

Wpłynęło 06.09.2016 r.  
Zrecenzowano 25.10.2016 r.  
Zaakceptowano 05.12.2016 r.

A – koncepcja  
B – zestawienie danych  
C – analizy statystyczne  
D – interpretacja wyników  
E – przygotowanie maszynopisu  
F – przegląd literatury

# DYNAMIKA WYSTĘPOWANIA NIŻÓWEK W RZEKACH GÓRSKICH I WYŻYNNYCH NA PRZYKŁADZIE WISŁOKI I GÓRNEGO WIEPRZA CZ. 2. ZMIENNOŚĆ WIELOLETNIA

Katarzyna BARAN-GURGUL<sup>1)</sup> ABCDEF, Krzysztof RACZYŃSKI<sup>2)</sup> ABCDEF

<sup>1)</sup> Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Środowiska, Katedra Hydrauliki i Hydrologii

<sup>2)</sup> Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Hydrologii

## Streszczenie

Celem niniejszej pracy jest ocena częstości występowania niżówek w rzekach położonych w otoczeniu środowiska przyrodniczego o różnym charakterze – w rzece górskiej, tj. Wisłocy i jej dopływach, i w rzece wyżynnej, tj. górnym Wieprzu wraz z dopływami. Analizę dynamiki pojawiania się przepływów niżówkowych wykonano na podstawie zmienności podstawowych charakterystyk niżówek (tj. czasu trwania i objętości niżówki) w wieloletniu 1983–2013. W rozpatrywanym okresie zaobserwowano więcej niżówek w rzekach górskich niż wyżynnych, lecz były one krótsze. W rzekach wyżynnych stwierdzono więcej lat „beźniżówkowych”. Badanie stacjonarności rocznych szeregów charakterystyk niżówek wykonano z użyciem testu Shapiro–Wilka, Ljunga–Boxa i Manna–Kendalla z poprawką na autokorelację. Około połowy analizowanych szeregów nie spełniało warunku normalności. Do badania trendu wykorzystano test Manna–Kendalla. Test ten wykazał trend malejący badanych ciągów w prawie wszystkich przekrojach w rzekach wyżynnych i tylko w jednym – w rzekach górskich. W około połowie ciągów stwierdzono istotną, potwierdzoną testem Ljunga–Boxa, autokorelację rzędu pierwszego – zarówno w szeregach czasów trwania, jak i objętości niżówek. Stwierdzono, że w badanych ciągach występują dwa typy funkcji autokorelacji. Pierwszy typ funkcji, występujący głównie w rzekach wyżynnych, cechuje się dłuższą pamięcią, okresy podobne trwają około 10–11 lat. W pozostałych przypadkach *ACF* wskazują na pamięć krótszą i odnoszą się do rzek o większej dynamice przepływów.

**Słowa kluczowe:** autokorelacja, czas trwania niżówki, deficyt niżówki, metoda Pit Under Threshold, niżówka, test Manna–Kendalla

**Do cytowania For citation:** Baran-Gurgul K., Raczyński K. 2017. Dynamika występowania niżówek w rzekach górskich i wyżynnych na przykładzie Wisłoki i górnego Wieprza. Cz. 2. Zmienność wieloletnia. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 17. Z. 1 (57) s. 5–17.

Cz. 1. Sezonowość ukazała się w: Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 16. Z. 4 (56) s. 17–31.

## WSTĘP

Ocena sezonowej i wieloletniej zmienności przepływu rzeczno (w tym zmienności występowania i charakterystyk niżówki) jest jednym z ważniejszych zagadnień współczesnej hydrologii. Może być ona wykorzystywana zarówno w ocenach zasobności wodnej zlewni, jak i badaniach wpływu fluktuacji i zmian klimatu na te zasoby oraz w analizach mających na celu prowadzenie racjonalnej gospodarki wodnej [JOKIEL, STANISŁAWCZYK 2016].

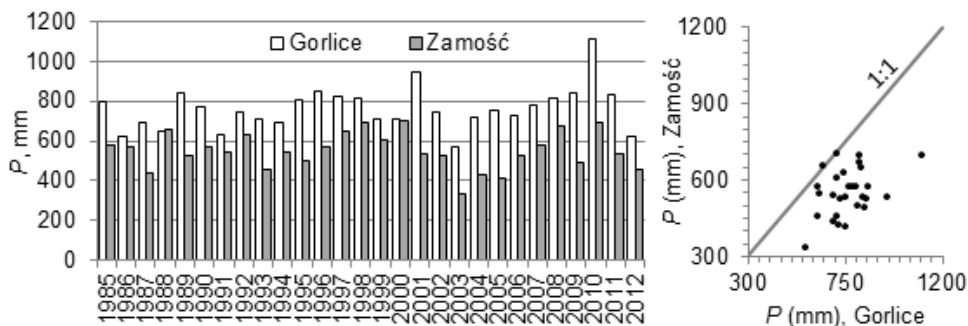
Niżówka jest zjawiskiem, w czasie którego przepływy są niższe od przyjętego przepływu granicznego. Najczęściej stosowanymi charakterystykami niżówek są czas trwania i objętość niżówki. W niniejszym artykule sumaryczny czas  $T_R$  trwania niżówek w danym roku jest wyrażony w dobach. W celu porównania objętości niżówek w poszczególnych przekrojach wodowskazowych sumaryczne objętości  $V_R$  niżówek w danym roku zostały przedstawione w wysokości warstwy odpływu w mm (odniesiono sumaryczne objętości niżówek w danym roku do powierzchni zlewni zamkniętej przekrojem wodowskazowym).

W pierwszej części pracy dokonano oceny występowania niżówek i ich charakterystyk w ciągu roku [BARAN-GURGUL, RACZYŃSKI 2016]. Celem drugiej części jest ocena dynamiki wieloletniej niżówek w rzekach mających zlewnie o różnych cechach fizyczno-geologicznych – w rzece górskiej (Wisłoka i dopływy) i w rzece wyżynnej (górny Wieprz i dopływy). Cel ten zostanie osiągnięty poprzez analizę zmienności podstawowych charakterystyk niżówek (liczebności, czasu trwania i objętości niżówki) w wieloleciu 1983–2013.

## OBSZAR I METODY BADAŃ

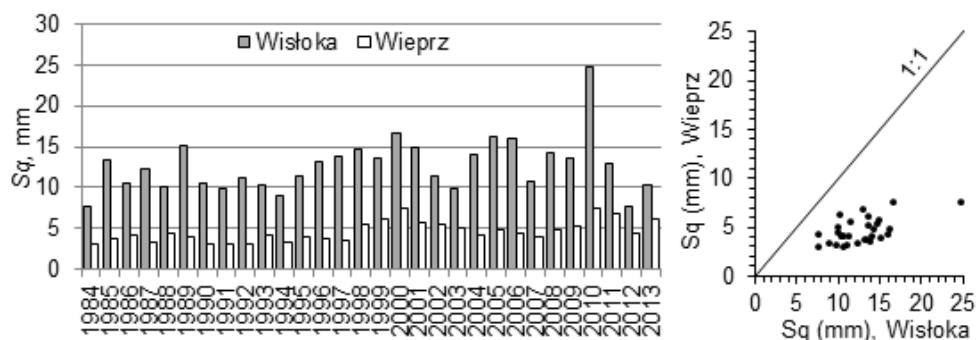
Podstawę analizy stanowiły dobowe przepływy z okresu 30 lat (10 958 dobowych przepływów), tj. od 01.11.1983 r. do 31.10.2013 r., udostępnionych przez IMGW. Wybrano 7 przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych w rzekach górskich tj. Wisłoce i jej dopływach (po wodowskaz Łabuzie) i 6 przekrojów – w rzece wyżynnej, tj. górnym Wieprzu z dopływami (do Krasnegostawu). Niżówki określono metodą PUT (ang. Peak Under Threshold) dla stałego w wieloleciu przepływu granicznego  $Q_{70\%}$  odczytanego z krzywych czasu przewyższenia przepływu. Dodatkowo przyjęto dwa założenia: że pojedyncza niżówka musi trwać co najmniej 7 dni i jeśli czas pomiędzy następującymi po sobie epizodami jest nie dłuższy niż 3 dni, niżówki uznaje się za zależne i łączy w jedną [RACZYŃSKI 2015]. Szczegółowe opisy zlewni Wisłoki i Wieprza (i ich charakterystyki) zamieszczone są w pracy BARAN-GURGUL i RACZYŃSKIEGO [2016].

Mimo że sumy roczne opadów w zlewni górskiej są większe (rys. 1), to nie obserwuje się w tym obszarze ich długofalowego oddziaływania na zasoby wodne zlewni, ponieważ transformowane są one bezpośrednio w odpływ powierzchniowy (rys. 2).



Rys. 1. Suma roczna opadów atmosferycznych  $P$  w Gorlicach (zlewnia Wisłoki) i Zamościu (zlewnia górnego Wieprza); źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Total precipitation  $P$  in Gorlice (Wisłoka catchment) and Zamość (Upper Wieprz catchment); source: own elaboration



Rys. 2. Średni odpływ jednostkowy  $S_q$  w zlewniach Wisłoki i górnego Wieprza; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Mean runoff  $S_q$  in Wisłoka and Wieprz catchments; source: own elaboration

W niniejszej pracy, w ocenie zmienności wieloletniej szeregów charakterystyk niszówek, wykorzystano następujące testy statystyczne: test normalności rozkładu zmiennej losowej Shapiro–Wilka, test autokorelacji Ljunga–Boxa i nieparametryczny test Manna–Kendalla na trend.

#### TEST ŁĄCZNEJ ISTOTNOŚCI WSPÓŁCZYNNIKÓW AUTOKORELACJI LJUNGA-BOXA

Test Ljunga–Boxa weryfikuje hipotezę  $H_0$  o nieistotności kolejnych współczynników autokorelacji w danym szeregu z użyciem statystyki [LJUNG, BOX 1978]:

$$\chi_{BL}^2 = N(N+2) \sum_{k=1}^m \frac{r_k^2}{N-k} \quad (1)$$

gdzie:

$r_k$  = estymator współczynnika autokorelacji rzędu  $k$ ;

$N$  = liczebność analizowanej próby.

Statystyka  $\chi_{BL}^2$  ma asymptotyczny rozkład  $\chi^2$  z  $k$  stopniami swobody. Jeśli warunek  $\chi_{KW}^2 \leq \chi_{kryt}^2$  jest spełniony, to nie ma podstaw do odrzucenia  $H_0$ . W przeciwnym przypadku autokorelacja jest istotna.

### NIEPARAMETRYCZNY TEST MANNA–KENDALLA NA TREND

Niech  $X_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, n$  będą zmiennymi niezależnymi o jednakowych rozkładach. Nieparametryczny test Manna–Kendalla weryfikuje hipotezę  $H_0$  o braku trendu szeregu czasowego  $X_i$  (a dokładnie, że zmienne  $X_i$  są niezależne i mają jednakowe rozkłady, przyjmując hipotezę alternatywną  $H_1$  o wystąpieniu monotonicznego w czasie trendu wartości oczekiwanej tego szeregu) według statystyki zdefiniowanej jako [HAMED, RAO 1998; RUTKOWSKA, PTAK 2012; WĘGLARCZYK 2010; WMO 2009]:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sgn}(X_j - X_i) \quad (2)$$

gdzie:

$$\text{sgn}(X_j - X_i) = \begin{cases} 1 & \text{gdy } (X_j - X_i) > 0 \\ 0 & \text{gdy } (X_j - X_i) = 0 \\ -1 & \text{gdy } (X_j - X_i) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

Statystyka  $S$  ma rozkład normalny ze średnią 0 i wariancją opisaną następującą zależnością:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} \quad (4)$$

Powyższa równość zachodzi, gdy nie ma powtarzających się elementów szeregu. Jeśli elementów powtarzających się jest dużo, wzór należy uzupełnić o poprawkę:

$$\text{var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18} - \frac{\sum_{i=1}^k t_i \cdot i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (5)$$

gdzie  $t_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, k$  jest liczbą grup o  $k$  powtarzających się elementach.

Jeżeli  $n \geq 10$  [WĘGLARCZYK 2010], to znormalizowana statystyka testowa:

$$U = \frac{S - \text{sgn}(S)}{\sqrt{\text{var}(S)}} \quad (6)$$

podlega rozkładowi normalnemu  $N(0;1)$ . Hipoteza  $H_0$  o braku trendu jest odrzuca na poziomie istotności  $\alpha$ , jeżeli  $|u| > u_{1-\alpha/2}$  (gdzie  $u_{1-\alpha/2}$  jest kwantylem rzędu  $1-\alpha/2$  w rozkładzie  $N(0; 1)$ ) lub wartość  $p_v$  statystyki testowej jest mniejsza od założonego poziomu istotności  $\alpha$ . Jeżeli dodatkowo statystyka  $U$  jest ujemna (dodatnia), to trend badanego szeregu czasowego jest malejący (rosnący).

Podstawowym założeniem stosowania niniejszego testu jest niezależność i losowość danych, czyli brak autokorelacji w szeregu danych. Jeżeli założenie to nie jest spełnione, wówczas wariancja  $\text{var}(S)$  jest niedoszacowana. Bayley i Hammerslay [HAMED, RAO 1998] wprowadzili korekcję wariancji (liczoną tylko dla danych z istotną częściową autokorelacją):

$$\text{var}^*(S) = \frac{n}{n_s^*} \text{var}(S) \quad (7)$$

gdzie: efektywną liczbę obserwacji  $n_s^*$  obliczyć można jako [HAMED, RAO 1998]:

$$\frac{n}{n_s^*} = 1 + \frac{2}{n(n-1)(n-2)} \sum_{i=1}^{n-1} (n-i)(n-i-1)(n-i-2)\rho_s(i) \quad (8)$$

gdzie:

$n$  = rzeczywista liczba obserwacji;

$\rho_s(i)$  = funkcja autokorelacji rang obserwacji.

Wartości  $p_v$  statystyk testowych wszystkich zastosowanych testów liczone były za pomocą odpowiednich pakietów w programie R. W całej pracy przyjęto poziom istotności równy 5%.

## WYNIKI BADAŃ

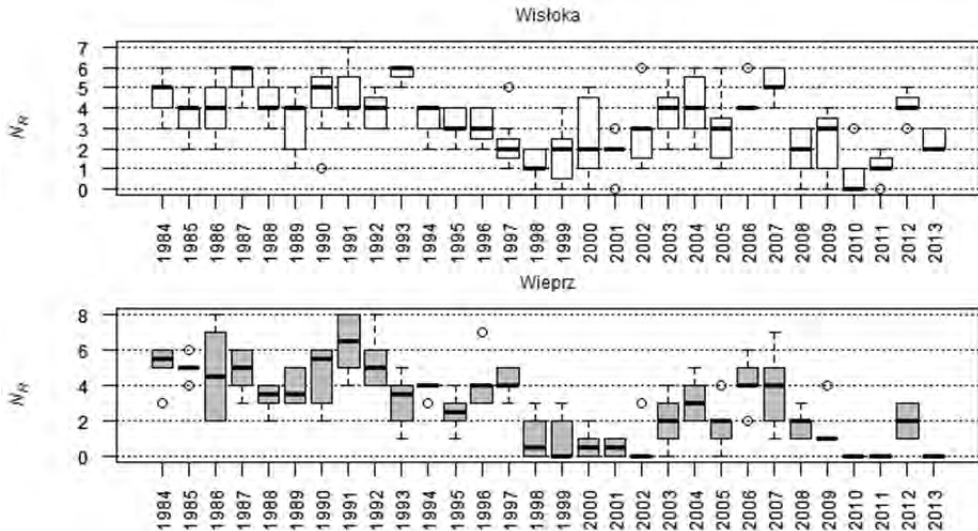
W latach 1983–2013 wystąpiło od 90 do 109 niżówek w przekrojach zlokalizowanych na Wisłoce i jej dopływach oraz od 74 do 93 – w górnym Wieprzu i jego dopływach. W trzech przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych w Wisłoce z dopływami niżówkę obserwowano co roku (rys. 3), podczas gdy w pozostałych przekrojach stwierdzono lata bez niżówki. W Wieprzu z dopływami było więcej lat „beźniżówkowych”. W przekrojach Krasnystaw na Wieprzu i Zakłodzie na Porze niżówkę zaobserwowano w 22 latach (z 30 badanych). Najwięcej niżówek rozpo-

czynano się w latach hydrologicznych: 1984, 1987, 1990, 1991, 1993, 2006 i 2007, zaś w latach: 1998–2001, 2010–2011 i 2013 nie stwierdzono ich pojawiania się (rys. 4). W rzece górskiej, tj. Wisłoce z dopływami, zaobserwowano więcej niżówek, lecz były one krótsze. Najdłuższa niżówka w rozpatrywanych rzekach górskich trwała 218 dni (1997 r., Klęczany na Ropie), zaś w wyżynnych aż 297 dni (1984 r., przekrój Wirkowice na Wieprzu).



Rys. 3. Liczba  $N_N$  lat z niżówką w Wisłoce i jej dopływach oraz górnym Wieprzu z dopływami; źródło: wyniki własne

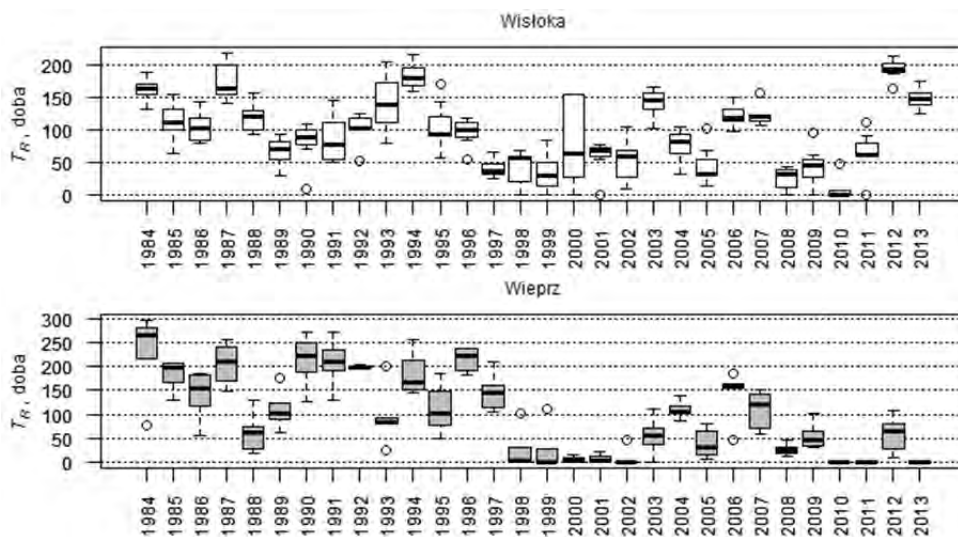
Fig. 3. Number of years  $N_N$  with low flows in the Wisłoka River and its tributaries and Upper Wieprz River with tributaries; source: own study



Rys. 4. Rozkład liczby początków niżówek  $N_R$  w wieloletnim okresie w Wisłoce z dopływami i górnym Wieprzu z dopływami; pudełko: zakres zmienności ograniczony 1. i 3. kwartylem, wewnątrz mediana, wąsy: zakres nieodstających w obrębie 1 odchylenia międzykwartylowego, ° wartości odstające do 1,5 odchylenia międzykwartylowego; źródło: wyniki własne

Fig. 4. Distribution of number of low flows beginnings  $N_R$  in multiannual period in Wisłoka and Wieprz rivers with their tributaries; box: range between 1. and 3. quartile, median inside, whiskers: range limited by 1 quartile deviation, ° outliers under 1.5 quartile deviation; source: own study

Mediana liczby dni niżówkowych obliczona na podstawie danych z przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na Wisłoce i jej dopływach tylko w 2012 r. przekroczyła pół roku, podczas gdy w Wieprzu z dopływami mediana ta jest większa niż 183 dni w latach: 1984–1985, 1987 i w 1996 (rys. 5). W dolinie górnego Wieprza wystąpiły również lata (2010, 2011 i 2013), w których w żadnym przekroju nie zaobserwowano niżówki. Był to, podobnie jak okres 1998–2002, okres wysokich stanów wód podziemnych, spowodowanych wysokimi (dla tego obszaru) opadami. Zlewnie wyżynne reagują bezpośrednio na występowanie wyższych opadów, co skutkuje zwiększaniem zasobów wodnych obszaru ze względu na większe niż w zlewniach górskich możliwości retencyjne, zwłaszcza zbiorników wód podziemnych, i mniejszą dynamikę zlewni.

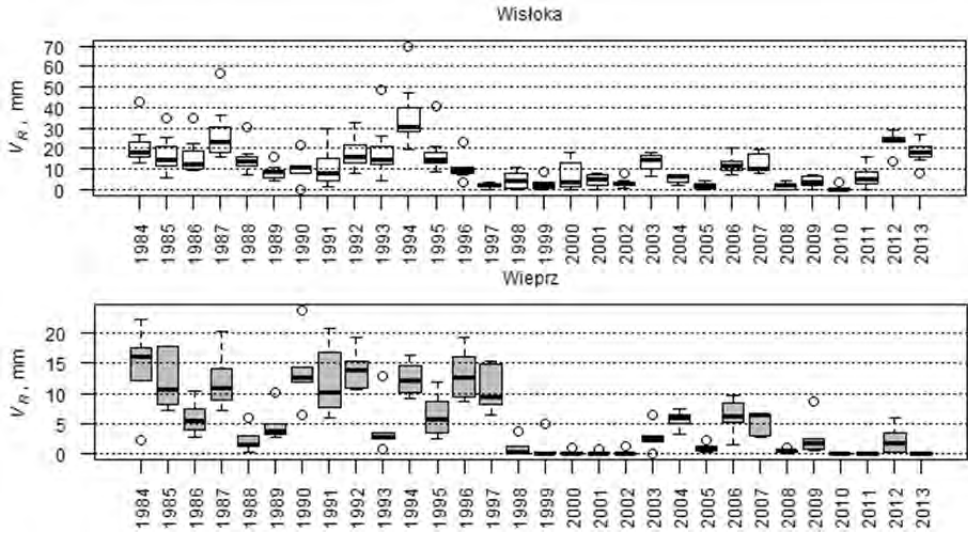


Rys. 5. Rozkład liczby dni z niżówką  $T_R$  w wieloletniu w Wisłoce z dopływami i górnym Wieprzu z dopływami; źródło: wyniki własne

Fig. 5. Distribution of number of days with low flow  $T_R$  in multiannual period in Wisłoka and Wieprz rivers and their tributaries; source: own study

W poszczególnych latach rozpatrywanego wieloletnia sumy objętości niżówek były większe w badanych rzekach górskich niż wyżynnych (rys. 6). Największa objętość niżówki w Wisłoce została zaobserwowana w 1994 r. (69,9 mm), w Wieprzu objętość maksymalnej niżówki nie przekroczyła 24 mm (23,8 mm w roku 1990). Sumy objętości niżówek zmieniały się w wieloletniu, zarówno w rzekach górskich, jak i wyżynnych, były one większe przed 1997 rokiem.

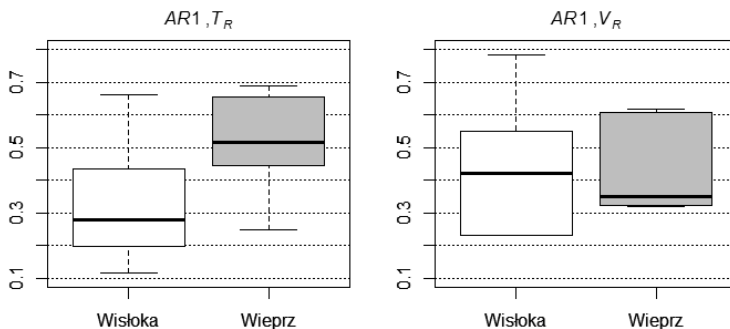
W 7 szeregach (na 13) stwierdzono istotną autokorelację rzędu pierwszego AR1 (współczynniki te były większe od 0,358) zarówno w szeregach czasów trwania,



Rys. 6. Rozkład sumy objętości niżówek  $V_R$  w wieloletnim okresie w Wisłoce z dopływami i górnym Wieprzu z dopływami; źródło: wyniki własne

Fig. 6. Distribution of volume of low flow episodes  $V_R$  in multiannual period in Wisłoka and Wieprz rivers and their tributaries; source: own study

jak i objętości niżówek. Istotność kolejnych współczynników autokorelacji potwierdzono testem Ljung–Boxa (tab. 1). Mediana  $AR1$  czasu trwania niżówki jest większa w Wieprzu i dopływach ( $Me_{AR1} = 0,51$ ) niż w Wisłoce i dopływach ( $Me_{AR1} = 0,28$ ). Autokorelacje szeregów objętości niżówek mniej się różnią, ale mediana  $AR1$  jest większa dla rzek górskich (rys. 7).



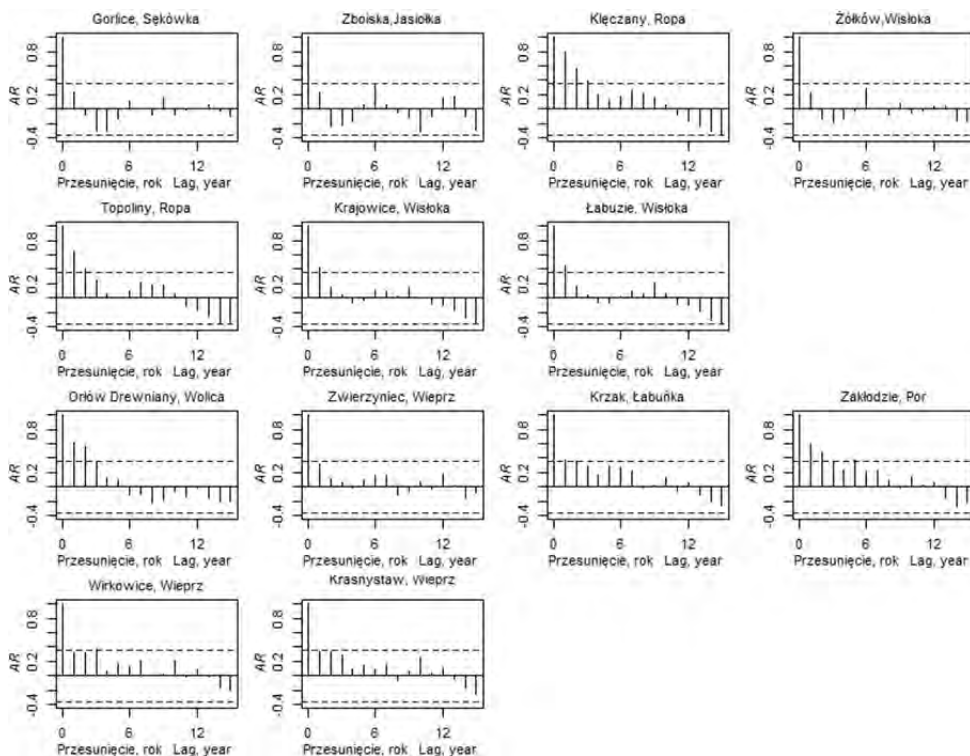
Rys. 7. Wartość współczynnika autokorelacji  $AR1$  szeregów czasu trwania  $T_R$  i objętości  $V_R$  niżówek w Wisłoce z dopływami i górnym Wieprzu z dopływami; źródło: wyniki własne

Fig. 7. Autocorrelation coefficient value  $AR1$  of duration time  $T_R$  and volume  $V_R$  of low flows in Wisłoka nad Wieprz rivers and their tributaries; source: own study



W celu zbadania wieloletniej „pamięci” czasu trwania i objętości niżówek przeanalizowano funkcję autokorelacji rocznych szeregów tych charakterystyk. Funkcja ta przybiera różny kształt dla różnych przekrojów wodowskazowych. We wszystkich analizowanych szeregach obserwuje się zarówno dodatnie, jak i ujemne współczynniki autokorelacji (rys. 8). Można wyróżnić dwa typy funkcji autokorelacji. Pierwszy typ funkcji obliczony dla Klęczan, Topolin, Krasnegostawu, Wirkowic, Krzaku i Zakłodzia cechuje się dłuższą pamięcią, okresy podobne trwają ok. 10–11 lat. W większości są to zlewnie wyżynne. Typy funkcji dla pozostałych wodowskazów wskazują na krótszą pamięć i odnoszą się do rzek o większej dynamice przepływu.

Aby dokonać wyboru testu na badanie wystąpienia trendu, przeprowadzono najpierw badanie normalności szeregów rocznych sum czasów trwania i rocznych sum objętości niżówek z zastosowaniem testu Shapiro–Wilka. Wartości  $p_v$  statystyki testowej tego testu zebrano w tabeli 1. Spośród badanych 13 szeregów



Rys. 8. Funkcja autokorelacji dla rocznych szeregów objętości niżówek obliczonych dla poszczególnych przekrojów wodowskazowych na rzekach wyżynnych i górskich; źródło: wyniki własne

Fig. 8. Autocorrelation function for annual series of low flow volumes for gauging stations located in upland and mountain rivers; source: own study

**Tabela 1.** Wartości współczynników  $AR1$  (autokorelacji 1. rzędu) i wyniki zastosowanych testów statystycznych dla wszystkich rozpatrywanych przekrojów wodowskazowych; pogrubione wartości:  $p_v < 5\%$  oraz  $AR1 > 0,358$

**Table 1.** Values of coefficients  $AR1$  (first lag autocorrelation) and parameters of used statistical tests, for all gauging section; bold:  $p_v < 5\%$  oraz  $AR1 > 0.358$

Przekrój wodowskazowy, rzeka Gauging station, river		Test Shapiro– Wilka	Test Ljunga– Boxa	$AR1$	Test Manna–Kendalla Mann–Kendall test		
		Shapiro– Wilk test	Ljung–Box test		$p_v$	trend	
<b>Czas trwania niżówki Low flow duration</b>							
Rzeki górskie Mountain rivers	Żółków, Wisłoka	0,1049	0,1567	0,2462	0,5356	brak trendu	no trend
	Krajowice, Wisłoka	0,7419	0,1073	0,2799	0,0582	brak trendu	no trend
	Łabuzie, Wisłoka	0,3882	0,0823	0,3020	0,0717	brak trendu	no trend
	Kłęczany, Ropa	<b>0,0052</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,6620</b>	<b>0,0377</b>	malejący	decreasing
	Topoliny, Ropa	0,0688	<b>0,0010</b>	<b>0,5696</b>	0,0695	brak trendu	no trend
	Gorlice, Sękówka	0,9252	0,3968	0,1473	0,4362	brak trendu	no trend
	Zboiska, Jasiołka	0,2953	0,5009	0,1170	0,2900	brak trendu	no trend
Rzeki wyrzynne Upland rivers	Krasnystaw, Wieprz	<b>0,0099</b>	<b>0,0030</b>	<b>0,5165</b>	<b>0,0122</b>	malejący	decreasing
	Orłów Drewniany, Wolica	0,1204	<b>0,0002</b>	<b>0,6550</b>	<b>0,0307</b>	malejący	decreasing
	Wirkowice, Wieprz	<b>0,0093</b>	<b>0,0031</b>	<b>0,5137</b>	<b>0,0086</b>	malejący	decreasing
	Krzak, Łabuńka	<b>0,0102</b>	<b>0,0107</b>	<b>0,4436</b>	<b>0,0071</b>	malejący	decreasing
	Zakłodzie, Por	<b>0,0024</b>	<b>0,0001</b>	<b>0,6904</b>	<b>0,0119</b>	malejący	decreasing
	Zwierzyniec, Wieprz	<b>0,0008</b>	0,1513	0,2494	<b>0,0035</b>	malejący	decreasing
<b>Objętość niżówki Low flow deficit</b>							
Rzeki górskie Mountain rivers	Żółków, Wisłoka	0,0500	0,1832	0,2313	0,5071	brak trendu	no trend
	Krajowice, Wisłoka	0,0765	<b>0,0155</b>	<b>0,4209</b>	0,0507	brak trendu	no trend
	Łabuzie, Wisłoka	0,0432	<b>0,0109</b>	<b>0,4422</b>	0,0696	brak trendu	no trend
	Kłęczany, Ropa	<b>0,0007</b>	<b>0,0000</b>	<b>0,7845</b>	<b>0,0252</b>	malejący	decreasing
	Topoliny, Ropa	<b>0,0024</b>	<b>0,0002</b>	<b>0,6583</b>	0,0509	brak trendu	no trend
	Gorlice, Sękówka	0,0619	0,1827	0,2316	0,4362	brak trendu	no trend
	Zboiska, Jasiołka	0,1009	0,1772	0,2345	0,3945	brak trendu	no trend
Rzeki wyrzynne Upland rivers	Krasnystaw, Wieprz	<b>0,0012</b>	0,0549	0,3336	<b>0,0006</b>	malejący	decreasing
	Orłów Drewniany, Wolica	<b>0,0008</b>	<b>0,0004</b>	<b>0,6175</b>	0,0510	brak trendu	no trend
	Wirkowice, Wieprz	<b>0,0018</b>	0,0673	0,3180	<b>0,0000</b>	malejący	decreasing
	Krzak, Łabuńka	<b>0,0002</b>	<b>0,0339</b>	<b>0,3686</b>	<b>0,0018</b>	malejący	decreasing
	Zakłodzie, Por	<b>0,0028</b>	<b>0,0005</b>	<b>0,6064</b>	<b>0,0076</b>	malejący	decreasing
	Zwierzyniec, Wieprz	<b>0,0003</b>	0,0640	0,3219	<b>0,0020</b>	malejący	decreasing

Źródło: opracowanie własne. Source: own study.

czasów trwania 6 z nich spełnia warunek normalności na poziomie istotności  $\alpha = 5\%$  (Klęczany na Ropie, reszta przekrojów na górnym Wieprzu i dopływach). W przypadku szeregów objętości niżówek  $p_v$  testu Shapiro–Wilka jest mniejsze od założonego poziomu 5% w 8 szeregach (2 z nich na rzece górskiej).

Większość badanych szeregów nie spełnia warunku normalności, wobec czego wystąpienie trendów w szeregach badano jednym z testów nieparametrycznych. Wybrano szeroko stosowany test Manna–Kendalla z poprawką na autokorelację. Stwierdzono trend malejący na poziomie istotności 5% w 7 szeregach czasów trwania i 7 szeregach objętości niżówki. Trend zaobserwowano we wszystkich przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych na rzekach wyżynnych (tab. 1). Jedynie w przypadku wodowskazu Orłów Drewniany na Wolicy wartość  $p_v$  testu Manna–Kendalla przekroczyła 5% (wyniosła 5,1%). Spośród rzek górskich trend badanych charakterystyk niżówek stwierdzono jedynie w Klęczanach na Ropie. Zlewnie te należą do pierwszego z typów funkcji autokorelacji.

## PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W badanym okresie 1984–2013 wystąpiło więcej niżówek w rzekach górskich, jednak były one krótsze niż te w wyżynnych. Dodatkowo na wyżynie zaobserwowano więcej lat „beźniżówkowych”. Spośród 13 ciągów 6 (czasu trwania) i 8 (objętości) nie spełnia warunku normalności (na podstawie testu Shapiro–Wilka) i dlatego do badania trendu w szeregach czasowych posłużono się jednym z testów nieparametrycznych.

Badanie testem Manna–Kendalla wykazało trend malejący obu badanych rocznych charakterystyk niżówek w 6 z 7 ciągów w rzekach wyżynnych (górny Wieprz i dopływy) oraz w przekroju Klęczany na Wisłoce (rzeka górská). Zasoby wodne wyżyny w ostatnich latach były zwiększone (lata mokre), co bezpośrednio przełożyło się na mniejszą liczbę niżówek.

Rzeki górskie cechują się większą stacjonarnością niżówek w czasie (5 z 7 badanych szeregów w rzekach górskich cechuje stacjonarność, w pozostałych przypadkach istnieją podstawy do odrzucenia hipotezy o stacjonarności badanych szeregów rocznych charakterystyk niżówek). W 7 szeregach (na 13) stwierdzono istotną, potwierdzoną testem Ljunga–Boxa, autokorelację rzędu pierwszego – zarówno w szeregach czasów trwania, jak i objętości niżówek.

Analiza autokorelacji wykazała, że w badanych ciągach są dwa typy funkcji autokorelacji. Pierwszy typ funkcji, obliczony głównie dla rzek wyżynnych, cechuje się długą pamięcią, okresy podobne trwają około 10–11 lat. W pozostałych przypadkach funkcja autokorelacji wskazuje na krótką pamięć i odnosi się do rzek o większej dynamice.

Z przeprowadzonej analizy wynika, że charakterystyki niżówek różnią się w zależności od cech fizyczno-geologicznych zlewni. W rzekach górskich wystę-

puje bardziej równomierny rozkład czasowy niżówek, ale jednocześnie ich objętość jest mniejsza niż w badanych rzekach wyżynnych. W przypadku zlewni wyżynnych, w warunkach dużych możliwości retencji podziemnej, wyraźnie odznacza się wpływ czynnika opadowego. Przepływy niżówkowe w rzekach wyżynnych występują w ciągach 10–11 letnich, po czym występują lata mokre z brakiem niżówek. W latach suchych (o znaczącej liczbie dni z niżówką) obserwowane niżówki są dłuższe. W badanych rzekach górskich nie obserwuje się tak wyraźnych cykli lat suchych i mokrych. Opady na terenie takich zlewni są w dużej części przekształcane w spływ powierzchniowy, a wysoka wydajność głębokich źródeł przyczynia się do większej stabilności odpływu. Brak występowania trendów w szeregach charakterystyk niżówek można tłumaczyć warunkami zasilania, które pozostają w dużej części niezienne, a transformacje obszarowe wewnątrz zlewni są wolniejsze niż na pozostałych obszarach.

Praca została wykonana w ramach zadań badawczych: „Niżówki wybranych rzek Lubelszczyzny”, realizowanego na Wydziale Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie oraz „Wpływ czynników antropogennych na ilościowe i jakościowe właściwości procesów hydrologicznych w zlewni”, zadanie 3: „Analiza własności niżówek w obszarze karpackim zlewni Górnej Wisły” realizowanego na Wydziale Inżynierii Środowiska Politechniki Krakowskiej.

## BIBLIOGRAFIA

- BARAN-GURGUL K., RACZYŃSKI K. 2016. Dynamika występowania niżówek w rzekach górskich i wyżynnych na przykładzie Wisłoki i górnego Wieprza. Cz. 1. Sezonowość [Dynamics of low flows in mountain land upland rivers on example of Wisłoka and upper Wieprz rivers. 1. Seasonality]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 16. Z. 4(56) s. 17–31.
- HAMED K. H., RAO A. R. 1998. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*. Vol. 204. Iss. 1–4 s. 182–196.
- JOKIEL P., STANISŁAWCZYK B. 2016. Zmiany i wieloletnia zmienność sezonowości przepływu wybranych rzek Polski [Long-term changes and variability in the seasonality of river discharge for selected Polish rivers]. *Prace Geograficzne*. Z. 144 s. 9–33.
- LJUNG G., BOX G. 1978. On a measure of lack of fit in time series models. *Biometrika*. Vol. 65. Iss. 2 s. 297–303.
- RACZYŃSKI K. 2015. Metody separacji niżówek na zdarzenia niezależne na przykładzie rzek Polski Wschodniej [Methods of separating low flows into independent episodes applied to rivers of Eastern Poland]. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*. T. 15. Z. 4 (52) s. 39–56.
- RUTKOWSKA A., PTAK M. 2012. On certain stationarity tests for hydrologic series. *Studia Geotechnica et Mechanica*. Vol. 34. No. 1 s. 51–63.
- WĘGLARCZYK S. 2010. *Statystyka w inżynierii środowiska* [Statistics in environmental engineering]. Kraków. PKrak. ISBN 9788372425393 ss. 375.
- WMO 2009. *Guide to hydrological practices*. 6th ed. WMO. No 168. Vol. II. ISBN 978-92-63-10168-6 ss. 300.

Katarzyna BARAN-GURGUL, Krzysztof RACZYŃSKI

**DYNAMICS OF LOW FLOWS IN MOUNTAIN AND UPLAND RIVERS  
ON EXAMPLE OF WISŁOKA AND UPPER WIEPRZ RIVERS.  
P. 2. MULTI-ANNUAL VARIABILITY**

**Key words:** *autocorrelation, low flow, low flow deficit, low flow duration, Mann–Kendall test, Pit Under Threshold*

**S u m m a r y**

The main goal of this study is to assess the long-term dynamics of low flows occurrence in catchments located in different environment conditions: mountain river: Wisłoka and its tributaries and upland river: Upper Wieprz with tributaries. Analysis of low flows occurrence was based on variability of basic low flow characteristics (duration time and volume of low flow episode) in period 1983–2013. In studied period, more low flows occurred in mountain rivers, however the time of duration was shorter than in upland area. On uplands, more years without low flow episodes were observed. For stationary of annual series analysis Shapiro–Wilk, Ljung–Box and Mann–Kendall tests with autocorrelation correction were used. About half of studied series does not complete the terms of normal distribution. For this reason, trend studies were performed by using nonparametric tests. Mann–Kendal test showed descending trends in almost all gauging sections located in upland region and only in one located in mountain rivers. In half of series there was a significant, confirmed by Ljung–Box test, first rank autocorrelation – in both duration time and volume series. It was found that in tested series, there were two types of autocorrelation function. First type of function, that occurred mainly in upland area, was characterized by long-term memory, where similar periods last for about 10–11 years. In other cases, *ACF* indicated a short memory of episodes and occurred in catchments with higher flow dynamics.

**Adres do korespondencji:** mgr inż. Krzysztof Raczyński, Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej, Zakład Hydrologii, al. Kraśnicka 2cd, 20-718 Lublin; tel. +48 81 537-68-74, e-mail: Krzysztof.Raczynski@poczta.umcs.lublin.pl