

Sezony hydrologiczne w rzekach środkowej Polski

Hydrological seasons in the rivers of central Poland

PAWEŁ JOKIEL, PRZEMYSŁAW TOMALSKI

Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Łódzki
90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88; joker@geo.uni.lodz.pl; tomalski@uni.lodz.pl

Zarys treści. W artykule opisano próbę wydzielenia sezonów hydrologicznych w rzece według procedury zaproponowanej przez autorów. Do badań wytypowano 11 przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na obszarze środkowej Polski. Na podstawie ciągów dobowych przepływów pochodzących z wielolecia 1951-2002, dla każdego przekroju utworzono trzy nowe, 365-elementowe, szeregi czasowe: średnich wieloletnich przepływów w danym dniu (Qsr_d), współczynników zmienności jednoimiennych przepływów dobowych (Cv_d) oraz współczynników autokorelacji w szeregach tych przepływów uzyskanych dla przesunięcia $k=1$ (Ra_d). Opierając się na danych standaryzowanych, przeprowadzono procedurę grupowania hierarchicznego w trójwymiarowej przestrzeni zmiennych: Qsr_d , Cv_d , Ra_d . Zastosowano tu metodę Warda. Do określenia najlepszej liczby klas wybrano kryterium GWZ. W badanej grupie 11 rzek, liczba wydzielonych w ten sposób „typów dni” wynosiła od 4 do 8. Odpowiednio długie jednoimienne sekwencje typów dni utworzyły sezony hydrologiczne. Na średnim hydrogramie przepływu każdej z rzek zidentyfikowano w ten sposób od 7 do 18 sezonów hydrologicznych. Różnią się one wysokością przepływu, jego zmiennością oraz wielkością autokorelacji.

Słowa kluczowe: sezon hydrologiczny, środkowa Polska, grupowanie hierarchiczne.

Założenia i uwagi wstępne

Znajomość sezonowej zmienności odpływu rzecznoego jest jedną z najbardziej podstawowych i najważniejszych informacji hydrologicznych. Jest ona bowiem nie tylko cechą pozwalającą na identyfikację lub ocenę reżimu rzeki, ale też jedną z ważniejszych przesłanek prowadzenia prawidłowej gospodarki wodnej w odniesieniu do zasobów wodnych rzeki i jej zlewni. Czasowy reżim odpływu rzecznoego jest, z oczywistych powodów, funkcją sezonowego zróżnicowania wielkości i rodzaju opadów oraz parowania terenowego. Jednak obok czynników zewnętrznych (klimatycznych) ważną rolę odgrywa również cały kompleks zjawisk i procesów

związanych z rzeką i jej zlewnią. Zlewnia i system rzeczny tworzą bowiem rodzaj „filtrów”, w których impulsy zewnętrzne są istotnie transformowane i przybierają formę oraz rozkład czasowy bardzo różny od występującego na wejściu do systemu. W ten sposób działają np. różne rodzaje retencji, które zwiększają, między innymi, bezwładność systemu i spowalniają jego reakcję na impuls opadowy.

Obserwowany w Polsce sezonowy rozkład odpływu rzeczny został ukształtowany wskutek długotrwałego „współdziałania” stacjonarnych i niestacjonarnych warunków fizycznogeograficznych, a w szczególności klimatu, morfologii, budowy geologicznej i pokrycia terenu, a współcześnie jest coraz bardziej znacząco modelowany przez procesy i zjawiska bezpośrednio i pośrednio wynikające z gospodarczej działalności człowieka (Bartnik i Jokieli, 1997).

Coroczna, mniej lub bardziej wyraźnie zarysowana, powtarzalność zjawisk hydrologicznych w Polsce jest oczywistą konsekwencją pór roku, a co za tym idzie skutkiem powtarzających się, sezonowych zmian opadu atmosferycznego i sposobów jego redystrybucji. Wiosną spodziewamy się roztopów i wysokich przepływów w rzekach. Latem pojawiają się w tych rzekach niżówki, przerywane niekiedy wezbraniem opadowymi. Jesienią, niżówki wskutek niskich opadów lub ich braku stają się zwykle jeszcze głębsze, a zimą powoli się wypełniają, by ponownie przejść w wezbrania wywołane kolejnymi, wiosennymi roztopami lub opadami.

Powtarzalność tego rytmu w kolejnych latach jest jednak względna. Zimy mogą być bowiem mroźne i długie albo łagodne i krótkie, śnieżne lub prawie bezśnieżne. Już tylko tych 6 ocen tej pory roku daje możliwość utworzenia 12 „różnych zim” o cechach warunkujących bardzo zróżnicowany przebieg zjawisk hydrologicznych i to nie tylko w okresie zimy, ale również wiosną, a nawet latem. Także w innych porach roku zaznacza się duża zmienność wieloletnia cech i charakterystyk klimatycznych. W efekcie, pory genetycznie różnych wezbrań i niżówek przemieszczają się co roku dość swobodnie po osi czasu, przy czym wraz z położeniem na tej osi zmieniają się również ich parametry, a niekiedy i geneza. Jeśli nałożymy na to, dostrzegane już niekiedy hydrologiczne skutki trwałych bądź nietrwałych zmian klimatycznych i efekty antropopresji zauważymy, że pojęcie „sezonowość odpływu” w coraz większym stopniu jest umowne i wymaga uściślenia, a nawet okresowego redefiniowania.

Postęp w zakresie metodycznym i w odniesieniu do jakości i dostępności danych hydrometrycznych stwarza sytuację, w której zestaw miar i procedur, które mogą być zastosowane do opisanie sezonowości odpływu rzeczny jest wciąż wzbogacany o nowe propozycje. Dość tu wymienić próby wykorzystania miar Ch.G. Markhama (1970) – pory koncentracji odpływu i indeksu sezonowości (np. Jokieli, Bartnik, 2001; Tomaszewski, 2001), a także propozycje zdefiniowania i zastosowania miar stabilności reżimu i entropii odpływu (Wrzesiński, 2013) oraz terminu połowy odpływu (Jokieli, 2009). Przegląd metod pozwalających na wieloaspektową analizę i ocenę sezonowej struktury i zmienności odpływu rzeczny zawiera praca A. Bartnika i P. Jokiela (2005).

W 1977 roku ukazała się praca, w której podjęto bardzo interesującą próbę identyfikacji tzw. okresów hydrologicznych, czyli ciągów dni w roku wykazujących względne podobieństwo co do wielkości, dyspersji i charakteru stanu wody w rzece (Rotnicka, 1977). W późniejszych latach badania te zostały rozszerzone obszarowo i merytorycznie, a sama metoda dopracowana od strony teoretycznej (Rotnicka, 1988). Metoda ta jest jednak dość skomplikowana, a przyjęcie pentady za elementarny wycinek czasu poddawany analizie może być dyskusyjne. Mimo to próba identyfikacji okresów (sezonów) hydrologicznych w obrębie rocznego hydrogramu przepływu rzeki (wcześniej stanu wody), w aspekcie definiowania i monitorowania jej reżimu, wydaje się interesująca i szkoda, że w późniejszych latach problematyka ta została nieco zaniedbana – choć od czasu do czasu pojawiały się w tym zakresie ciekawe próby, np. A. Bartzaka (2007).

Traktując odpływ rzeczny jako stacjonarny proces stochastyczny, jego charakterystyki można obliczać na dwa sposoby: wtedy, gdy dysponujemy wieloma realizacjami oraz gdy zakładamy istnienie tylko jednej realizacji. W przedstawionej dalej propozycji przyjęto pierwszy wariant obliczając założone charakterystyki hydrogramu „po realizacjach”, tu: dla jednoimiennych dni wielolecia. Jeśli rzeczywiście proces odpływu jest stacjonarny, to średnie i wariancje nie zależą od czasu, a autokorelacja jest wyłącznie funkcją przesunięcia (Węglarczyk, 2010). Jeżeli mamy do czynienia z zależnością od czasu, wówczas może ona przybierać formę trendu, rytmu lub zmiany skokowej (zerwanie jednorodności serii).

Materiał hydrometryczny i metoda identyfikacji sezonów

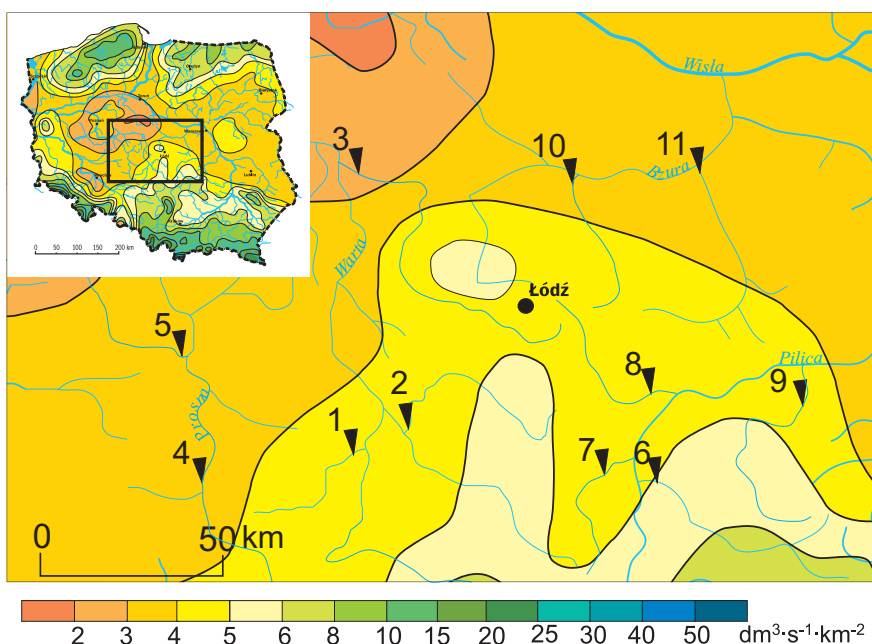
Zaproponowana tu metoda zmierza do wyróżnienia, w obrębie rocznego hydrogramu przepływu rzeki, tzw. sezonów hydrologicznych. Podstawą jest identyfikacja, na podstawie rocznych hydrogramów pochodzących z kilkudziesięciu lat, typów dni wykazujących z jednej strony możliwie duże podobieństwo wielkości przepływu, jego zmienności w wieloleciu oraz autokorelacji obliczanej dla przesunięcia równego 365 dni (1 rok), a z drugiej możliwie duże zróżnicowanie tych cech pomiędzy wyróżnionymi typami. Za pomocą metody grupowania hierarchicznego Warda i po przeprowadzeniu weryfikacji liczby typów przy użyciu stosownej procedury, określa się najbardziej wiarygodną liczbę takich typów dni w obrębie rocznego hydrogramu danej rzeki. W kolejnym etapie, serie lub pojedyncze dni określonego typu łączy się w sekwencje (grupy), względnie jednorodne i ciągłe w czasie (na hydrogramie). W efekcie, uzyskujemy dla rzeki określoną liczbę sezonów, których dni charakteryzuje względne podobieństwo pod względem wielkości przepływu, jego zmienności i bezwładności w skali roku. Warto zauważyć, że w takim ujęciu niektóre sezony hydrologiczne o danych cechach rozkładu przepływu dobowego mogą występować w roku kilka razy, a inne tylko raz.

Zmienne, które służą do tej analizy są łatwo interpretowalne fizycznie: średni wieloletni przepływ w danym dniu ($Q\bar{s}r_d$) jest miarą chwilowej zasobności wodnej zlewni w danym podokresie (dniu), a współczynnik zmienności (Cv_d) odzwierciedla występujący w nim poziom wieloletniej zmienności (albo stabilności) zasobów zlewni. Współczynnik autokorelacji (Ra_d) bezpośrednio informuje zaś o losowości zjawiska odpływu w danym podokresie, a przy nieco innym spojrzeniu – o istnieniu lub nie w danym szeregu wieloletniej inercji lub okresowości. Jeśli współczynnik ten jest istotny, odpływy danego dnia nie spełniają postulatu losowości, a zatem są determinowane przez dodatkowy czynnik. Jeśli zaś nie jest istotny, to potwierdzenie uzyskuje sugestia S. Węglarczyka (1998), udokumentowana też w pracy A. Bartnika i P. Jokiel (2005), że rozkłady prawdopodobieństwa „różnoimiennych” przepływów dobowych są różne, z konsekwencją w postaci tezy, że zbiór przepływów dobowych jest populacją zmieniającą się cyklicznie, z okresem równym 1 rok (Yule i Kendall, 1966). W opinii autorów, czynnikiem sprzyjającym istnieniu statystycznie istotnej inercji w szeregach jednoimiennych dni mogą być również relatywnie duże chwilowe współczynniki zasilania podziemnego, determinowane przez stany retencji podziemnej w danych podokresach. Cechują się one bowiem dużą bezwładnością i co ważne mogą mieć rytmy dłuższe niż jeden rok. Należy też pamiętać, że istotne współczynniki autokorelacji przepływów dobowych, przy przesunięciu $k=1$ rok (365 dni), mogą być skutkiem genetycznie lub statystycznie uwarunkowanych trendów (dodatnich lub ujemnych jeśli: $Ra_d > 0$) lub innych rytmów o nieznannej genezie i okresie dłuższym niż rok (jeśli $Ra_d < 0$). Reasumując zatem, pierwszy współczynnik autokorelacji informuje o losowości lub o charakterze zmian i zmienności w wieloleciu w poszczególnych wektorach jednoimiennych przepływów dobowych.

Do badań wybrano 11 rzek z obszaru środkowej Polski, mających zarówno charakter nizinny jak i wyżynny (ryc. 1). Ich zlewnie mają wielkość od niespełna 450 km² do ponad 1700 km². Materiałem źródłowym były pozyskane z IMiGW-PIB dobowe przepływy tych rzek z wielolecia 1951-2002. Dla dziewięciu z nich dostępne były dane z całego okresu, w dwu przypadkach szeregi czasowe zaczynają się dopiero w roku 1961. Podstawowe informacje o wybranych zlewniach zestawiono w tabeli 1.

Do dalszych przekształceń i obliczeń wykonywanych na surowych danych wejściowych zastosowano dwa pakiety programów komputerowych: MS Office 2010 oraz Statistica 9.0.

Na podstawie ciągów dobowych przepływów pochodzących z wielolecia, dla każdego przekroju utworzono trzy nowe, 365-elementowe, szeregi czasowe: średnich wieloletnich przepływów w danym dniu ($Q\bar{s}r_d$), współczynników zmienności jednoimiennych przepływów dobowych (Cv_d) oraz współczynników autokorelacji w szeregach tych przepływów uzyskanych dla przesunięcia $k=1$ (Ra_d). Z analiz wykluczono dzień 29 lutego z uwagi na to, że występuje tylko raz na 4 lata. Dodatkowo, sprawdzono statystyczną istotność (na poziomie $\alpha = 0,05$)



Ryc. 1. Lokalizacja przekrojów wodowskazowych na tle przeciętnego całkowitego odpływu jednostkowego

Location of water gauges as set against their total specific discharge

Tabela 1. Podstawowe informacje o badanych rzekach
Basic information on the rivers studied

Lp. No.	Rzeka River	Wodowskaz Water gauge	Powierzchnia zlewni Catchment area A [km ²]	Horyzont czasowy danych Time brackets of data
1	Oleśnica	Niechmirów	591,6	1951-2002
2	Grabia	Grabno	810,7	1951-2002
3	Ner	Dąbie	1712,5	1951-2002
4	Prosna	Mirków	1255,0	1951-2002
5	Ołobok	Ołobok	447,1	1951-2002
6	Czarna Maleniecka	Dąbrowa	941,3	1951-2002
7	Luciąża	Kłudzice	505,7	1961-2002
8	Wolbórka	Zawada	616,0	1951-2002
9	Drzewiczka	Odrzywół	1004,1	1951-2002
10	Mroga	Bielawy	467,3	1961-2002
11	Rawka	Kęszyce	1190,6	1951-2002

Opracowanie własne, podobnie jak pozostałe tabele i ryciny. / Autors' own work, as well as other tables and figures.

tychże współczynników autokorelacji (Ra_d). Wykorzystano w tym celu test Boxa-Ljunga (Jung i Box, 1978). Jego statystyka testowa ma postać:

$$S_{bj} = n(n+2) \sum_{i=1}^k \frac{Ra_i}{n-1} \quad [1]$$

gdzie:

S_{bj} – statystyka testowa Boxa-Ljunga,

n – liczebność próby,

k – przesunięcie autokorelacji (tu: $k=1$),

Ra_i – współczynnik autokorelacji przy przesunięciu $k=1$.

Testowana hipoteza zerowa (H_0) wskazuje, czy obserwacje są niezależnie rozłożone w próbie (brak w nich autokorelacji). Gdy liczba obserwacji jest duża, to statystyka testowa S_{bj} ma rozkład χ^2 o k stopniach swobody. Jeżeli dla założonego poziomu istotności α obliczone S_{bj} jest większe bądź równe wielkości krytycznej $\chi^2_{kr(k)}$, to odrzucamy hipotezę zerową H_0 , a zatem w badanym szeregu czasowym występuje autokorelacja.

Trzy nowoutworzone szeregi czasowe zmiennych cechują się różną wariancją i rozkładami, co mogłoby utrudniać zastosowanie niektórych procedur. W związku z tym zdecydowano się na ich standaryzację według formuły:

$$xs = \frac{x_i - x_s}{\delta} \quad [2]$$

gdzie:

xs – zmienna standaryzowana,

x_i – zmienna oryginalna,

x_s – średnia arytmetyczna z próby,

δ – odchylenie standardowe z próby.

Takie przekształcenie gwarantuje, że wszystkie zmienne mają rozkład o średniej równej „0” i odchyleniu standardowym równym „1”. Umożliwia to porównywanie ich ze sobą i uniezależnia prowadzone analizy od jednostek w jakich zmienne zostały zmierzone (Kreyszig, 1979).

W odniesieniu do każdej rzeki i opierając się na danych standaryzowanych, przeprowadzono procedurę grupowania hierarchicznego w trójwymiarowej przestrzeni zmiennych: Qsr_d , Cv_d , Ra_d . Zastosowano tu najczęściej wybraną metodę Warda. Łączenie dwóch skupień zachodzi w niej wtedy, gdy po połączeniu zapewniają one minimum sumy kwadratów odchyłeń od środka ciężkości nowego skupienia. Formuła grupowania wygląda następująco (Parysek, 1982):

$$ESS = \sum_{i=1}^m ds_i^2 - \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n ds_i \right)^2 \quad [3]$$

gdzie:

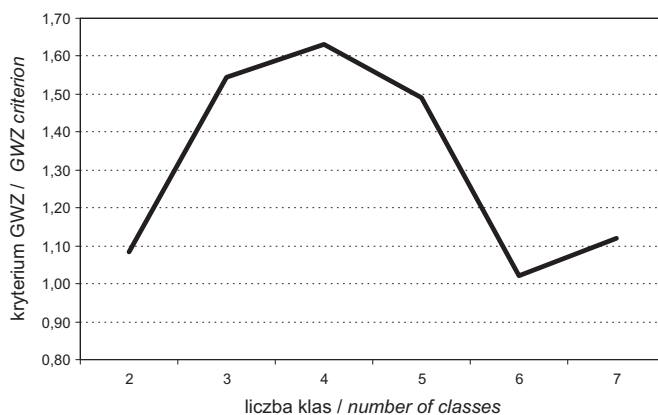
ESS – kryterium Warda,

ds_i – odchylenie i -tego obiektu od środka ciężkości skupienia „ s ”,

n – liczebność próby.

Łączenie obiektów (tu dni) prowadzi się tak długo, aż uzyska się tylko jedno skupienie obejmujące wszystkie 365 elementów zbioru.

Kolejnym krokiem było określenie najlepszej liczby klas wydzielonych przez grupowanie hierarchiczne. Problem ten można rozwiązać na wiele sposobów. W prezentowanym opracowaniu autorzy zdecydowali się zastosować kryterium Grabińskiego, Wydymusa i Zeliasia – GWZ (Grabiński i inni, 1989). Procedura polega tu na obliczaniu ilorazów odległości między powstającymi skupieniami. Pierwszy obliczamy dla dwóch skupień i kolejne dla coraz większej ich liczby. Wyniki najlepiej jest prezentować na wykresie, gdzie na osi odciętych odkładamy liczbę wydzielonych klas, a na osi rzędnych wielkości kryterium GWZ. Najlepszą liczbę klas określa pierwsze „lokalne maksimum” obliczonej miary. Przykładowy wybór najlepszej liczby klas z wykorzystaniem tego kryterium prezentuje rycina 2.



Ryc. 2. Wartości kryterium GWZ dla Mrogi w Bielawach

Values for the GWZ criterion in the case of the River Mroga at its Bielawy water gauge

W badanej grupie 11 rzek, liczba wydzielonych w ten sposób klas taksonomicznych wahała się od 4 (np. Ner) do 8 (Luciąża). Każda klasa odpowiada określonemu „typowi dni” na, przeciętnym z wielolecia, rocznym hydrogramie przepływu rzeki (tab. 2). W obrębie jednego typu dni wielkości przepływów są podobne, cechują się też podobną zmiennością w wieloleciu, a współczynniki autokorelacji spełniają jeden z trzech warunków: są dodatnie i istotne statystycznie, ujemne i istotne statystycznie, albo nieistotne (bez względu na znak) – por. wzór [1]. Uwaga ta odnosi się jednak wyłącznie do typów wyróżnionych w obrębie

hydrogramu danej rzeki i na tym etapie analizy poszczególne typy dni nie mają charakteru uniwersalnego – np. typ A w odniesieniu do Luciąży niekoniecznie wykazuje takie same cechy jak typ A w przypadku Neru itd. Wynika to bezpośrednio z faktu, że metodę Warda stosowano do grupowania dni w obrębie szeregów przepływu poszczególnych przekrojów, nie zaś wszystkich przekrojów jednocześnie. Liczba dni określonego typu była zróżnicowana zarówno w obrębie całego zbioru rzek, jak i w poszczególnych rzekach (tab. 2).

Tabela 2. Liczba dni określonego typu w obrębie przeciętnego, rocznego hydrogramu przepływu danej rzeki

Number of days of a specific type within the mean annual outflow hydrograph for a given river

Rzeka / River	Liczba dni wyróżnionych typów / Number of days of a specific type							
	A	B	C	D	E	F	G	H
Luciąża	40	45	15	36	33	61	66	69
Drzewiczka	26	35	64	72	60	40	68	
Ołobok	57	55	34	35	86	41	57	
Czarna Maleniecka	31	19	87	54	63	111		
Proсна	62	36	59	29	52	127		
Wolbórka	56	32	61	97	26	93		
Grabia	103	56	37	40	129			
Rawka	58	52	68	86	101			
Mroga	80	65	103	117				
Ner	64	122	50	129				
Oleśnica	91	45	60	169				

W obrębie najbardziej rozczłonowanego hydrogramu Luciąży (8 typów dni), liczba dni, które do nich zaliczono zawierała się w przedziale od 15 do 69. Równocześnie, liczba dni danego typu w niemal tak samo zróżnicowanym hydrogramie Ołoboku (7 typów dni) mieściła się w przedziale od 34 do 86. Liczby dni określonego typu były największe w obrębie hydrogramów: Oleśnicy (169), Neru i Grabi (129) oraz Proсны (127).

Dni określonych typów układały się w obrębie hydrogramów poszczególnych rzek w różnej długości sekwencje występujące w różnych porach roku. W kolejnym kroku należało zatem połączyć te grupy dni w możliwie małą liczbę zwartych i długich sekwencji, aby zbudować względnie spójne okresy o cechach sezonów hydrologicznych.

W pierwszym etapie, dla każdego analizowanego przekroju kontrolnego, uszeregowano typy dni w ciągu chronologiczne o długości roku hydrologicznego. W tak utworzonych szeregach, poszczególne typy dni (roboczo oznaczono

je wielkimi literami) mogą występować obok siebie, tworząc różnej długości sekwencje (np.: AAAAAAAAAAADDDDDD) lub być wymieszane (np.: ABDC-CEAFG). Założyliśmy wstępnie, że odpowiednio długą, jednoimienną sekwencję określonych typów dni nazwiemy „sezonem hydrologicznym”, przy czym charakteryzować go będą takie same właściwości jak dni, które go tworzą. W celu identyfikacji pojedynczego sezonu hydrologicznego, autorzy przyjęli następującą procedurę (kolejność kroków jak poniżej).

1. Jednoimienna sekwencja „typów dni” trwająca co najmniej 10 dni tworzy sezon hydrologiczny lub „jądro” takiego sezonu.
2. Do wydzielonego sezonu hydrologicznego lub jego jądra dołączane są sąsiednie, krótsze niż 10-elementowe sekwencje dni tego samego typu, ale tylko wtedy, gdy są one dłuższe od serii innych typów dni, które oddzielają ją od danego sezonu (lub jego jądra).
3. Dla pozostałych dni, które nie zostały w ten sposób przyłączone do sezonów przyjęto, że jeżeli w odcinku hydrogramu, o długości przynajmniej 10 dni, ponad 50% z nich, czyli 6 lub więcej, ma ten sam typ, to odcinek taki tworzy również jądro sezonu hydrologicznego lub może być przyłączony do sezonu sąsiedniego.
4. Jednoimienne odcinki o długości krótszej niż 10 dni przyłączane są do sąsiednich sezonów hydrologicznych, przy czym o przyłączeniu do sezonu „wcześniejszego”, lub „późniejszego” decydowała wielkość średnich przepływów.

Przykład procedury delimitacji sezonów hydrologicznych w obrębie uzyskanego wstępnie, pierwotnego fragmentu ciągu różnych typów dni, przedstawia rycina 3.

Zaprezentowany powyżej schemat pozwala na wydzielenie w roku hydrologicznym, dla każdej zlewni z osobna, względnie zwartych okresów nazwanych „sezonami hydrologicznymi”. Cechują się one określoną dynamiką odpływu



Ryc. 3. Przykład zastosowania procedury wydzielenia sezonów hydrologicznych według zaproponowanych kroków (od 1 do 4) dla Mrogi w Bielawach
A – fragment pierwotnego szeregu chronologicznego „typów dni”; B – wydzielone sezony hydrologiczne (cyfry oznaczają kolejne kroki procedury opisanej w tekście)

An example of the application of the procedure for identifying hydrological seasons using proposed steps (1-4) along the Mroga at the Bielawy water gauge

A – part of original time series of “types of days”; B –hydrological seasons distinguished (numbers show the the consecutive steps to the procedure described in the text)

w wieloleciu oraz względnym podobieństwem wewnętrznym i statystycznie istotnymi różnicami międzysezonowymi. Zaznaczyć przy tym trzeba, że sezon o określonym charakterze może w danej rzece występować więcej niż raz w roku (por. ryc. 3B). Na średnich hydrogramach przepływu analizowanych przekrojów wodowskazowych liczba wystąpień różnych sezonów waha się od 7 do 18. Szczegółowe informacje zawiera tabela 3.

Tabela 3. Liczba wyróżnionych sezonów hydrologicznych i ich wystąpień w obrębie średniego rocznego hydrogramu przepływu rzeki
Number of hydrological seasons distinguished and their occurrence within the mean annual outflow hydrograph of the river

Lp. No.	Rzeka River	Liczba sezonów hydro- logicznych (numery sezonów) <i>Hydrological seasons amount (number of seasons)</i> [N]	Liczba wystąpień sezonów hydrologicz- nych <i>Number of occuren- ces of hydrological seasons</i> [n]	Średnia liczba wystą- pień pojedynczego sezonu w ciągu roku <i>Avarage number of occurences of single season in year</i> [L= n/N]
1	Oleśnica	4 (16,11,5,14)	8	2,0
2	Grabia	5 (16, <u>13</u> ,5,14, <u>19</u>)	8	1,6
3	Ner	4 (9, <u>3</u> ,14, <u>19</u>)	7	1,7
4	Proсна	6 (16,9,8,2,5, <u>10</u>)	13	2,2
5	Otobok	7 (18, <u>13</u> ,11, <u>6</u> ,5,14,16)	16	2,3
6	Czarna Maleniecka	6 (16,9,8,2,11,4)	15	2,5
7	Luciąża	7 (11,9,2,16,4, <u>19</u> ,6)	13	1,9
8	Wolbórka	5 (18,12,9, <u>10</u> ,1)	18	3,6
9	Drzewiczka	7 (11, <u>17</u> ,5,2,16,7,18)	14	2,0
10	Mroga	4 (<u>13</u> ,9, <u>5</u> ,15)	14	3,5
11	Rawka	5 (<u>10</u> ,9,5,16, <u>17</u>)	11	2,2

Podkreślono numery sezonów z istotnymi trendami.

Underlined numbers of seasons with statistically significant trends.

Sezony hydrologiczne powstałe z grupowania dni określonego typu oznaczyliśmy wstępnie wielkimi literami (A, B,...,G). Należy jednak pamiętać, że sezon roboczo oznaczony na przykład literą „F”, może mieć zupełnie inne cechy w każdej z branych pod uwagę rzek, a w niektórych może w ogóle nie występować, gdyż wyróżniono w niej tylko 4 lub 5 „typów dni”. W związku z tym, wydzielone w analizowanych 11 rzekach sezony hydrologiczne, należało ujednoczyć i stosownie nazwać. Z oczywistych powodów, nazwa każdego z nich powinna nawiązywać do jego charakterystycznych cech.

W celu ujednoczenia nazw sezonów i aby odpowiadały one charakterystycznym cechom dynamiki przepływu każdej z analizowanych rzek, obliczono dla

wyróżnionych sezonów średnie i odchylenia standardowe zbiorów wielkości $Q\bar{s}r_d$ oraz Cv_d . Sprawdzone również, czy w danym sezonie dominują dni o istotnych statystycznie współczynnikach autokorelacji Ra_d (osobno $Ra_d > 0$ oraz $Ra_d < 0$), czy też może autokorelacja dla jednoimiennych dni danego sezonu jest nieistotna. Posługując się obliczonymi wcześniej średnimi i odchyleniami standardowymi oraz istotnością i znakiem istotnych ewentualnie współczynników autokorelacji, według schematu zaprezentowanego na rycinie 4, zaproponowano hydrologicznie interpretowalne nazwy zidentyfikowanych sezonów hydrologicznych.

W ten sposób na wieloletnich hydrogramach przepływu 11 rzek udało się wydzielić 19 różniących się od siebie i wewnętrznie spójnych sezonów hydrologicznych. By uczynić graficzną ich prezentację, zostały one ponumerowane i oznaczone symbolami (tab. 4).

Tabela 4. Sezony hydrologiczne wydzielone w analizowanej grupie rzek
Hydrological seasons separated in analyzed rivers

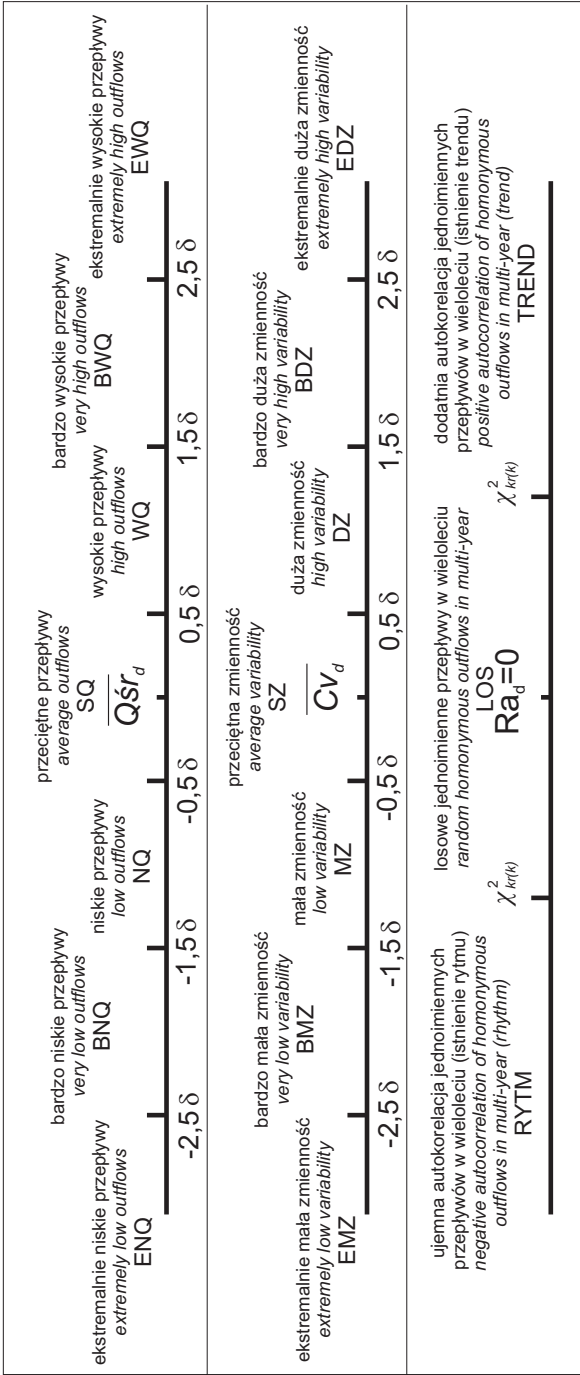
Nr No.	Charakterystyczne cechy sezonu hydrologicznego <i>Characteristics of hydrological season</i>	Symbol sezonu <i>Symbol of season</i>	L	P [%]
1	2	3	4	5
1	<u>bardzo wysokie przepływy, duża zmienność, losowe</u>	<u>BWQ/DZ/LOS</u>	1	9
2	bardzo wysokie przepływy, średnia zmienność, losowe	BWQ/SZ/LOS	4	36
3	<u>bardzo wysokie przepływy, średnia zmienność, trend</u>	<u>BWQ/SZ/TREND</u>	1	9
4	wysokie przepływy, ekstremalnie duża zmienność, losowe	WQ/EDZ/LOS	2	18
5	wysokie przepływy, średnia zmienność, losowe	WQ/SZ/LOS	7	64
6	wysokie przepływy, średnia zmienność, trend	WQ/SZ/TREND	2	18
7	<u>średnie przepływy, ekstremalnie duża zmienność, losowe</u>	<u>SQ/EDZ/LOS</u>	1	9
8	średnie przepływy, duża zmienność, losowe	SQ/DZ/LOS	2	18
9	średnie przepływy, średnia zmienność, losowe	SQ/SZ/LOS	7	64
10	średnie przepływy, średnia zmienność, trend	SQ/SZ/TREND	3	27
11	średnie przepływy, mała zmienność, losowe	SQ/MZ/LOS	5	45
12	<u>średnie przepływy, mała zmienność, rytm</u>	<u>SQ/MZ/RYTM</u>	1	9
13	średnie przepływy, mała zmienność, trend	SQ/MZ/TREND	3	27
14	niskie przepływy, bardzo duża zmienność, losowe	NQ/BDZ/LOS	4	36
15	<u>niskie przepływy, duża zmienność, losowe</u>	<u>NQ/DZ/LOS</u>	1	9
16	niskie przepływy, średnia zmienność, losowe	NQ/SZ/LOS	8	73
17	niskie przepływy, średnia zmienność, trend	NQ/SZ/TREND	2	18
18	niskie przepływy, mała zmienność, losowe	NQ/MZ/LOS	3	27
19	niskie przepływy, mała zmienność, trend	NQ/MZ/TREND	3	27

L – liczba rzek, w których występuje dany sezon; P – udział rzek z danym sezonem w całej analizowanej grupie.

Pogrubiono sezony zidentyfikowane w największej liczbie rzek; podkreślono sezony, które stwierdzono tylko w jednej rzece.

L – numbers of river where specified hydrological season exist; P – percentage share of rivers where exist specified hydrological season in the whole group.

Bolded hydrological seasons identified in the highest number of rivers; underlined hydrological seasons identified only in one river.



Ryc. 4. Schemat tworzenia nazwy sezonu hydrologicznego na podstawie charakterystycznych dla niego cech wieloletniej dynamiki odpływu rzeczno-

δ – odchylenie standardowe analizowanych zmiennych; $Q\hat{s}r_d$ – średni przepływ dobowy w analizowanym sezonie; Cv_d – współczynnik zmienności przepływów w analizowanym sezonie; Ra_d – współczynnik autokorelacji przepływów w analizowanym sezonie przy przesunięciu o rok; $\chi^2_{kr(k)}$ – wartości krytyczne statystyki testowej S_{bj}

Scheme for the naming of hydrological seasons on the basis of features characteristic for its long-term outflow dynamics

δ – standard deviation of examined characteristics; $Q\hat{s}r_d$ – mean daily outflow in analysed season; Cv_d – variation coefficient for outflow in the analysed season; Ra_d – autocorrelation coefficient for outflow with a one-year shift in the analysed season;

$\chi^2_{kr(k)}$ – critical values for test statistic S_{bj}

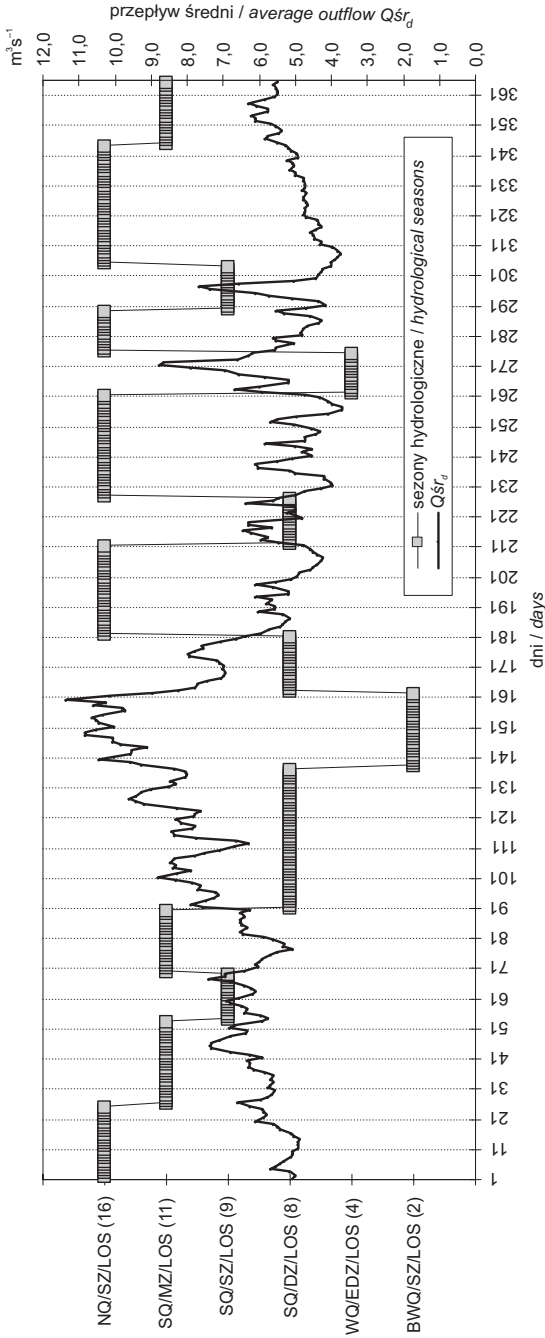
Wyniki analiz

Teoretyczna liczba sezonów hydrologicznych, które można wyróżnić stosując kryteria opisane wyżej wynosi aż: $7 \times 7 \times 3 = 147$ (por. ryc. 4). W badanej grupie zlewni zidentyfikowano 19 takich sezonów, przy czym niektóre z nich występują w obrębie rocznego hydrogramu przepływu danej rzeki kilkakrotnie. Na przykład sezon 16 (NQ/SZ/LOS) na hydrogramie Czarnej Malenieckiej pojawia się aż 5 razy (ryc. 5), a w obrębie hydrogramu Rawki tylko raz. Czas trwania poszczególnych sezonów jest także zróżnicowany i dochodzi do 103 dni. Przykładem jest tu Grabia i sezon 5 (WQ/SZ/LOS) – por. rycina 6.

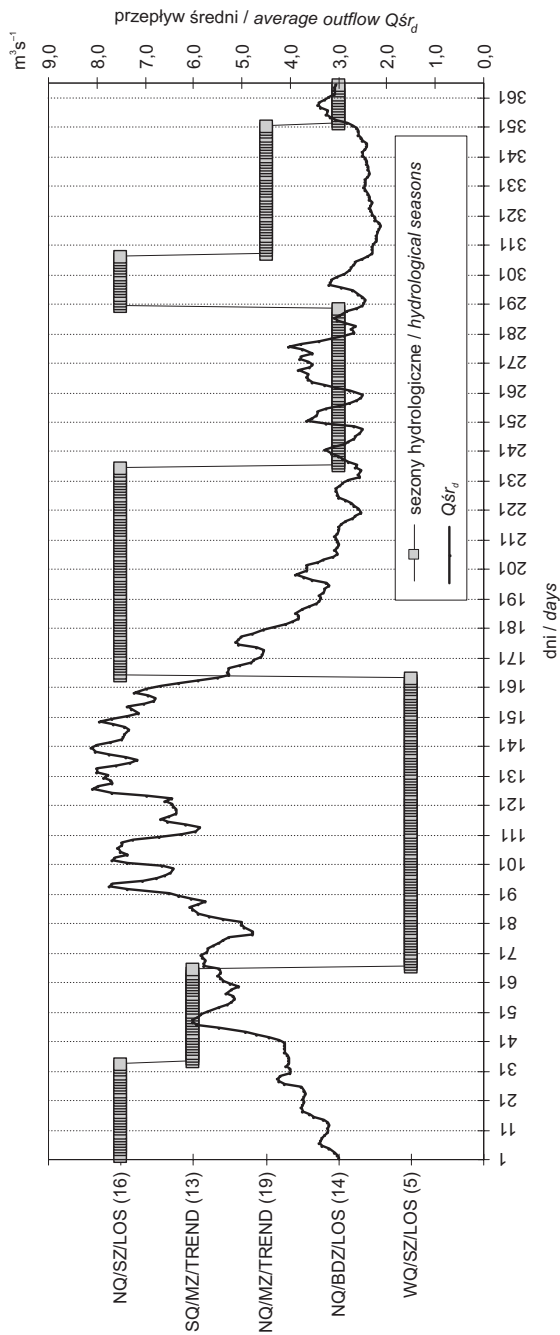
Już pobieżna analiza danych w tabeli 4 pozwala dostrzec, że wyróżnione sezony nr 5, 9 i 16 występują w ponad połowie badanych rzek, natomiast kilka innych, zapewne z uwagi na specyficzne cechy, zidentyfikowano tylko w jednej rzece (np. sezony: 1, 3, 7, 15). Do pierwszej grupy należą sezony o niskich, średnich i wysokich przepływach oraz średniej zmienności w wieloleciu i losowym charakterze zmian wieloletnich, do drugiej zaś sekwencji dni z przepływami niskimi, średnimi lub wysokimi, ale o podwyższonej lub obniżonej zmienności w wieloleciu, a także istotnymi trendami w wektorach jednoimiennych dni.

Przepływy dobowe aż w 6 wyróżnionych sezonach hydrologicznych charakteryzują istotne trendy (sezony: 3, 6, 10, 13, 17, 19). Występują one w trzech rzekach (Ner, Luciąża, Ołobok) w sezonach wysokich przepływów (sezony 3 i 6) oraz w pięciu rzekach (Grabia, Ner, Rawka, Luciąża, Drzewiczka) w sezonach przepływów niskich (sezony 17 i 19). Statystycznie istotne trendy (dodatnie współczynniki autokorelacji) występują również w sezonach przepływów średnich (sezony 10 i 13) i co ciekawe, zidentyfikowano je w różnych sekwencjach dni pojawiających się w obrębie hydrogramów należących do ponad połowy wszystkich wymienionych rzek – tabela 3. Dodajmy także, że w przypadku Wolbórki, jeden z sezonów (12) charakteryzuje występowanie ujemnego i statystycznie istotnego współczynnika autokorelacji. Może to wskazywać na występowanie, w skali wieloletniej i w obrębie danego wycinka (wycinków) hydrogramu, rytmu dłuższego niż 1 rok lub może dowodzić skokowej zmiany przepływów w danej grupie jednoimiennych przepływów dobowych. Na hydrogramie Wolbórki, sezon 12 pojawił się dwukrotnie, późną jesienią i wiosną, przy czym długość obu sekwencji dni wynosiła odpowiednio: 16 i 10. Geneza tego zjawiska jest autorem nieznaną.

Najbardziej rozczłonkowane są hydrogramy przepływu Wolbórki, Ołoboku i Czarnej Malenieckiej (odpowiednio: 18, 15, 16 wystąpień różnych sezonów hydrologicznych) – tabela 3. Najmniej zróżnicowane są natomiast hydrogramy Neru, Grabi i Oleśnicy. Iloraz liczby wystąpień wszystkich sezonów w ciągu roku i liczby zidentyfikowanych sezonów (L , w tab. 3) zawiera się od 1,6 (Grabia, Luciąża) do 3,6 (Wolbórka) i 3,5 (Mroga). Przeciętnie, każdy sezon hydrologicz-



Ryc. 5. Średni roczny hydrogram przepływu Czarnej Malenieckiej i sezony hydrologiczne NQ/SZ/LOS (17) – symbol sezonu hydrologicznego (numer sezonu hydrologicznego) – por. tab. 4
Mean annual outflow hydrograph for the Czarna Maleniecka and its hydrological seasons NQ/SZ/LOS (17) – symbol of hydrological season (number of hydrological season) – cf. Table 4



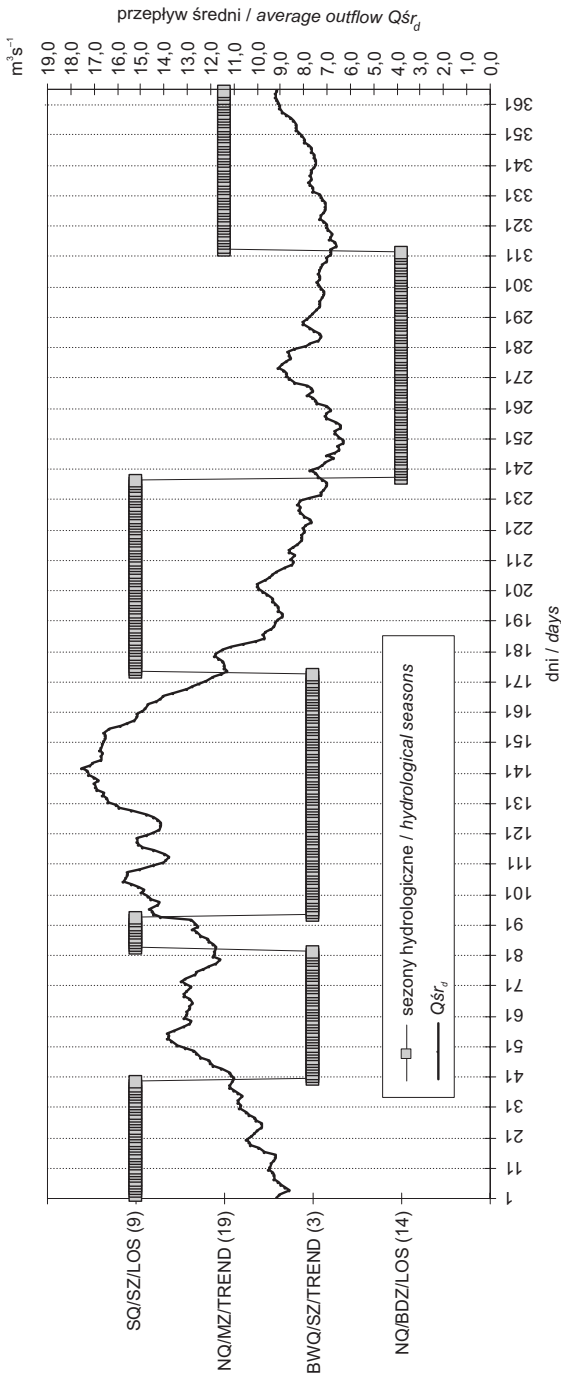
Ryc. 6. Średni roczny hydrogram przepływu Grabii i sezony hydrologiczne NQ/SZ/LOS (17) – symbol sezonu hydrologicznego (numer sezonu hydrologicznego) – por. tab. 4
 Mean annual outflow hydrograph for the Grabia and its hydrological seasons
 NQ/SZ/LOS (17) – symbol of hydrological season (number of hydrological season) – cf. Table 4

ny pojawia się w obrębie hydrogramu danej rzeki 2-3 razy. W liczbach sezonów i liczbach ich wystąpień trudno doszukać się jednak wyraźnego porządku. Choć stopień zróżnicowania hydrogramu, mierzony liczbą wystąpień poszczególnych sezonów, zdaje się wzrastać proporcjonalnie do liczby zidentyfikowanych sezonów hydrologicznych, to przecież łatwo zauważyć w badanym zbiorze rzeki o bardzo rozczłonkowanych hydrogramach i niewielkiej liczbie wyróżnionych sezonów (np. Wolbórka) oraz rzeki o niemal równie zróżnicowanym hydrogramie, ale małej liczbie sezonów (np. Mroga).

W trzech rzekach (Oleśnica, Mroga i Ner) zidentyfikowano tylko 4 typy sezonów, przy czym w Nerze i Oleśnicy niektóre (np. sezon 14 – NQ/BDZ/LOS) wystąpiły odpowiednio raz i dwa razy w roku (ryc. 7). Natomiast w Mrodze, liczba powtórzeń sezonu 13 (SQ/MZ/TREND), w obrębie jej średniego hydrogramu przepływu, wyniosła nawet 6, przy czym pojedyncze sekwencje trwały tu od kilkunastu do 29 dni.

Współzmienność występowania sezonów hydrologicznych w uwzględnionej próbie przekrojów wodowskazowych jest dość wyraźna, ale tylko w odniesieniu do niektórych z nich (ryc. 8). Oczywiście największa „zgodność” między rzekami występuje w okresie wzmożonego zasilania wodami roztopowymi. W marcu i w lutym, a czasem nawet w kwietniu i w styczniu, niemal we wszystkich rzekach pojawiają się wysokie bądź bardzo wysokie przepływy, cechujące się przy tym średnią bądź dużą zmiennością w wieloleciu i losowym charakterem (sezony: 1, 2, 5). Wyjątek stanowi Ner, w którym losowość zastąpiona została trendem (sezon 3). Aby potwierdzić istnienie wieloletniej tendencji zmian średnich przepływów dobowych tej rzeki oraz określić ich kierunek, obliczono dla każdego roku średnie przepływy dobowe z dni należących do 3. sezonu hydrologicznego (BWQ/SZ/TREND).

Tak powstały szereg czasowy został przetestowany pod kątem istnienia trendu. Weryfikacji hipotezy o jego istnieniu dokonano za pomocą medianowej odmiany nieparametrycznego testu serii dla poziomu istotności $\alpha = 0,05$. Zaletami tego testu jest możliwość jego stosowania przy relatywnie małych próbach i brak wymagań co do normalności rozkładu cechy w populacji. W związku z tym jest on polecany do wykrywania istotności trendu (Mitosek, 2003). Wynik testowania wskazuje na istnienie w szeregu istotnej statystycznie tendencji (współczynnik kierunkowy trendu liniowego wynosi 0,12) do zwiększania się przepływów w Nerze w trakcie tego sezonu hydrologicznego. Wynika to zapewne z faktu, że spora część wód z sieci kanalizacji burzowej i sanitarnej (lokalnie ogólnospławnej) Łodzi trafia właśnie do tej rzeki, a zasięg tych sieci zwiększał się sukcesywnie w drugiej połowie XX wieku, tak samo jak powierzchnia odwadnianych przez kanalizację burzową terenów nieprzepuszczalnych. W 1945 r. długość kanalizacji w Łodzi wynosiła tylko 192 km, w 1965 – 512 km, by w 1994 osiągnąć 1323, a w 2004 – 1556 km. W tym samym czasie liczba osób korzystających z tej sieci wzrosła z 227 tys. do 742 tys. (Biezanowski,

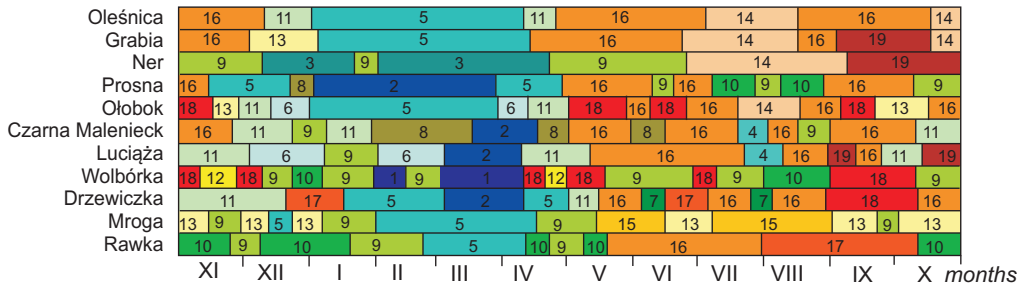


Ryc. 7 Średni roczny hydrogram przepływu Neru i sezony hydrologiczne

NQ/SZ/LOS (17) – symbol sezonu hydrologicznego (numer sezonu hydrologicznego) – por. tab. 4

Man annual outflow hydrograph for the Ner and its hydrological seasons

NQ/SZ/LOS (17) – symbol of hydrological season (number of hydrological season) – cf. Table 4



Ryc. 8. Sezony hydrologiczne w rzekach środkowej Polski

1, 2, 3, 4... – numer sezonu hydrologicznego (por. tab. 4)

Hydrological seasons in the rivers of central Poland

1, 2, 3, 4... – numbers of hydrological seasons (cf. Table 4)

2005). Zauważalny wzrost przepływów ograniczył się tylko do kilku dekad półroczna chodnego (od grudnia do kwietnia).

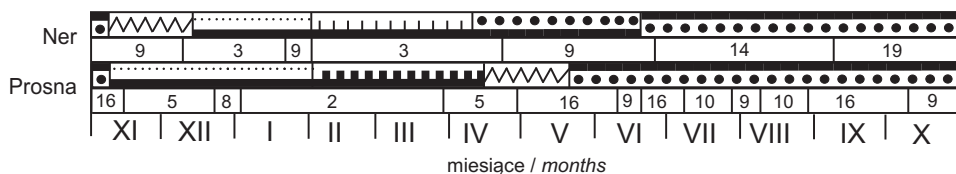
Kolejny, względnie „jednorodny” okres w regionie to sierpień, w którym zdecydowana większość rzek (9 z 11) wykazuje niskie, losowe w wieloleciu przepływy o zmienności od średniej do bardzo dużej. Wyjątki stanowią tylko Wolbórka i Prosna. W pozostałych częściach roku hydrologicznego, autorzy nie dostrzegają wyraźnego podobieństwa rodzaju, sposobu i terminów występowania sezonów hydrologicznych w analizowanych rzekach. Oczywiście pojawiają się podobieństwa w obrębie dwóch, czasem większej liczby rzek i niektórych sezonów np. między Oleśnicą i Grabią, czy Wolbórką i Ołobokiem. Jednak analizując wnikliwie rozmieszczenie i charakter wszystkich wyróżnionych sezonów hydrologicznych można ostrożnie postawić tezę, że reżim hydrologiczny badanych rzek, odczytywany na podstawie zdefiniowanych wyżej kryteriów, w większym stopniu zależy od indywidualnych cech każdej zlewni oraz sposobów i form zasilania rzek, a w mniejszym od prawidłowości i powiązań o charakterze regionalnym, których geneza jest uwarunkowana głównie przez podobieństwo warunków klimatycznych.

Warto wspomnieć jeszcze o ewentualnych zmianach dynamiki odpływu rzeczno wyrażonych dominacją w danym sezonie hydrologicznym dni ze statystycznie istotnymi współczynnikami autokorelacji Ra_d . Najmniej stabilne w wieloleciu warunki formowania się odpływu występowały w środkowej Polsce na przełomie grudnia i stycznia. W tych dwóch dekadach, współczynniki autokorelacji większe od zera ($Ra_d > 0$) stwierdzono w ośmiu rzekach (wykryto zatem w tym okresie różnokierunkowe trendy). Tylko w przypadku Oleśnicy, Prosny i Czarnej Malenieckiej współczynniki autokorelacji były w tym okresie nieistotne. Warto przy tym zauważyć, że wykryte trendy dotyczą niemal całego zakresu, występującego wówczas w poszczególnych rzekach zróżnicowania przepływów: od niskich po wysokie

(sezony: 3, 6, 10, 13, 17). Kolejny okres, w którym dynamika odpływu rzeczego wydaje się zmieniać w czasie, występuje jesienią i dotyczy prawie wyłącznie przepływów średnich (sezony: 10, 13, 19). Jest on jednak zdecydowanie słabiej zaznaczony od poprzedniego. W okresie tym, w ponad połowie rzek (6 z 11), przepływy dobowe cechują się także statystycznie istotnymi współczynnikami autokorelacji wskazującymi na istnienie trendów (np.: Grabia, Ner, Mroga).

W przeciwieństwie do wyżej opisanych, wyjątkowo trwały w wieloleciu jest okres rozpoczynający się w końcu kwietnia, a kończący w połowie czerwca. W seriach przepływów dobowych wyróżnionych w tym czasie sezonów hydrologicznych brak jest istotnych statystycznie współczynników autokorelacji Ra_d , a zatem trudno doszukać się tu jakichkolwiek tendencji czy rytmów wieloletnich. Wyjątek stanowi Rawka, gdzie w szeregu średnich przepływów z wielolecia, w połowie maja, występuje sekwencja dni o $Ra_d > 0$ (sezon 10 o długości 11 dni).

Interesująca może być również próba porównania „sezonów hydrologicznych” zidentyfikowanych przez autorów z „okresami hydrologicznymi” uzyskanymi metodą opisaną w pracach J. Rotnickiej (1977, 1988). Przypomnijmy, że ta ostatnia procedura identyfikuje okresy hydrologiczne zakładając jedną realizację procesu odpływu, a podstawową jednostką w analizach jest pentada. Dane z dwu przekrojów: Neru po wodowskaz Dąbie oraz Proсны po wodowskaz Mirków, były analizowane w obydwu pracach. Nie tylko metodyka wydzielenia jednorodnych wewnątrznie sekwencji dni była w obu analizach różna – inny był także zakres czasowy danych hydrometrycznych. Dla wyżej wymienionych przekrojów, J. Rotnicka dysponowała bowiem danymi tylko z dwudziestolecia 1951-1970. Wynik przeprowadzonego porównania ilustruje rycina 9.



1, 2, ..., 19 – sezony hydrologiczne wydzielone przez autorów / hydrological seasons specified by the Authors

Typy okresów hydrologicznych według J. Rotnickiej / types of hydrological periods specified by J. Rotnicka:

- niskie przepływy przeciętne stabilne / average stable low outflow
- ▲▲ okres normalny niestabilny dowiezbraniowy / normal unstable period tending to a rise
- niskie wezbranie niestabilne / low unstable rise
- wysokie wezbranie niestabilne / high unstable rise
- niskie wezbranie stabilne / low stable rise
- wysokie wezbranie umiarkowanie niestabilne / high, moderately unstable rise

Ryc 9. Porównanie sezonów hydrologicznych wydzielonych dla Neru i Proсны przez autorów (numery) i przez J. Rotnicką (1988; szraf).

Comparison of hydrological seasons for the Rivers Ner and Proсны as identified by the authors (numbers 1-19) and by J. Rotnicka (1988; symbols)

Liczba wydzielonych sezonów hydrologicznych na hydrogramie przepływu Neru była niemal równa liczbie okresów hydrologicznych, które wyróżniła J. Rotnicka (odpowiednio 4 i 5). Różnice między sezonami hydrologicznymi (ich lokalizacją, długością i charakterem) a wydzielonymi przez J. Rotnicką okresami zaznaczają się najwyraźniej w chłodnej połowie roku. Na przykład, czas trwania sezonu 3, który może odpowiadać okresom wezbrań wysokich niestabilnych i wezbrań niskich stabilnych, jest dłuższy (faza wezbrań pojawia się nieco wcześniej i nieco później się kończy) – por. rycina 9. Faza wezbrań jest jednak w obu typologiach dwudzielna. W pierwszej zaczyna się od wezbrań niskich po których pojawiają się wysokie, zaś w drugiej, sezon 3 (BWQ/SZ/TREND) jest podzielony na dwie części krótko trwającym sezonem 9 (SQ/SZ/LOS). Jednocześnie w ciepłej połowie roku okres niskich stabilnych wezbrań zdaje się odpowiadać sezonowi 9, a sezony: 14 (NQ/BDZ/LOS) i 19 (NQ/MZ/TREND) odpowiadają okresowi niżówek przeciętnych i stabilnych.

Przekrój wodowskazowy na Prośnie w Mirkowie cechuje się natomiast znacząco różną liczbą sezonów i okresów hydrologicznych (odpowiednio: 6 i 4). Jeszcze wyraźniej różnice zaznaczają się, gdy weźmiemy pod uwagę liczbę wystąpień sezonów hydrologicznych, czyli stopień rozczłonkowania hydrogramu (w pracy autorów: 14). W półroczu ciepłym, sezon 9 pełni rolę swoistego „przerywnika” rozdzielającego dwa wystąpienia sezonów 16 i 10, przy czym ten drugi cechuje się statystycznie istotnymi współczynnikami autokorelacji ($Ra_t > 0$), a więc bardzo prawdopodobnym, istotnym trendem wieloletnim. W kontekście uzyskanej tu skali rozczłonkowania hydrogramu Proсны, wynik otrzymany przez J. Rotnicką wskazujący na przynależność niemal całego półrocza do jednego okresu wydaje się dziś mocno dyskusyjny. W półroczu chłodnym względne podobieństwo okresów i sezonów hydrologicznych oraz terminów ich występowania jest większe. Okres wysokich wezbrań i sezon 2 (BWQ/SZ/LOS) mają podobną długość, ale jednocześnie ten pierwszy zaczyna się i kończy nieco później (ryc. 9). Chociaż sezon 5 (WQ/SZ/LOS) ma podobne cechy jak okres wezbrań wysokich, to jednak trwa wyraźnie krócej, a od sezonu bardzo wysokich wezbrań oddziela go krótka sekwencja dni sezonu 9.

Wnioski i uwagi końcowe

Przeprowadzona wyżej próba zdefiniowania i zidentyfikowania sezonów hydrologicznych na podstawie oceny wielkości, zmienności i losowości przepływów dobowych wskazuje, że nawet w obrębie niewielkiego regionu środkowej Polski, liczba sezonów hydrologicznych, o cechach tylko sobie właściwych, w obrębie rocznych hydrogramów przepływu rzek jest duża i zróżnicowana przestrzennie. Jednocześnie, każdy z sezonów może występować tylko jeden raz bądź pojawiać się na hydrogramie wielokrotnie, przy czym trudno doszukać się przesłanek, by podejmować próby ich konsolidacji. Obserwowane w skali wielolecia różnice

rocznego rozmieszczenia i dynamiki odpływu między poszczególnymi rzekami są bardzo wyraźne, a zidentyfikowane trendy wskazują, że w przyszłości będą się one prawdopodobnie pogłębiać. Wydaje się przy tym, że reżim odpływu staje się coraz bardziej skomplikowany i w coraz większym stopniu zależny od indywidualnych cech zlewni i antropopresji zaznaczającej się nie tylko w obrębie odpływu, ale w całym wektorze procesów wpływających na jego formowanie.

Uzyskane w powyższej pracy wyniki nie zawsze dają precyzyjną odpowiedź na pytanie o przyczyny obserwowanych prawidłowości i zmian, a nawet o ich kierunek. Również nasza propozycja metody służącej do wyznaczenia sezonów hydrologicznych nie jest pozbawiona uproszczeń i trudno ją uznać za w pełni obiektywną. Wydaje się jednak, że pozwoliła ona nie tylko uchwycić kilka ważnych prawidłowości w wieloletniej dynamice odpływu w uwzględnionej próbie zlewni, ale również zobiektywizować i chyba uprościć procedurę identyfikowania jego sezonowej struktury i przybliżyć czytelnikowi szereg problemów związanych z określaniem ustrojów (reżimów) rzecznych i ich zmian w czasie. Autorzy zdają sobie przy tym sprawę, że zarówno metodę, jak i wnioski wynikające z przedstawionej pracy należy zweryfikować przy wykorzystaniu bogatszego materiału hydrometrycznego.

Piśmiennictwo / References

- Bartczak A., 2007, *Wieloletnia zmienność odpływu rzecznego z dorzecza Zgłowiączki*, Prace Geograficzne, IGiPZ PAN, 209, Warszawa.
- Bartnik A., Jokiel P., 1997, *Zmiany odpływu na obszarze Polski w latach 1971-1990 w świetle analiz jednorodności szeregów przepływu rzek*, Wiadomości IMGW, 4, s. 67-86.
- 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.
- Bieżanowski W., 2005, *Z dziejów kanalizacji i wodociągów łódzkich*, Wyd. ZORA, Łódź.
- Grabiński T., Wydimus S., Zeliaś A., 1989, *Metody taksonomii numerycznej w modelowaniu zjawisk społeczno-gospodarczych*, PWN, Warszawa.
- Jokiel P., 2009, *O sezonowym rozmieszczeniu odpływu w wybranych rzekach środkowej Polski*, Wiadomości IMGW, 2-3, s. 15-29.
- Jokiel P., Bartnik A., 2001, *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w Polsce środkowej w wieloleciu 1951-1998*, Wiadomości IMGW, 2, Warszawa, s. 3-17.
- Kreyszig E., 1979, *Applied Mathematics*, Willey Press, London.
- Ljung G. M., Box G. A. P., 1978, *On a measure of a lack of fit in time series models*, Biometrika, 65, 2, s. 297-303.
- Markham Ch. G., 1970, *Seasonality of precipitation in the US*, Annales of the Association of American Geographers, 60, 3, s. 350-370.
- Mitosek H., T., 2003, *Problemy hydrologii stochastycznej. Procesy stochastyczne, pola losowe i momenty liniowe*, Wydawnictwa Akademii Świętokrzyskiej, Kielce.
- Parysek J. J., 1982, *Modele klasyfikacji w geografii*, Wydawnictwa UAM, Poznań.
- Rotnicka J., 1977, *Teoretyczne podstawy wydzielenia okresów hydrologicznych i analizy reżimu rzecznego na przykładzie rzeki Prosnys*, Prace Komisji Geograficzno-Geologicznej PTPN, XVIII, Poznań.

- Rotnicka J., 1988, *Taksonomiczne podstawy klasyfikacji reżimu rzecznego*, Wydawnictwo UAM, Seria Geographia, 40, Poznań.
- Tomaszewski E., 2001, *Sezonowe zmiany odpływu podziemnego w Polsce w latach 1971-1990*, Acta Geographica Lodziensia, 79, Łódź.
- Węglarczyk S., 1998, *Wybrane problemy hydrologii stochastycznej*, Monografie Politechniki Krakowskiej, Seria: Inżynieria Sanitarna i Wodna, 235, Kraków.
- Węglarczyk S., 2010, *Statystyka w inżynierii środowiska*. Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej, Kraków.
- Wrzeziński D., 2013, *Entropia odpływu rzek w Polsce*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań.
- Yule G. U., Kendall M. G., 1966, *Wstęp do teorii statystyki*, PWN, Warszawa.

[Wpłynęło: wrzesień; poprawiono: grudzień 2014 r.]

PAWEŁ JOKIEL, PRZEMYSŁAW TOMALSKI

HYDROLOGICAL SEASONS IN THE RIVERS OF CENTRAL POLAND

The article describes an attempt at the delimitation of hydrological seasons along rivers in line with a procedure proposed by the authors. Data from eleven selected water gauges located in central Poland were analysed and three new time series created on the basis of multiannual (1951-2002) series for daily discharges, i.e. the mean multiannual daily outflow (Qsr_d), coefficients of variation for daily outflows (Cv_d) and the daily outflows autocorrelation coefficient with at $k=1$ shift (Ra_d). Data for February 29th have been excluded from the analyses, given that these are only available every four years. Standardised data from each river then served as a basis for a procedure entailing hierarchical clustering in three-dimensional space (Qsr_d , Cv_d , Ra_d) based around Ward's method. The next step was to calculate the best number of classes distinguished by the hierarchical clustering (the GWZ criterion being chosen). The numbers of distinguished "types of days" range from 4 to 8 in the examined group of 11 rivers, and in the case of each water gauge a sufficiently long sequence of the same "types of days" is deemed to constitute a hydrological season. Remaining days were then added on to existing hydrological seasons, or else new seasons were created, in accordance with a procedure proposed by the Authors. Subsequent steps were ordered as follows:

1. A homonymous sequence of "type of days" lasting at least 10 days creates a hydrological season or the "core" of such a season,
2. In the case of a created hydrological season or core thereof, adjacent sequences of days of the same type comprising less than 10 elements are attached, though only if they are longer than the series of other types of day that separate them from a given season (or season core),
3. In the case of the remaining days not connected to the seasons, the assumption held that, if in a hydrograph section of length of or exceeding 10 days, more than 50% of these (6 or more) have the same "type of days", such a section also forms a core of hydrological season or can be connected to an adjacent season,

4. Homonymous sequences less than 10 days long are attached to adjacent hydrological seasons. Mean discharge determines attachment to either the “previous” or the “later” season.

The number of hydrological seasons distinguished ranges from 7 to 18 in the case of the 11 different rivers examined. The seasons differed in terms of level and variability of discharge, as well as autocorrelation. From among the 147 theoretically possible types of hydrological season in the 11 examined rivers, 19 types were actually identified. Their durations were of between 10 and 103 days. In 6 of the hydrological seasons established, the daily discharges are characterised by statistically-significant positive autocorrelation coefficients. This indicates that there are certain trends to the discharge. One of the seasons is characterised by a negative and statistically significant autocorrelation coefficient. This may indicate the presence of rhythm lasting longer than a year in the long-term scale and within a given stretch (or stretches) of the hydrograph, or it may attest to a stepwise change in discharge within a group of homonymous daily discharges. This season occurs only in one river (the Wolbórka), in late autumn and spring. The hydrographs of the Wolbórka, Ołobok and Czarna Maleniecka are the most fragmented (with respectively 18, 15 and 16 occurrences of different hydrological seasons). The hydrographs for the Ner, Grabia and Oleśnica are in turn the least differentiated. The quotient for the number of occurrences of all hydrological seasons during the year, and the number of identified seasons is in the range 1.6 to 3.6. Every hydrological season occurs 2-3 times on average within a river hydrograph.

