-niwalny) dopiero osiąga 40% (np. Dunajec). Krzywe sumowe rzek z przewagą śnieżnego zasilania znajdują się „powyżej" krzywej regionalnej, zaś krzywe rzek o zasilaniu opadowo-śnieżnym – „poniżej". Obie grupy rzek mają jednak wspólną cechę świadczącą o ich złożonym ustroju wodnym: ich względne krzywe sumowe mają dwa punkty przegięcia. Pierwszy pojawia się między 110 (18.02) i 140 (20.03) dniem roku hydrologicznego (początek okresu wezbrań roztopowych); najwcześniejszy termin występuje na wschodzie regionu, najpóźniejszy – w Tatrach. Drugi punkt przegięcia „leży" na przełomie lipca i sierpnia i związany jest oczywiście z letnimi wezbraniami opadowymi. Jest on najsłabiej zarysowany w przypadku Dunajca i Popradu – wezbrania roztopowe i opadowe w tych zlewniach następują często bezpośrednio po sobie. Przez pierwsze dwa miesiące roku hydrologicznego oraz od około 270 dnia roku (koniec lipca) aż do końca roku, kształty wszystkich względnych krzywych

sumowych rzek karpackich są prawie identyczne (niemal równoległe), a dobowe przyrosty odpływu są małe i także bardzo podobne.

Współczynniki zmienności wieloletniej terminów połowy odpływu *CvTPO* są bardzo mało zróżnicowane i wynoszą od niecałych 13% (Poprad) do prawie 23% (Biała Tarnowska) – tabela 3. Średnia zmienność jest nawet mniejsza od obliczonej dla grupy rzek nizinnych środkowej Polski: 18,9% wobec 20,7% (Jokiel, 2016). Świadczy to o dużej stabilności w wieloleciu sezonowego rozmieszczenia odpływu w Karpatach. Pojawia się jednak pewna prawidłowość przestrzenna. Najmniejsza zmienność w wieloleciu występuje w zlewniach odwadniających masyw tatrzański, największa zaś – w zlewniach zamkniętych przekrojami położonymi na Pogórzu i w Kotlinie Sandomierskiej. Na dużą zmienność TPO_j w wieloleciu wpływa zapewne mała retencyjność tych obszarów oraz zróżnicowanie warunków kształtowania się odpływu (góry, pogórza). Prawidłowość tę potwierdza istotny statystycznie związek korelacyjny współczynników zmienności terminów połowy odpływu i współczynników zmienności przepływów rocznych. Im bardziej zróżnicowane w wieloleciu są średnie roczne odpływy, tym większa zmienność wieloletnia terminów połowy odpływu (współczynnik kierunkowy równania regresji liniowej jest dodatni i wynosi 0,17).

Trzy cieki karpackie charakteryzuje istotna statystycznie autokorelacja w wieloletnich szeregach TPO_j (tab. 3). We wszystkich przypadkach jest ona ujemna, co oznacza, że po roku z późnym TPO_j następuje rok z relatywnie wczesnym terminem połowy odpływu i odwrotnie. Taka sekwencja została już wcześniej zidentyfikowana i opisana dla rzek z obszaru środkowej Polski i uzasadniono ją drenażem wód z głębokich poziomów wodonośnych (Jokiel, 2016). Zlewnie cieków karpackich, w których stwierdzono istotną statystycznie autokorelację, zamknięte są przekrojami wodowskazowymi położonymi na Pogórzu lub w Kotlinie Sandomierskiej (Biała Tarnowska, Wisłoka i Wisłok).

W świetle wyników przeprowadzonej przez autorów statystycznej analizy istotności trendów liniowych TPO_j (test F-Snedecora; =0,05), wieloletnia dynamika terminów połowy odpływu ma charakter losowy (trendy nieistotne). Nie stwierdzono zatem istotnych zmian rocznej struktury odpływu – ani tych spowodowanych ociepleniem, ani wywołanych działalnością człowieka. Relatywnie największe zmiany TPO_j zidentyfikowano w zlewni Ropy, w której w 1994 r. oddano do użytku duży zbiornik zaporowy Klimkówka (Wiejaczka, 2011). Po wybudowaniu zbiornika, średnie przepływy miesięczne w niemal całym półroczu chłodnym obniżyły się w stosunku do okresu sprzed jego uruchomienia (najbardziej w marcu – o 58%). Zwiększyły się natomiast przepływy letnie (głównie sierpnia i września). W wyniku działania zbiornika, po 1994 r. obserwuje się w Ropie coraz późniejszy termin połowy odpływu. Trend jest jednak statystycznie nieistotny.

Wnioski

Przedstawione powyżej badania i analizy upoważniają do sformułowania kilku wniosków o charakterze metodycznym i merytorycznym:

- średnie indeksy sezonowości odpływu ze zlewni karpackich są tylko nieco mniejsze od indeksów sezonowości obliczonych dla sum opadów atmosferycznych;
- indeksy sezonowości odpływu są w Karpatach stosunkowo mało zróżnicowane przestrzennie, ale bardzo zmienne w czasie;
- średnia pora koncentracji odpływu (*WPK*) ze zlewni karpackich jest zróżnicowana przestrzennie i występuje między 4 kwietnia i 3 czerwca, przy czym w rzekach odwadniających zachodnią część Beskidów i Tatry pora koncentracji odpływu jest stosunkowo późna (po 5.05), a w rzekach w części wschodniej Beskidów – stosunkowo wczesna (przed 5.05);
- zmienność wieloletnia wskaźnika pory koncentracji jest w Karpatach dwukrotnie mniejsza od zmienności indeksu sezonowości (przeciętnie: 25,2% wobec 55,7%);
- w wieloletnich seriach *IS* i *WPK* nie wykryto statystycznie istotnych trendów;
- wskaźnik sezonowości odpływu *GMO* (Olivera) odzwierciadla podobne aspekty sezonowości jak indeks sezonowości IS (Markhama);
- uwzględniając poprzedni wniosek postulujemy, by w przypadku *GMO* używać terminu: „wskaźnik sezonowości odpływu", nie zaś „wskaźnik koncentracji odpływu". Tę drugą nazwę: „wskaźnik pory koncentracji" lepiej zarezerwować dla miary zdefiniowanej przez Markhama (*WPK*);
- średnie wieloletnie terminy połowy odpływu ($TPO_{śr}$) obliczone dla zlewni karpackich zawierają się między 15.04 a 21.05;
- niskie $TPO_{śr}$ stwierdzono w rzekach o reżimie niwalno-pluwialnym lub niwalnym dobrze wykształconym; wysokie – w rzekach o reżimie pluwialno-niwalnym;
- zmienność wieloletnia terminów połowy odpływu jest w Karpatach mało zróżnicowana przestrzennie, przy czym najmniejsza jest charakterystyczna dla rzek tatrzańskich;
- statystyczne analizy wieloletnich szeregów wszystkich badanych miar sezonowości dowodzą, że na obszarze karpackim sezonowa struktura odpływu w ciągu roku jest tymczasem względnie trwała w wieloleciu (brak istotnych trendów), a fluktuacje i zmiany z roku na rok mają charakter losowy; wniosek ten koresponduje z przedstawionymi wcześniej wynikami analiz R. Soi (2002);
- średnie, względne krzywe sumowe odpływu ze zlewni karpackich mają dwa punkty przegięcia potwierdzające śnieżno-deszczowy lub deszczowo-śnieżny ustrój wodny; obliczona względna krzywa regionalna dobrze oddaje przestrzenne prawidłowości w sezonowym rozmieszczeniu odpływu w Karpatach.

Piśmiennictwo / References

Bartnik A., Jokiel P., 2005, *Niektóre problemy zmian i zmienności rocznego hydrogramu przepływu rzeki na podstawie Pilicy w Przedborzu*, Wiadomości IMGW, 2, s. 5-27.

Dynowska I., 1994, *Reżim odpływu rzecznego. Mapa 1:2 500 000,* [plansza 32.3-1 w:] *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*, Główny Geodeta Kraju, IGiPZ PAN, Warszawa.

Jokiel P., 2004, *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku,* Uniwersytet Łódzki, Łódź.

Jokiel P. (red.), 2015, *Metody statystyczne w analizach hydrologicznych środkowej Polski*, UŁ, Łódź.

Jokiel P., 2016, *Sezonowa struktura odpływu rzecznego w środkowej Polsce i jej zmiany w wieloleciu w świetle krzywych sumowych i terminów połowy odpływu,* Przegląd Geograficzny, 88, 1, s. 53-74.

Jokiel P., Bartnik A., 2001, *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w środkowej Polsce w wieloleciu 1951-1998*, Wiadomości IMGW, 24, 2, s. 3-17.

Jokiel P., Stanisławczyk B., 2016, *Zmiany i wieloletnia zmienność sezonowości przepływu wybranych rzek Polski,* Prace Geograficzne UJ, 144, s. 10-33.

Kożuchowski K., Wibig J., 1988, *Kontynentalizm pluwialny w Polsce*, Acta Geographica Lodzensia, 55, ŁTN, Łódź.

Markham C.G, 1970, *Seasonality of precipitation in The United States*, Annals of the Association of American Geographers, 60, 3, s. 593-597.

Oliver J.E., 1980, *Monthly precipitation distribution: a comparative index*, Professional Geographer, 32, 3, s. 300-309.

Soja R., 2002, *Hydrologiczne aspekty antropopresji w polskich Karpatach,* Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 186, Warszawa.

Stachy J. (red.), 1987, *Atlas Hydrologiczny Polski,* Wydawnictwo Geologiczne, Warszawa.

Stolarska M., 2008, *Sezonowe zmiany zasobów i podstawowych właściwości fizykochemicznych wód w małej zlewni nizinnej*, Acta Geographica Lodzensia, 94, ŁTN, Łódź.

Tomalski P., 2011, *Dynamika zasobów płytkich wód podziemnych w województwie łódzkim i na obszarach sąsiednich*, Acta Geographica Lodzensia, 97, ŁTN, Łódź.

Tomaszewski E., 2001, *Sezonowe zmiany odpływu podziemnego w Polsce w latach 1971-1990.*, Acta Geographica Lodzensia, 79, ŁTN, Łódź.

Wiejaczka Ł., 2011, *Wpływ zbiornika Klimkówka na abiotyczne elementy środowiska przyrodniczego w dolinie Ropy*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 229, Warszawa.

Wrzesiński D., 2013, *Entropia odpływu rzek w Polsce,* Studia i Prace z Geografii i Geologii, 33, UAM, Poznań.

Wrzesiński D., 2016, *Zmiany reżimu odpływu rzecznego w Polsce*, [w:] L. Hejduk, E. Kaznowska (red.), *Hydrologia zlewni zurbanizowanych*, Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN, KGW PAN, Warszawa, s. 63-76.

[Wpłynęło: lipiec; poprawiono: październik 2016 r.]

PAWEŁ JOKIEL, PRZEMYSŁAW TOMALSKI

SEASONALITY OF OUTFLOW IN SELECTED CARPATHIAN CATCHMENTS

This article details an analysis of seasonality of outflow carried out for 12 Carpathian catchments. The latter were selected in such a way as to fully represent various conditions of outflow formation in the Carpathian Mountains, i.e. the region of Poland in which hydrological processes are most dynamic. Daily series of discharges for the years 1951-2010 provided the basis for the research, albeit with the series lengths used in analyses of particular rivers varying in length from 40 to 60 years. In the case of each water-gauge section selected, calculations were made for the seasonality index (IS), time of concentration coefficient (WPK), outflow concentration index (GMO) and half-outflow term index (TPO). Multiannual variability and mutual correlation coefficients for the above parameters were also calculated, with these characteristics together describing various aspects to the seasonality of river outflow.

The results of the research conducted show that values for the mean seasonality indexes characterising the outflow in Carpathian catchments are slightly lower than those calculated for amounts of precipitation. In addition, their spatial differentiation is relatively weak, while their variability over time is distinctly high. The mean time of concentration coefficient (WPK) for the Carpathian catchments does differ markedly from place to place, occurring between 4th April and 3rd June. However, in the cases of the rivers draining the western part of the Beskid Mountains and Tatras, the outflow concentration occurs relatively late (after 5th May), while it is relatively early (before 5th May) in the cases of the rivers in the eastern part of the Beskids. The long-term variability of WPK in the Carpathian Mountains is less than half as great as that characterising the seasonality index (25.2% to 55.7% on average), though no significant trends could be noted for long-term series of those characteristics. Timing related to Oliver's concentration coefficient (GMO) reveals aspects of seasonality similar to those presented by Markham's seasonality index (IS). Due to this fact it would be more appropriate to name it an *"outflow seasonality index"* rather than an *"outflow concentration index"*.

Mean multiannual half-outflow terms ($TPO_{śr}$) in the Carpathian catchments are strongly diversified and appear between 15th April and 21st May. Low $TPO_{śr}$ was noted in rivers of a nival-pluvial and nival well-shaped regime. Low $TPO_{śr}$ was found with the pluvial-nival regime. The spatial differentiation to the multiannual variability of $TPO_{śr}$in the Carpathian Mountains is limited. It is most limited in the case of rivers in the Tatra Mountains.

Statistical analyses of multiannual series for all the seasonality parameters examined show that, in the Carpathian area, the seasonal structure to the outflow is relatively stable over the long term (given a lack of significant trends), with year-to-year fluctuations and changes being random in nature. The relative mean mass diagram curve for Carpathian catchments has two points of inflection confirming the nival-pluvial or pluvial-nival regimes. The regional curve offers a very effective presentation of the seasonal distribution of outflow in the Carpathian Mountains.

http://rcin.org.pl