

SEZONY HYDROLOGICZNE W CZTERECH WYBRANYCH RZEKACH POLSKI O ZRÓŻNICOWANYCH WARUNKACH KSZTAŁTOWANIA SIĘ REŻIMU ODPIYU

BEATA STANISŁAWCZYK, PRZEMYSŁAW TOMALSKI

Pracownia Hydrologii i Gospodarki Wodnej, Uniwersytet Łódzki,
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

Abstract: The article describes an attempt at the delimitation of hydrological seasons in four rivers in Poland. The rivers are located in mountain (Raba), highland (Kamienna), lowland (Bzura) and lakeland (Pisa) areas. The number of hydrological seasons identified in the examined group of rivers equals 11. There are 4 seasons in each of the rivers. Each season may occur more than once a year in the studied river. Therefore, the number of occurrences of seasons varies from 9 to 19. The hydrographs of mountain rivers are more fragmented, while the lowland and lakeland rivers have longer seasons.

Keywords: hydrological seasons, rivers, Poland

WPROWADZENIE

Sekwencja faz odpływu w roku hydrologicznym może być bardzo zmienna w wieloleciu. Wynika to z niestacjonarności czynników klimatycznych determinujących odpływ. W obrębie hydrogramu przepływu wyróżnić można pewne mniej lub bardziej „stabilnie występujące” sekwencje dni o określonym charakterze odpływu (np. wczesnowiosenne wezbrania czy letnio-jesienne niżówki). Ich identyfikacja w poszczególnych przekrojach wodowskazowych umożliwia wyodrębnienie na rocznym hydrogramie odpływu pewnych okresów (sezonów) dość jednorodnych pod względem wielkości i charakteru zmienności przepływów.

W 1977 r. ukazała się praca J. Rotnickiej, w której autorka podjęła bardzo interesującą próbę identyfikacji tzw. okresów hydrologicznych, czyli ciągów dni w roku charakteryzujących się względnym podobieństwem w zakresie wielkości, dyspersji i charakteru stanu wody w rzece. W późniejszych latach badania te zostały rozszerzone obszarowo i merytorycznie, a sama metoda dopracowana od strony teoretycznej (Rotnicka 1988). Próby wydzielenia jednolitych okresów hydrologicznych podejmowali również Bartczak (2007) i Wrzesiński (2010). W metodach tych założono w sensie statystycznym, że kolejne wartości stanowią jedną realizację procesu (względem czasu). Odminną procedurę delimitacyjną zaproponowali Jokiel i Tomalski (2014). Polega ona na wydzieleniu

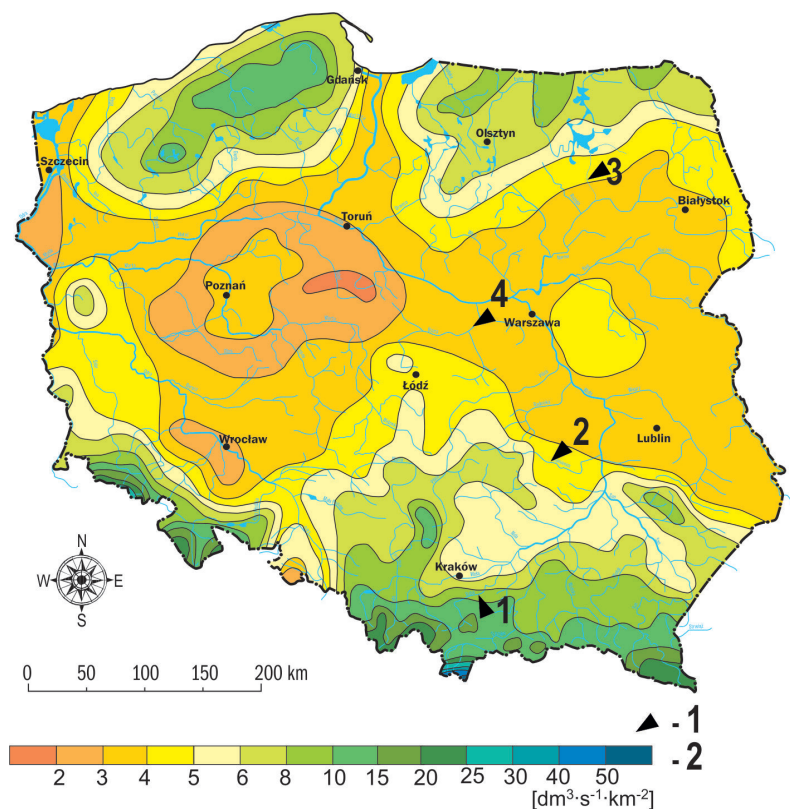
sezonów (okresów) na podstawie ciągów wielu realizacji przez statystyczną analizę podobieństwa szeregów jednoimiennych dni w skali wielolecia. Umożliwia to śledzenie sezonowej zmienności w obrębie rocznego hydrogramu przepływu rzeki oraz wieloletnich zmian jej ustroju wodnego. Zagadnienie to wydaje się szczególnie interesujące, gdyż sezonowy charakter przepływu rzeczno jest dziś znacząco modyfikowany przez działalność człowieka, w tym gospodarkę wodną. W szeregach przepływów dobowych można dostrzec różnokierunkowe tendencje występujące w różnych okresach i porach roku, wywołane przez szeroko pojętą działalność człowieka. Delimitacja sezonów hydrologicznych według omawianej procedury została na razie przeprowadzona jedynie dla rzek środkowej Polski (Jokiel, Tomalski 2015) oraz pojedynczych, wybranych rzek innych regionów kraju (Stanisławczyk, Tomalski 2015). Celem prezentowanego artykułu jest wydzielenie sezonów hydrologicznych w kolejnych rzekach odwadniających różne regiony Polski. Mała liczba przekrojów wodowskazowych objętych badaniem jest związana z dużą pracochłonnością procedury ich delimitacji. Uzyskane wyniki pozwolą stwierdzić, czy uchwycone różnice w liczbie i rodzaju sezonów hydrologicznych mają charakter międzyregionalny, czy są może indywidualnymi cechami badanych cieków.

OBSZAR BADAŃ I DANE ŹRÓDŁOWE

Do badań wytypowano cztery autochtoniczne rzeki z obszaru Polski, reprezentujące różnorodne warunki środowiskowe. W analizach uwzględniono cieki zarówno o charakterze górskim (Raba), wyżynnym (Kamienna), nizinnym (Bzura), jak i pojeziernym (Pisa). Umożliwia to ocenę wpływu warunków fizycznogeograficznych na specyfikę oraz liczbę wydzielonych sezonów hydrologicznych. Materiałem źródłowym były pozyskane z IMiGW-PIB dobowe przepływy tych rzek z wielolecia 1951–2010. Rozmieszczenie przekrojów wodowskazowych, z których pochodzą dane, przedstawiono na rycinie 1, a podstawowe informacje o badanych zlewniach zawarto w tabeli 1.

METODY BADAŃ

Na podstawie ciągów dobowych przepływów z wielolecia dla każdego przekroju utworzono trzy nowe, 365-elementowe szeregi czasowe: średnich wieloletnich przepływów w danym dniu ($Q_{\text{śrd}}$), współczynników zmienności jednoimiennych przepływów dobowych (C_{vd}) oraz współczynników autokorelacji w szeregach tych przepływów uzyskanych dla przesunięcia $k = 1$ (Rad). W analizach nie uwzględniono dnia 29 lutego ze względu na relatywnie niewielką liczbę wystąpień. Średni przepływ w danym dniu roku ($Q_{\text{śrd}}$) może być



Ryc. 1. Lokalizacja przekrojów wodowskazowych na tle średniego odpływu jednostkowego w Polsce (Jokiel 2004)

Objaśnienia: 1 – lokalizacja przekroju wodowskazowego (numeracja zgodna z tab. 1),
2 – średni odpływ jednostkowy w Polsce [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$].

Fig. 1. Locations of water gauges as set against their mean specific river runoff (Jokiel 2004)
Explanations: 1 – location of water gauge (numbering according to tab. 1), 2 – mean specific river runoff in Poland [$\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$].

Tabela 1. Podstawowe informacje o badanych rzekach i ich zlewniach
Table 1. Basic information about studied rivers and river catchments

Rzeka <i>River</i>	Wodowskaz <i>Water gauge</i>	Powierzchnia zlewni* <i>Catchment area</i> A [km^2]	Horyzont czasowy danych <i>Period</i>
Raba	Proszówki	1473	1956–2010
Kamienna	Kunów	1110	1958–2010
Pisa	Ptaki	3576	1959–2006
Bzura	Sochaczew	6258	1951–2006

*Źródło: Podział hydrograficzny Polski, 1983.

estymatorem przeciętnych zasobów wodnych w danym momencie hydrologicznego cyklu rocznego. Współczynnik zmienności (C_{vd}) można zaś uznać za estymator zmienności tychże zasobów w wieloleciu, a współczynnik autokorelacji (R_{ad} ; o ile jest istotny) można traktować jako miarę inercji odpływu wskazującą na występowanie trendu (jeśli jest istotny i dodatni) lub marker informujący o występowaniu rytmu w szeregu (jeśli jest istotny i ujemny). Statystyczna istotność obliczonych współczynników autokorelacji (na poziomie $\alpha = 0,05$) zbadano, opierając się na statystyce testowe Boxa–Ljunga (1978):

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

gdzie:

S_{bj} – statystyka testowa Boxa–Ljunga,

n – liczebność próby,

k – przesunięcie autokorelacji,

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

Trzy nowo utworzone szeregi czasowe wymienionych zmiennych cechują się różną wariancją i różnymi rozkładami, co mogłoby utrudniać zastosowanie niektórych procedur statystycznych. W związku z tym dokonano ich standaryzacji według prostej i często stosowanej procedury:

$$x_s = \frac{x_i - x_s}{\delta} \quad (2)$$

gdzie:

x_s – zmienna standaryzowana,

x_i – zmienna oryginalna,

\bar{x}_s – średnia arytmetyczna z próby,

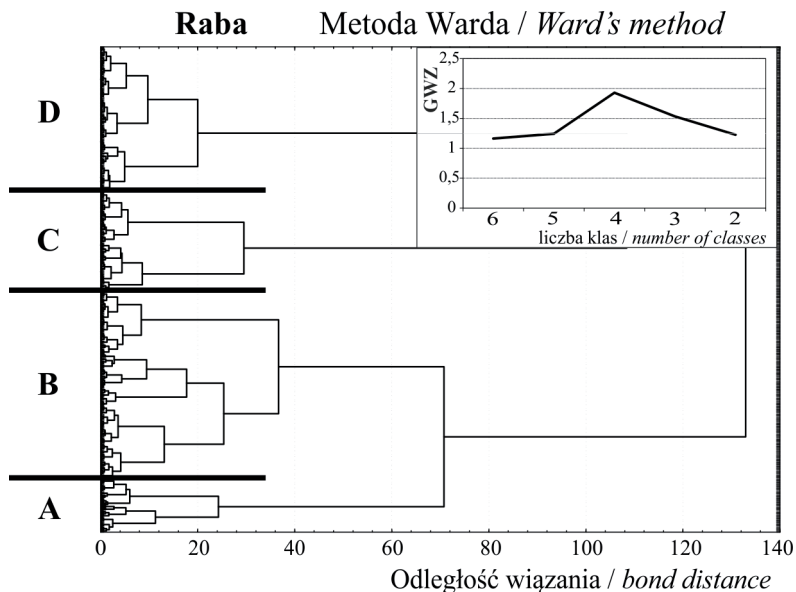
δ – odchylenie standardowe z próby.

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

DELIMITACJA SEZONÓW HYDROLOGICZNYCH

Trzy szeregi zmiennych standaryzowanych ($Q\bar{r}_d$, C_{vd} , R_{ad}) stały się podstawą przeprowadzenia, dla każdej rzeki, grupowania hierarchicznego. Pole-

ga ono na stopniowym łączeniu najbardziej podobnych do siebie obiektów (w tym przypadku dni) w skupienia. W wyniku ostatecznego połączenia wszystkich grup powstaje skupienie, które obejmuje cały 365-elementowy zbiór dni. W procedurze łączenia poszczególnych skupień wykorzystano metodę Warda. Kolejnym krokiem był wybór możliwie najlepszej liczby klas taksonomicznych (optymalnej liczby skupień). Powinien on zapewnić taki podział zbioru, w którym zostanie zachowane minimum różnic w obrębie wyróżnionych skupień i maksimum różnic między poszczególnymi skupieniami. Do wyboru optymalnej ich liczby spośród wielu proponowanych metod (Parysek 1982) zdecydowano się zastosować kryterium GWZ (wg Grabińskiego–Wydumusa–Zeliasa). W celu zastosowania tej metody w pierwszej kolejności należy obliczyć ilorazy odległości pomiędzy poszczególnymi skupieniami. Obliczenia rozpoczyna się od dwóch pierwszych skupień, następnie są one powtarzane dla coraz większej ich liczby. Otrzymane wyniki przedstawiono na wykresie, na którym oś pionowa odpowiada wielkości kryterium GWZ, a pozioma liczbie klas. Optymalną liczbę grup wyznacza wówczas pierwsze „lokalne maksimum” kryterium GWZ. Grupowanie metodą Warda oraz wykres wielkości kryterium GWZ pokazano na rycinie 2.



Ryc. 2. Dendrogram podobieństwa „typów dni” o podobnej dynamice przepływu i wartości kryterium wyboru najlepszej liczby klas taksonomicznych (GWZ) dla Raby

Fig. 2. Dendrogram of similarity of “types of days” with alike dynamic of discharge and the value of criterion the best number of classes (GWZ) for Raba river

Każda klasa taksonomiczna (grupa dni) odpowiada określonemu „typowi dni” na, przeciętnym z wielolecia rocznym hydrogramie przepływu rzeki. W obrębie jednego typu dni wielkości przepływów są podobne. Cechują się 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).

Dysponując informacjami o liczbie „typów dni” dla każdego badanego przekroju, można rozpocząć właściwą procedurę wydzielenia sezonów hydrologicznych. „Typy dni” dla każdej rzeki ułożono zgodnie z układem roku hydrologicznego. W jego obrębie dni określonego typu mogą układać się w zwarte i relatywnie długie okresy (np.: BBBBCCCCC), ale bardzo często występują naprzemiennie (np.: FDBACCDACEF). Konieczne stało się opracowanie procedury umożliwiającej łączenie różnych „typów dni” w dłuższe sekwencje, które mogłyby być poddane dalszej analizie. Wydzielony sezon ma takie same cechy jak „typ dni”, który go tworzy. Wydzielanie sezonów hydrologicznych przeprowadzono według poniższego czteroetapowego schematu zaproponowanego i opisanego przez Jokiela i Tomalskiego (2014):

1. Sezon hydrologiczny (lub „jądro” sezonu hydrologicznego) stanowi co najmniej 10-elementowa sekwencja dni tego samego typu.

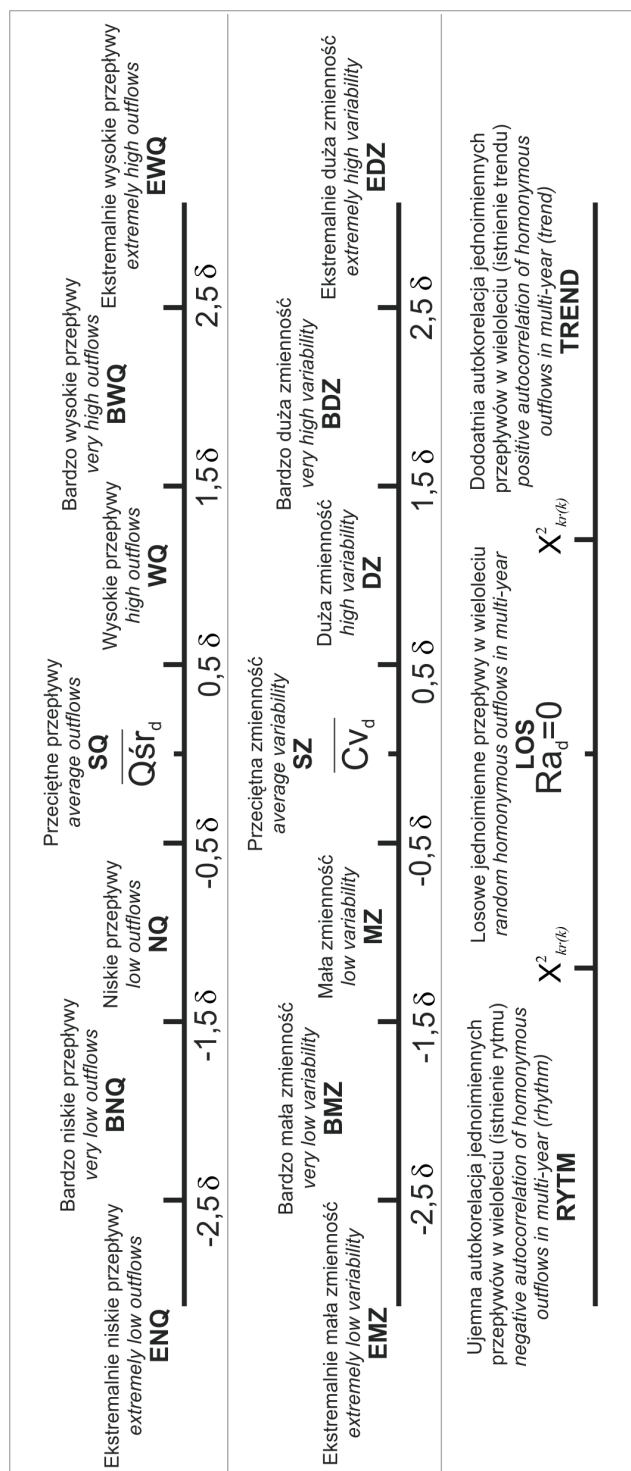
2. Do wyznaczonego w ten sposób sezonu (lub „jądra” tego sezonu) można dołączyć sąsiadujące, krótsze niż 10 elementów, serie jednoimiennych dni; warunkiem koniecznym jest to, aby serie te były dłuższe od sekwencji innych typów dni, które przedzielają je od tego sezonu (bądź „jądra” sezonu).

3. Z pozostałych dni, nieprzyłączonych do żadnego sezonu zgodnie z pkt 1–2, należy tworzyć na hydrogramie przepływu serie co najmniej 10-elementowe; jeżeli w danej sekwencji ponad połowa z dni (np.: dla 10-dniowej serii 6 bądź więcej) stanowi ten sam typ, to seria ta może utworzyć „jądro” nowego sezonu bądź istnieje możliwość jej przyłączenia do sąsiedniego sezonu.

4. Sekwencje dni tego samego typu obejmujące mniej niż 10 elementów należy przyłączyć do sąsiadujących sezonów, a wybór sezonu powinien być podyktowany wielkością średnich przepływów.

Powyższa procedura, której działanie przedstawiono na rycinie 3, umożliwia wydzielenie odpowiednio długich i jednorodnych okresów na rocznym hydrogramie przepływu dla każdej badanej rzeki, nazywanych sezonami hydrologicznymi. Należy zwrócić uwagę, iż dany sezon może wystąpić w poszczególnej rzece częściej niż raz w roku. Stwarza to dodatkową możliwość oceny stopnia rozczłonkowania hydrogramu przepływu każdej badanej rzeki.

Nazwy poszczególnych sezonów zostały sformułowane według jednolitego schematu w taki sposób, aby już na wstępie wskazywały na ich cechy charakterystyczne. Do tego celu dla każdego sezonu hydrologicznego obliczono średnie oraz odchylenia standardowe dla szeregów średnich przepływów dobowych (Q_{sr_d}) oraz współczynników zmienności jednoimiennych przepływów



Ryc. 4. Schemat tworzenia nazwy sezonu hydrologicznego na podstawie charakterystycznych dla niego cech wieloletniej dynamiki odpływu rzecznoego (Jokiel, Tomalski 2014)

Objaśnienia: δ – odchylenie standardowe analizowanych zmiennych; $\overline{Q_{\text{śrd}}}$ – 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, $X^2_{kr(k)}$ – wartości krytyczne statystyki testowej S_{bj} .

Fig. 4. Scheme for the naming of hydrological seasons on the basis of features characteristic for its long-term outflow dynamics (Jokiel, Tomalski 2014)

Explanations: δ – standard deviation of the examined characteristics, $\overline{Q_{\text{śrd}}}$ – mean daily outflow in the 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, $X^2_{kr(k)}$ – critical values for test statistic S_{bj} .

Tabela 2. Sezony hydrologiczne wydzielone w badanej grupie rzek
Table 2. Hydrological seasons delimited in studied group of rivers

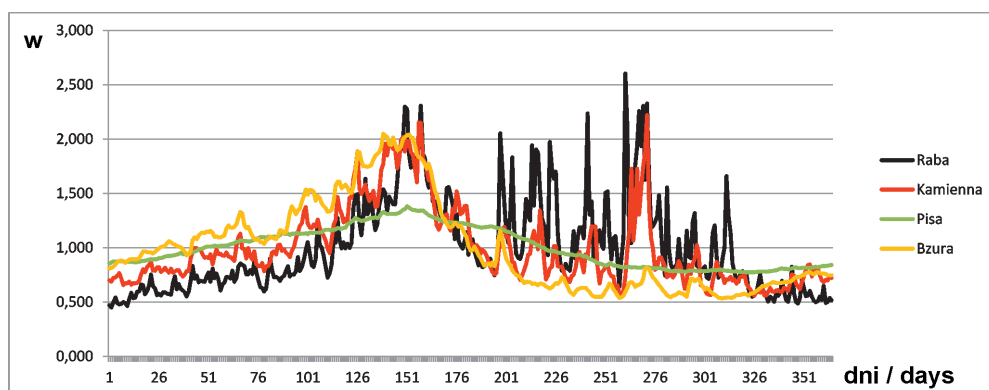
Nr No.	Charakterystyczne cechy sezonu hydrologicznego <i>Characteristics of hydrological season</i>	Symbol sezonu <i>Season' symbol</i>	L
1	bardzo wysokie przepływy, bardzo duża zmienność, brak autokorelacji	BWQ/BDZ/LOS	1
2	wysokie przepływy, przeciętna zmienność, brak autokorelacji	WQ/SZ/LOS	3
3	wysokie przepływy, mała zmienność, ujemna autokorelacja	WQ/MZ/RYSM	1
4	przeciętne przepływy, bardzo duża zmienność, brak autokorelacji	SQ/BDZ/LOS	1
5	przeciętne przepływy, duża zmienność, brak autokorelacji	SQ/DZ/LOS	1
6	przeciętne przepływy, przeciętna zmienność, brak autokorelacji	SQ/SZ/LOS	2
7	przeciętne przepływy, przeciętna zmienność, dodatnia autokorelacja	SQ/SZ/TREND	1
8	niskie przepływy, przeciętna zmienność, brak autokorelacji	NQ/SZ/LOS	1
9	niskie przepływy, mała zmienność, brak autokorelacji	NQ/MZ/LOS	2
10	niskie przepływy, mała zmienność, dodatnia autokorelacja	NQ/MZ/TREND	2

L – liczba rzek, w których występuje dany sezon.

L – number of rivers in which a particular hydrological season was delimited.

wydzielono w okresie letnim. Charakteryzuje się on zdecydowanie większą zmiennością w wieloleciu (por. tab. 2). Ma to zapewne związek z nieco innym od pozostałych rzek pluwno-niwalnym reżimem odpływu cechującym tę rzekę (Dynowska 1994; Słowik-Opoka, Brożek 2015).

Ponad połowa sezonów hydrologicznych (6 z 10) została wyróżniona tylko



Ryc. 5. Dobowe współczynniki przepływu (w) w wybranych rzekach Polski

Fig. 5. Daily discharge coefficients (w) in the selected rivers of Poland

w jednej spośród badanych rzek (sezony: 1, 3, 4, 5, 7, 8) i reprezentuje przepływy od bardzo wysokich po niskie. Należy podkreślić, iż wybrane zlewnie charakteryzują się odmiennymi warunkami fizycznogeograficznymi, które wpływają również na różnice w sezonowym rozmieszczeniu odpływu rzeczno. Może to oznaczać, iż pojedynczo występujący sezon jest charakterystyczny albo dla danej rzeki, albo dla obszaru, który ona odwadnia.

W rzekach analizowanego zbioru zidentyfikowano od trzech (Bzura) do czterech typów sezonów hydrologicznych (tab. 3). Warto zauważyć, iż badane rzeki są zróżnicowane pod względem liczby sezonów w obrębie średniego rocznego hydrogramu przepływu. Sezon może pojawić się w danej rzece tylko raz, czego przykładem jest sezon 2 lub 7 w Kamiennej. Zdecydowana większość sezonów występuje nawet kilka razy w konkretnej rzece. W badanym zbiorze szczególną uwagę zwraca sezon 9 w Rabe, który zidentyfikowano aż siedmiokrotnie na rocznym hydrogramie przepływu tej rzeki. Ostatecznie w badanej grupie rzek wydzielono od siedmiu (w Pisie) do 19 (w Rabe) sezonów hydrologicznych. Przekłada się to bezpośrednio na zróżnicowanie analizowanych rzek pod względem średniej liczby wystąpień pojedynczego sezonu w ciągu roku. Co więcej, wydzielone sezony różnią się także czasem trwania – od założonego w procedurze delimitacyjnej minimum 10 dni (sezon 10 w Rabe) do 133 dni (sezon 9 w Pisie).

Tabela 3. Liczba wyróżnionych sezonów hydrologicznych i ich wystąpień w obrębie średniego rocznego hydrogramu przepływu rzeki

Table 3. Number of hydrological seasons distinguished and their occurrence within the mean annual outflow hydrograph of the river

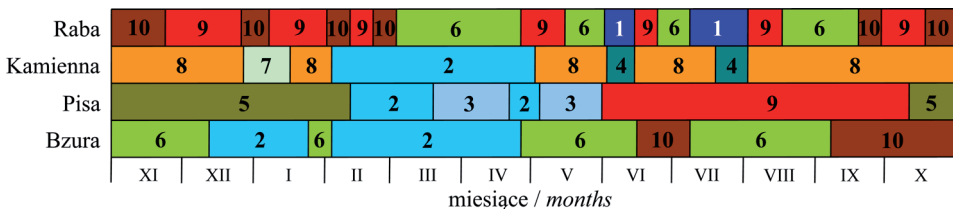
Rzeka <i>River</i>	Liczba sezonów hydrologicznych (numery sezonów) <i>Hydrological seasons amount (number of season)</i> [N]	Liczba wystąpień sezonów hydrologicznych <i>Number of occurrences of hydrological seasons</i> [n]	Średnia liczba wystąpień pojedynczego sezonu w ciągu roku <i>Average number of occurrences of single season in year</i> [L = n/N]
Raba	4 (1, 6, 9, 10)	19	4,8
Kamienna	4 (2, 4, 7, 8)	9	2,3
Pisa	4 (2, 3, 5, 9)	7	1,8
Bzura	3 (2, 6, 10)	8	2,7

Najbardziej „rozcłonkowany” jest hydrogram przepływu Raby – średnia liczba wystąpień pojedynczego sezonu w ciągu roku wynosi tutaj 4,8 i jest najwyższa nie tylko w badanym zbiorze (por. tab. 3), ale również w odniesieniu do analizowanych rzek innych regionów Polski (Jokiel, Tomalski 2014; Jokiel, Tomalski 2015; Stanisławczyk, Tomalski 2015). Wydaje się, że na liczbę

wydzielonych sezonów hydrologicznych decydujący wpływ mogą mieć warunki fizycznogeograficzne zlewni. Najwięcej sezonów hydrologicznych wydzielono w rzece górskiej, gdzie ukształtowanie powierzchni oraz budowa geologiczna wpływają na małą retencyjność zlewni oraz większą dynamikę odpływu rzeczno-geologicznego (Byczkowski 1996). Najmniejszą liczbą wystąpień sezonów hydrologicznych charakteryzuje się rzeka, która ma w swym systemie jeziora (Pisa). Obiekty te wpływają na zmiany sezonowego rozmieszczenia odpływu, polegające na wyrównaniu przepływu rzeczno-geologicznego w ciągu roku. Powyższe spostrzeżenia zdają się potwierdzać wyniki wcześniejszych badań, dotyczących wydzielenia sezonów hydrologicznych w rzekach odwadniających różne regiony Polski (Stanisławczyk, Tomalski 2015). Również z porównania dobowych współczynników przepływu w czterech badanych rzekach z wydzielonymi sezonami hydrologicznymi wynika (ryc. 5 i tab. 3), że cieki o mniejszej krótkookresowej zmienności współczynnika przepływu odznaczają się mniejszą liczbą wystąpień sezonów hydrologicznych i przeciętnie większą ich długością.

W przypadku dwóch wyróżnionych sezonów hydrologicznych (sezon 7 i 10) obliczone współczynniki autokorelacji (R_{ad}) są dodatnie i istotne statystycznie. Aby potwierdzić istnienie wieloletnich tendencji zmian średnich przepływów dobowych w tych sezonach oraz określić ich kierunek, obliczono dla każdego roku i dla każdego przekroju wodowskazowego minimalne, średnie i maksymalne przepływy dobowe z dni należących do wymienionych sezonów hydrologicznych. W obrębie tak otrzymanych nowych szeregów czasowych testowano hipotezę o istnieniu trendu natężenia przepływu dla każdej rzeki. Weryfikację przeprowadzono za pomocą medianowej odmiany nieparametrycznego testu serii na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ (Tomalski, Tomaszewski 2015).

Sezon 7 charakteryzuje się przeciętnymi przepływami oraz przeciętną zmiennością i występuje w Kamiennej w chłodnej porze roku (od końca grudnia do połowy stycznia; ryc. 6). Weryfikacja testem statystycznym potwierdziła istnienie w obrębie tego sezonu wieloletniej tendencji natężenia przepływu w jednoimiennych dniach w wieloleciu. Przepływy wysokie i średnie istotnie maleją



Ryc. 6. Sezony hydrologiczne w wybranych rzekach Polski
Objaśnienia: numery sezonów zgodne z tab. 2.

Fig. 6. Hydrological seasons in the selected rivers of Poland
Explanations: Numbers of seasons according to Tab. 2.

(współczynniki kierunkowe linii regresji są ujemne i wynoszą odpowiednio: $-0,732$ oraz $-0,058$). Sytuacja ta nie dotyczy stanów minimalnych w tym sezonie. Wydaje się, iż przyczyną występowania tej tendencji jest funkcjonowanie powyżej badanego posterunku wodowskazowego wielu sztucznych zbiorników oddawanych do użytku od roku 1964 (Brody Iłżeckie; Fal i in. 1997) do 2005 (Wióry; *Zbiornik wodny Wióry...*, 2017). Obecnie na Kamiennej i jej dopływach funkcjonuje dziewięć większych zbiorników. Ich zasadniczym zadaniem jest wyrównywanie przepływu rzecznego, a w szczególności obniżanie przepływów wysokich, co znacząco zmniejsza ryzyko wystąpienia powodzi w dolinie Kamiennej (Lenar-Matyas i in. 2006).

Drugi sezon cechujący się dodatnią autokorelacją zidentyfikowano w Rabie i Bzurze. Obejmuje niskie przepływy o małej zmienności (sezon 10). Na średnim rocznym hydrogramie odpływu Raby występuje w krótszych sekwencjach aż sześciokrotnie – od końca września do końca lutego – naprzemiennie z sezonem charakteryzującym się podobną wielkością i dynamiką odpływu oraz nieistotnym współczynnikiem autokorelacji w szeregu jednoimiennych przepływów dobowych (sezon 9). Na podstawie przeprowadzonej procedury testowania statystycznego w obrębie sezonu 10 dla Raby stwierdzono statystycznie istotną tendencję zmian natężenia przepływu dla przepływów wysokich i średnich (współczynniki kierunkowe wynoszą odpowiednio: $-0,305$ i $-0,006$). Należy podkreślić, że podobną wieloletnią tendencję zmian przepływu odnotowano w obrębie sezonu 7 w Kamiennej. Co więcej, w przypadku obu sezonów odznaczających się dodatnią autokorelacją współczynniki kierunkowe trendów są zdecydowanie wyższe dla przepływów wysokich niż dla średnich. Sukcesywne zmniejszanie się przepływów wysokich i średnich w obrębie sezonu 10 w Rabie może być również związane z funkcjonowaniem wielozadaniowego zbiornika wodnego oddanego do użytku w 1987 r. w Dobczycach. Pełni on funkcję nie tylko energetyczną i komunalną, ale także przeciwpowodziową (Starmach, Mazurkiewicz-Boroń 2000).

Inaczej jest w przypadku Bzury. Sezon 10 występuje tu latem i jesienią na przemian z sezonem o przeciętnych przepływach i przeciętnej zmienności. Na podstawie przeprowadzonej procedury testowania statystycznego w obrębie sezonu 10 stwierdzono statystycznie istotną tendencję zmian natężenia przepływu dla przepływów niskich (współczynnik kierunkowy $0,012$). Nieznaczny wzrost przepływów niskich w Bzurze być może jest związany z sukcesywnym rozwojem kanalizacji sanitarnej w zlewni Bzury. Szczególne znaczenie mają tu systemy średniej wielkości miast (Zgierza, Ozorkowa, Łęczycy, Łowicza, Kutna i Sochaczewa). Stała dostawa wód z oczyszczalni ścieków do Bzury powoduje wzrost przepływów niskich, istotnie zwiększając odpływ pochodzący z drenażu wód podziemnych. W ostatnich dwóch dziesięcioleciach dostawa ta zwiększała się sukcesywnie. W zlewni Bzury najwyższe wzrosty dotyczą powiatów kutnowskiego i łęczyckiego (o niemal 10%; *Raport o stanie...*, 2015).

Jeden z wydzielonych sezonów hydrologicznych (sezon 3) charakteryzuje się statystycznie istotnym ujemnym współczynnikiem autokorelacji w szeregach jednoimiennych przepływów dobowych w wieloleciu. Cechuje się wysokimi przepływami o małej zmienności i został zidentyfikowany jedynie w Pisie. Sezon 3 występuje na rocznym hydrogramie przepływu tej rzeki dwukrotnie – w okresie wiosennych wezbrań roztopowych (marzec, kwiecień) oraz w maju. Na hydrogramie przepływów jest przedzielony sekwencją dni charakteryzujących się wysokimi przepływami i przeciętną zmiennością (sezon 2). Z ujemnego współczynnika autokorelacji może wynikać, że w danej sekwencji dni występuje w wieloleciu rytm w szeregu jednoimiennych przepływów dobowych inny niż roczny lub zmiany mają charakter skokowy. Ich geneza pozostaje jednak niejasna.

Badane rzeki są zróżnicowane, biorąc pod uwagę termin występowania oraz czas trwania sezonów hydrologicznych (ryc. 6). Jedyne podobieństwo można zauważyć w przypadku sezonu wysokich przepływów o przeciętnej zmienności (sezon 2). Sezon ten w analizowanych rzekach występuje w podobnych terminach, obejmujących okres wiosennych wezbrań roztopowych (luty–kwiecień). Jedyne w Bzurze obejmuje również okres roztopów śródzimowych. Wydaje się zatem, iż układ i rodzaj wydzielonych sezonów w obrębie średniego rocznego hydrogramu odpływu jest w głównej mierze związany z indywidualnymi cechami każdej z analizowanych rzek. Dla przykładu, w Rabie zaznacza się charakterystyczny dla tej rzeki karpackiej okres wczesnozimowych (listopad–grudzień) i zimowych (styczeń–luty) niżówek (sezon 9 i 10) oraz sekwencje krótkotrwałych i gwałtownych letnich wezbrań opadowych (sezon 1; Biernat 1987, 1994). Niestety nie udało się wydzielić dla tej rzeki sezonu wiosennych wezbrań roztopowych z powodów opisanych powyżej. Z kolei w pojeziernej Pisie sezon niskich przepływów o małej zmienności (sezon 9) obejmuje niemal całe półrocze ciepłe. Związane jest to z występowaniem jezior w sieci rzecznej wyrównujących odpływ w ciągu roku oraz ze wzmożonym parowaniem terenowym na obszarze zlewni. Podobne zjawisko zanotowano w innych zlewniach pojeziernych (Stanisławczyk, Tomalski 2015).

WNIOSKI

Z przeprowadzonej próby wynika, że metoda wyodrębnienia na hydrogramie przepływu względnie jednorodnych sezonów hydrologicznych w cyklu rocznym w większości przypadków sprawdza się i może zostać użyta do opisu aktualnej zmienności, ale także zmian odpływu rzecznego w wieloleciu. Stosunkowo największym problemem jest wydzielenie sezonów hydrologicznych w okresach wezbraniowych o bardzo krótkim czasie trwania. Wynika to z przyjętej minimalnej długości pojedynczego sezonu (10 dni). Mimo tych zastrzeżeń w bardzo małej próbie rzek z obszaru Polski udało się uchwycić najważniejsze

różnice regionalne oraz indywidualne cechy badanych cieków w kształtowaniu się odpływu rzecznego:

- ciek pojezierny (Pisa) cechuje się wyraźnie mniejszą liczbą sezonów hydrologicznych,
- najbardziej „rozcłonkowany” hydrogram odpływu zanotowano dla cieków górskiego (Raba), gdzie ukształtowanie powierzchni oraz budowa geologiczna wpływają na małą retencyjność zlewni oraz większą dynamikę odpływu rzecznego,
- dodatnie i istotne statystycznie współczynniki autokorelacji średnich dobowych przepływów w analizowanej grupie rzek są związane z wpływem człowieka. W przypadku Kamiennej i Raby zmiany wywołała budowa i eksploatacja sztucznych zbiorników, a wykryte trendy w analizowanych sezonach hydrologicznych wskazują na duże spadki natężenia przepływu w obrębie wielkości maksymalnych i zdecydowanie mniejsze w obrębie wielkości średnich (wyrównywanie odpływu przez sztuczne zbiorniki). W przypadku Bzury zmiana polega na sukcesywnym wzroście przepływów niskich w wyniku zwiększającej się dostawy wód z oczyszczalni ścieków.

Zastosowana procedura jest jedną z propozycji wyodrębnienia na rocznym hydrogramie odpływu sezonów odznaczających się względnym podobieństwem wielkości i charakteru zmienności przepływów dobowych oraz poziomem autokorelacji jednoimiennych przepływów w wieloletniu. Należy ją jeszcze poddać dyskusji oraz wprowadzić pewne uzupełnienia czy zmiany. Jednak uzyskane wyniki wskazują, że możliwe jest jej zastosowanie do opisu zmienności odpływu dla obszaru całego kraju.

LITERATURA

- Bartczak A., 2007: *Wieloletnia zmienność odpływu rzecznego z dorzecza Zgłowiączki*, Pr. Geogr., IGI PAN, 209, Toruń, 164 ss.
- Biernat B., 1987: *Typowe okresy występowania niżówek*, [w:] J. Stachy (red.), *Atlas hydrologiczny Polski*, t. 1, Wydawnictwa Geologiczne, IMGW, Warszawa, 64.
- Biernat B., 1994: *Typowe okresy występowania wezbrań*, [w:] M. Najgrakowski (red.), *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*, cz. 2, Główny Geodeta Kraju, Warszawa, Karta, 32.3–32.5.
- Byczkowski A., 1996: *Hydrologia*, t. 2, Wyd. SGGW, Warszawa, 333 ss.
- Dynowska I., 1994: *Reżim odpływu rzecznego. Mapa 1 : 2 500 000*, [w:] M. Najgrakowski (red.), *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*, Główny Geodeta Kraju, Warszawa, Karta, 32.3–32.1.
- Fal B., Bogdanowicz E., Czernuszenko W., Dobrzyńska I., Koczyńska A., 1997: *Przepływy charakterystyczne głównych rzek polskich w latach 1951–1990*, Mat. Bad. – Ser. Hydrol. i Oceanol., IMGW, 21, Warszawa, 143 ss.
- Jokiel P., 2004: *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XX wieku*, Wyd. UŁ, Łódź, 114 ss.
- Jokiel P., Tomalski P., 2014: *Próba wyznaczenia sezonów hydrologicznych w obrębie rocznych hydrogramów przepływu wybranych rzek środkowej Polski*, [w:] A. Magnuszewski (red.), *Hydrologia w ochronie i kształtowaniu środowiska*, Monogr. Kom. Gosp. Wod. PAN, 20, t. 2, Warszawa, 203–217.

- Jokiel P., Tomalski P., 2015: *Sezony hydrologiczne w rzekach środkowej Polski*, Przegl. Geogr., 87, 1, 71–93.
- Kreyszig E., 1979: *Applied Mathematics*, Willey Press, New York, 880 ss.
- Lenar-Matyas A., Witkowska H., Żak A., 2006: *Rzeka Kamienna – zmiany na przestrzeni wieków i propozycja jej renaturyzacji*, Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 4, 2, 79–88.
- Ljung G.M., Box G.A.P., 1978: *On a Measure of a Lack of Fit in Time Series Models*, Biometrika, 65, 2, 297–303.
- Parysek J., 1982: *Modele klasyfikacji w geografii*, Wyd. UAM, Poznań, 224 ss.
- Podział hydrograficzny Polski, cz. I. Zestawienia liczbowo-opisowe*, 1983: IMGW, Warszawa, 924 ss.
- Raport o stanie środowiska w województwie łódzkim w 2015 roku*, 2016: Bibl. Monit. Środ., Łódź, 188 ss.
- Rotnicka J., 1977: *Teoretyczne podstawy wydzielenia okresów hydrologicznych i analizy reżimu rzecznoego na przykładzie rzeki Prosnny*, Pr. Kom. Geogr.-Geol. PTPN, XVIII, Poznań, 94 ss.
- Rotnicka J., 1988: *Taksonomiczne podstawy klasyfikacji reżimu rzecznoego*, Wyd. UAM, Poznań, 238 ss.
- Słowik-Opoka E., Brożek M., 2015: *Badanie wpływu zmian współczynnika szorstkości na wielkość przepływu obliczeniowego*, Landform Anal., 30, 49–56.
- Stanisławczyk B., Tomalski P., 2015: *Sezony hydrologiczne w sześciu wybranych rzekach Polski*, [w:] D. Absalon, M. Matysik, M. Ruman (red.), *Nowoczesne metody i rozwiązania w hydrologii i gospodarce wodnej*, Monogr. Kom. Hydrol. PTG, t. 3, Sosnowiec, 365–385.
- Starmach J., Mazurkiewicz-Boroń G., 2000: *Zbiornik Dobczycki – ekologia, eutrofizacja, ochrona*, Zakł. Biol. Wód – PAN, Kraków, 261 ss.
- Tomalski P., Tomaszewski E., 2015: *Metody, formuły i wzory obliczeniowe zastosowane w pracy*, [w:] P. Jokiel (red.), *Metody statystyczne w analizach hydrologicznych środkowej Polski*, Wyd. UŁ, Łódź, 215–272.
- Wrzesiński D., 2010: *Przestrzenne zróżnicowanie stabilności reżimu odpływu rzek europejskich*, Stud. i Pr. z Geogr. i Geol., 3, Wyd. Nauk. Bogucki, Poznań, 220 ss.
- Zbiornik wodny Wióry na Świślinie*, 2017: Regionalny Zarząd Gospodarki Wodnej w Warszawie, <<http://warszawa.rzgw.gov.pl/o-nas/nasze-obiekty/zbiorniki-i-kanaly/zbiornik-wodny-wiory-na-swislinie>> [dostęp: 07.05.2017].