

ZMIANY I WIELOLETNIA ZMIENNOŚĆ SEZONOWOŚCI PRZEPIYWU WYBRANYCH RZEK POLSKI

Paweł Jokiel, Beata Stanisławczyk

Long-term changes and variability in the seasonality of river discharge for selected Polish rivers

Abstract: The aim of the paper is to carry out a multi-faceted analysis of the changes and the multiannual variability of the seasonal structure of river runoff in Poland. The research study is focused on river catchments situated in various regions of Poland. The seasonality index (Markham 1970) is employed to provide an assessment of river discharge seasonality for a multi-year period using data obtained from 40 water gauges. The collected data include the daily discharge of the analyzed rivers in the period 1951–2010. Average seasonality indices of the discharge of the investigated rivers were computed. On the basis of average seasonality indices (8%–37%) and their variability levels in the studied multiannual period, it is possible to compute small differences in the magnitude and dynamics of the changes in the seasonal structure of river runoff and precipitation in the studied multiannual period (Kožuchowski, Wibig 1988) and the total outflow from river catchments in the central Poland (Bartnik, Jokiel 2001), respectively. At the same time, the seasonal structure of river runoff, it is conjectured, continually constitutes a stable part of the river regime in Poland over the years as well as across geographic space. However, statistically significant trends ($\alpha=0.05$) for the obtained seasonality indices of river discharge in the multiannual period was identified only for seven rivers. On the one hand, the data indicate that the smallest seasonality of river discharge is a characteristic of lake district rivers in northern Poland. On the other hand, by contrast, the best seasonal structure of river runoff is typical of Carpathian rivers distinguished by a pluvial-nival river regime as well as a nival-pluvial river regime, respectively. At the same time, the data suggest that lowland rivers characterized by a nival well-developed river regime also feature a better seasonal structure of river runoff. Correlation coefficients (r) between

the seasonality indices of river discharge of the studied rivers and the seasonality indices of river discharge of other rivers account for the fact that the seasonal structure of river runoff has changed almost simultaneously with rivers, which are situated close to one another. At the same time, the seasonal structure of river runoff has changed similarly to that of rivers, which drain the same regions of Poland.

Keywords: seasonality index, river runoff, Poland

Zarys treści: Celem opracowania jest wielopłaszczyznowa analiza zmian oraz wieloletniej zmienności sezonowej struktury odpływu rzecznego w zlewniach położonych w różnych regionach Polski. Oceny stopnia sezonowości przepływu poszczególnych rzek w wieloleciu dokonano na podstawie indeksu sezonowości zaproponowanego przez Markhama (1970). Materiał hydrometryczny stanowiły szeregi przepływów dobowych z 40 przekrojów wodowskazowych z wielolecia 1951–2010. Obliczone średnie indeksy sezonowości przepływów badanych rzek zawierające się w przedziale 8%–37% oraz zakres ich zmienności w wieloleciu, świadczą o podobieństwie skali i dynamiki zmian sezonowych przepływów do zmian zaobserwowanych w obrębie wieloletnich sum opadów atmosferycznych (Kożuchowski, Wibig 1988) oraz odpływów całkowitych ze zlewni z obszaru środkowej Polski (Bartnik, Jokiel 2001). Jednocześnie, jak się wydaje, sezonowa struktura odpływu rzecznego jest nadal w Polsce dość stabilnym w czasie i przestrzeni elementem ustroju rzecznego. Statystycznie istotne trendy ($\alpha=0,05$) w wieloletnich szeregach indeksów sezonowości zaobserwowano jedynie w siedmiu rzekach. Najmniejszą sezonowością przepływu charakteryzują się rzeki pojezierne i przymorskie. Najsilniej zarysowaną sezonową strukturę odpływu mają zaś rzeki karpackie o ustroju pluwialno-niwalnym oraz niwalno-pluwialnym, a także rzeki nizinne o ustroju niwalnym silnie wykształconym. Współczynniki korelacji wzajemnej obliczone dla szeregów czasowych rocznych indeksów sezonowości poszczególnych rzek dowodzą, że sezonowa struktura odpływu zmienia się w wieloleciu niemal synchronicznie w rzekach sąsiednich, a podobnie w rzekach odwadniających te same regiony.

Słowa kluczowe: indeks sezonowości, odpływ rzeczny, Polska

Wstęp

Analiza sezonowej zmienności przepływu rzecznego należy do najważniejszych nurtów badawczych współczesnej hydrologii. Jest ona jednocześnie ważnym ogniwem w procesie oceny i monitoringu ustroju hydrologicznego rzek. Znajomość wieloletnich zmian ustroju rzecznego oraz przekształceń jego sezonowej struktury posiada też wiele walorów praktycznych. Może być ona szeroko wykorzystywana w ocenach zasobności wodnej zlewni, badaniach wpływu fluktuacji i zmian klimatu na te zasoby oraz w analizach mających na celu prowadzenie racjonalnej gospodarki wodnej (Jokiel 2009).

Sezonowa zmienność natężenia przepływu rzek jest determinowana przez różne czynniki środowiskowe (stacjonarne i niestacjonarne) oraz ich losowe fluktuacje.

Jednocześnie jednak coraz większy wpływ wywiera na nią szeroko pojmowana działalność człowieka – antropopresja. „Ślady ludzkich stóp” znaleźć można bowiem nie tylko w obrębie samej tkanki wodnej i procesów hydrologicznych, ale także w niemal wszystkich ogniwach i obiektach związanych lub zależnych od krążenia wody.

Coraz więcej uwagi poświęca się zatem analizie długookresowej zmienności i zmian przepływu. Przekształcenie ustroju rzek w skali wieloletniej rozpatrywane jest często przez pryzmat stwierdzonych lub zakładanych postępujących zmian klimatycznych, w tym jako skutek globalnego ocieplenia (Jokiel 2004; Kundzewicz, Kowalczak 2008; Wrzesiński 2013). Wydaje się to uzasadnione, ponieważ wahania oraz fluktuacje klimatu i jego elementów wywierają niepodważalny wpływ na globalny cykl obiegu wody, a jednocześnie przyczyniają się do zwiększania gwałtowności oraz intensywności niektórych procesów hydrologicznych (Mujere, Eslamian 2014). W skali globalnej coraz częściej zwraca się uwagę na wzrost rocznych sum opadów atmosferycznych oraz wzrost parowania terenowego. Należy jednak zaznaczyć, że różnego rodzaju zmiany nie są równomiernie rozłożone ani w czasie, ani w przestrzeni. Na przykład zmiany sezonowej struktury opadów nie są w skali globalnej wyraźne, a te istotne ograniczają się tylko do niektórych regionów, np. Europy. Podobna tendencja dotyczy parowania terenowego, choć tutaj zagadnienie jest jeszcze bardziej skomplikowane, gdyż parowanie terenowe zależy nie tylko od parowania potencjalnego, lecz również od intensywności i sposobu użytkowania ziemi, a tu zmiany zachodzą w bardzo szybkim tempie – wskutek urbanizacji, wzrostu intensywności rolnictwa itp. W efekcie scenariusze zmian ewapotranspiracji są obciążone jeszcze większą niepewnością.

Przedstawione opracowanie zawiera analizę zmian i wieloletniej zmienności sezonowości przepływu wybranych rzek Polski w latach 1951–2010. Oceny stopnia sezonowości przepływu poszczególnych rzek, w każdym roku badanego wielolecia, dokonano na podstawie indeksu sezonowości zaproponowanego przez Markhama (Markham 1970; Bartnik, Jokiel 2001; Tomaszewski 2012; Jokiel 2015). W klasycznej formie indeks ten (wraz ze wskaźnikiem pory koncentracji) skonstruowany został do analizy wieloletniej zmienności opadów atmosferycznych (Kožuchowski, Wibig 1988). Miara ta znalazła także zastosowanie w badaniach sezonowości różnych zmiennych hydrologicznych między innymi faz i form odpływu rzeczno (Tomaszewski 2001; Bartnik 2005; Jokiel 2009), wahań zwierciadła płytkich wód podziemnych (Tomalski 2010) i właściwości fizykochemicznych wód podziemnych i powierzchniowych (Stolarska 2008).

Indeks sezonowości pozwala zbadać kierunek zmian sezonowej struktury odpływu rzeczno w wielolecie, a także uchwycić tendencje i prawidłowości regionalne. Pochodne tej miary, np. jej współczynnik zmienności wieloletniej, umożliwiając ocenę stabilności sezonowej struktury odpływu w wielolecie, współczynniki korelacji wzajemnej indeksów sezonowości różnych rzek wskazują zaś na podobieństwa lub

różnice regionalne w charakterze zmian sezonowości. Celem artykułu jest wielopłaszczyznowa ocena wieloletnich zmian sezonowej struktury odpływu ze zlewni położonych w różnych regionach Polski.

Materiały i metody

Dane hydrologiczne

Materiałem hydrometrycznym wykorzystanym do realizacji celu badawczego prezentowanego opracowania były szeregi przepływów dobowych z pochodzące z 40 przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na większych rzekach Polski. Dane te pozyskano z bazy cyfrowej IMiGW PIB. Pochodzą one z wielolecia 1951–2010, ale długość poszczególnych serii pomiarowych, jak i ich horyzont czasowy są różne – od 48 do 60 lat (tab. 1) i zależą od różnego terminu rozpoczęcia oraz zakończenia

Tab. 1. Podstawowe informacje o badanych rzekach
Table 1. Basic information about the examined rivers

| Lp. No. | Rzeka River | Wodowskaz Water gauge | Horyzont czasowy serii Time bracket for data | A [km ²] | NNQ [m ³ ·s ⁻¹] | SSQ [m ³ ·s ⁻¹] | WWQ [m ³ ·s ⁻¹] |
|---------|--------------|-----------------------|--|----------------------|--|--|--|
| 1 | Mała Panew | Staniszczce Wielkie | 1956–2010 | 1 101 | 1,48 | 7,65 | 238,0 |
| 2 | Nysa Kłodzka | Kłodzko | 1951–2010 | 1 081 | 0,94 | 12,97 | 693,0 |
| 3 | Oława | Oława | 1951–2010 | 936 | 0,01 | 3,50 | 53,4 |
| 4 | Bystrzyca | Jarnołtów | 1959–2010 | 1 721 | 0,96 | 9,44 | 445,0 |
| 5 | Bóbr | Żagań | 1953–2010 | 4 255 | 6,50 | 38,00 | 847,0 |
| 6 | Warta | Działoszyn | 1951–2010 | 4 094 | 6,74 | 24,85 | 272,0 |
| 7 | Prosna | Bogusław | 1951–2010 | 4 282 | 1,65 | 16,17 | 230,0 |
| 8 | Wełna | Pruśce | 1951–2006 | 1 146 | 0,15 | 3,46 | 36,9 |
| 9 | Gwda | Ptusza | 1959–2006 | 2 052 | 2,15 | 11,32 | 50,0 |
| 10 | Drawa | Drawiny | 1960–2010 | 3 281 | 7,91 | 21,33 | 51,0 |
| 11 | Ina | Goleniów | 1956–2010 | 2 138 | 1,94 | 13,22 | 86,4 |
| 12 | Przemsza | Jeleń | 1958–2010 | 2 006 | 10,20 | 19,19 | 104,0 |
| 13 | Soła | Oświęcim | 1958–2010 | 1 357 | 0,83 | 20,93 | 1742,0 |
| 14 | Skawa | Wadowice | 1958–2010 | 833 | 0,69 | 12,90 | 529,0 |
| 15 | Raba | Proszówki | 1956–2010 | 1 473 | 0,46 | 17,08 | 1220,0 |

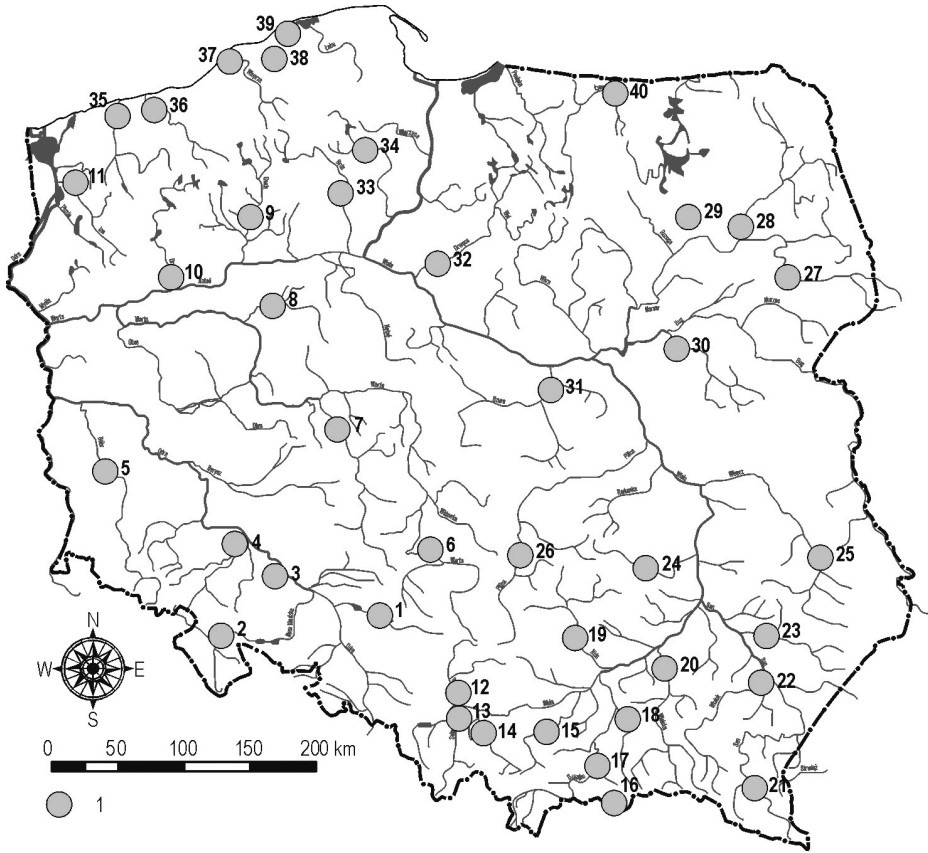
| Lp. No. | Rzeka River | Wodowskaz Water gauge | Horyzont czasowy serii Time bracket for data | A [km ²] | NNQ [m ³ ·s ⁻¹] | SSQ [m ³ ·s ⁻¹] | WWQ [m ³ ·s ⁻¹] |
|---------|-------------|-----------------------|--|----------------------|--|--|--|
| 16 | Poprad | Muszyna | 1951–2006 | 1 519 | 2,00 | 17,18 | 451,0 |
| 17 | Dunajec | Nowy Sącz | 1956–2010 | 4 337 | 6,00 | 65,84 | 2690,0 |
| 18 | Biała | Koszyce Wielkie | 1951–2010 | 955 | 0,43 | 8,89 | 621,0 |
| 19 | Nida | Pińczów | 1958–2010 | 3 323 | 3,16 | 18,76 | 519,0 |
| 20 | Wisłoka | Mielec | 1956–2010 | 3 888 | 2,25 | 35,92 | 1170,0 |
| 21 | San | Lesko | 1956–2010 | 1 617 | 0,26 | 28,51 | 937,0 |
| 22 | Wisłok | Tryńcza | 1957–2010 | 3 524 | 2,40 | 28,17 | 975,0 |
| 23 | Tanew | Harasiuki | 1958–2006 | 2 035 | 2,90 | 12,09 | 237,0 |
| 24 | Kamienna | Kunów | 1958–2010 | 1 110 | 0,64 | 5,88 | 455,0 |
| 25 | Wieprz | Krasnystaw | 1956–2010 | 3 010 | 3,55 | 12,58 | 300,0 |
| 26 | Pilica | Przedbórz | 1951–2010 | 2 550 | 2,55 | 15,34 | 311,0 |
| 27 | Narew | Suraż | 1956–2010 | 3 425 | 1,68 | 15,16 | 250,0 |
| 28 | Biebrza | Burzyn | 1953–2010 | 6 929 | 4,33 | 34,62 | 857,0 |
| 29 | Pisa | Ptaki | 1959–2006 | 3 576 | 5,50 | 20,67 | 85,9 |
| 30 | Liwiec | Łochów | 1957–2010 | 2 471 | 1,15 | 10,71 | 276,0 |
| 31 | Bzura | Sochaczew | 1951–2010 | 6 258 | 2,40 | 22,59 | 480,0 |
| 32 | Drwęca | Elgiszewo | 1959–2010 | 5 019 | 8,88 | 29,08 | 150,0 |
| 33 | Brda | Tuchola | 1959–2010 | 2 477 | 7,35 | 19,59 | 48,9 |
| 34 | Wda | Czarna Woda | 1959–2006 | 828 | 2,31 | 6,33 | 17,2 |
| 35 | Rega | Trzebiatów | 1959–2010 | 2 644 | 6,33 | 20,66 | 96,0 |
| 36 | Parsęta | Bardy | 1957–2010 | 2 885 | 9,90 | 27,75 | 140,0 |
| 37 | Wieprza | Stary Kraków | 1951–2010 | 1 542 | 5,60 | 15,80 | 75,1 |
| 38 | Słupia | Słupsk | 1956–2010 | 1 453 | 4,55 | 15,84 | 56,2 |
| 39 | Łupawa | Smóldzino | 1951–2010 | 807 | 3,15 | 8,34 | 39,7 |
| 40 | Łyna | Sępól | 1959–2010 | 3 640 | 4,60 | 24,55 | 162,0 |

Objaśnienia: A – powierzchnia zlewni [km²]; NNQ – najniższy niski przepływ [m³·s⁻¹]; SSQ – średni przepływ [m³·s⁻¹]; WWQ – wielki wysoki przepływ [m³·s⁻¹]

Explanations: A – catchment area [km²]; NNQ – minimum river discharge [m³·s⁻¹]; SSQ – mean river discharge [m³·s⁻¹]; WWQ – maximum river discharge [m³·s⁻¹]

Źródło: Roczniki Hydrologiczne Wód Powierzchniowych (dorzecza: Odry i Wisły), 1951–2010, IMGW, Warszawa.

Source: Hydrological Yearbooks of Surface Waters (Drainage Basins: Oder River, Vistula River), 1951–2010, Ed. Institute of Meteorology and Water Management, Warszawa.



Ryc. 1. Rozmieszczenie badanych posterunków wodowskazowych (numery jak w tab. 1)

Fig. 1. Location of the analyzed water gauges (numbering according to Tab. 1)

Objaśnienia: 1 – posterunek wodowskazowy

Explanations: 1 – water gauge

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

pomiarów w poszczególnych przekrojach. Wielkość zlewni zamkniętych wskazanymi przekrojami jest także zróżnicowana i zawiera się w przedziale od ok. 807 km² (Łupawa w Smóldzinie) do 6 929 km² (Biebrza w Burzynie). Są to zatem zlewnie autochtoniczne, średniej wielkości, zamknięte wodowskazami o wiarygodnych i pełnych seriach dobowych przepływów dłuższych niż 48 lat. Średnia powierzchnia zlewni wynosi 2 590 km², co druga z nich jest natomiast większa od 2 300 km² (mediana *A*).

Rozmieszczenie wybranych posterunków wodowskazowych przedstawiono na ryc. 1. Analizowane zlewnie są położone w obrębie różnych regionów Polski, tym samym reprezentują obszary o bardzo zróżnicowanych warunkach fizycznogeograficznych. Równocześnie badane przekroje wodowskazowe są dość równomiernie rozmieszczone na terenie Polski i w ocenie autorów mogą stanowić próbę wystarczającą do analizy zjawiska w skali krajowej.

Metoda obliczenia indeksów sezonowości

Procedurę obliczenia rocznych indeksów sezonowości IS_i przeprowadzono, biorąc za podstawę średnie miesięczne przepływy badanych rzek w poszczególnych latach wielolecia. Po odpowiednich przekształceniach poniższych wzorów obliczenia można także przeprowadzić, opierając się na szeregach przepływów dobowych.

Indeks sezonowości IS_i w danym roku oblicza się przy założeniu, że przepływ średni w danym miesiącu *j* reprezentowany jest przez wektor (r_{sj}) o długości proporcjonalnej do średniego przepływu miesięcznego i kącie nachylenia (α_{sj}), uzależnionego od położenia środka danego miesiąca względem początku roku hydrologicznego (1 listopada):

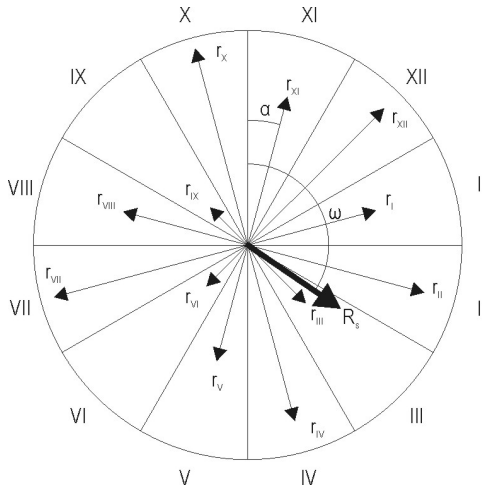
$$\alpha_{sj} = \frac{360 \cdot L_s}{365} \quad (1)$$

gdzie:

α_{sj} – kąt nachylenia wektora r_{sj} wartości miesięcznych [°],

L_s – liczba dni między początkiem roku hydrologicznego a środkiem danego miesiąca.

Dla danego roku powstaje 12 wektorów (miesięcznych), z których wyznaczamy wektor wypadkowy R_s (iloczyn wektorów) o module $|R_s|$ i kierunku ω (ryc. 2). Dzieląc długość wektora wypadkowego $|R_s|$ przez sumę długości wektorów cząstkowych $|r_{sj}|$, uzyskujemy indeks sezonowości – IS_i .



Ryc. 2. Schemat konstrukcji indeksu sezonowości

Fig. 2. Structure of the seasonality index

Objaśnienia: r_{XP} , r_{XIP} , r_P , ..., r_X – wektory odpowiadające średnim przepływom w danym miesiącu roku hydrologicznego; α – kąt wskazujący na położenie środka listopada względem początku roku hydrologicznego [°]; R_s – wektor wypadkowy dla wektorów cząstkowych (r_{XP} , r_{XIP} , r_P , ..., r_X); ω – kąt nachylenia wektora wypadkowego R_s względem początku roku hydrologicznego [°]

Explanations: r_{XP} , r_{XIP} , r_P , ..., r_X – vectors based on mean river discharge for the particular month of a hydrological year;

α – angle showing the midpoint position of November in relation to the beginning of a hydrological year [°]; R_s – resultant vector for partial vectors (r_{XP} , r_{XIP} , r_P , ..., r_X); ω – angle between the resultant vector R_s and the beginning of a hydrological year [°]

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

$$IS_i = \frac{|R_s|}{\sum_{j=1}^{12} |r_{Sj}|} \cdot 100\% \quad (2)$$

gdzie:

IS_i – indeks sezonowości w roku hydrologicznym i [%],

$|R_s|$ – długość wektora wypadkowego z wektorów r_{Sj} ,

$|r_{Sj}|$ – długość wektora odpowiadającego średniej wartości cechy w j -tym miesiącu roku hydrologicznego i .

Teoretycznie indeks sezonowości przyjmuje wartości z przedziału od 0% do 100%, a wraz z jego wzrostem rośnie poziom sezonowości badanej cechy. Wartość indeksu równa „0” wystąpić może w dwóch przypadkach: gdy zachodzi idealnie równomierne

rozłożenie badanej cechy we wszystkich miesiącach (długość wszystkich 12 wektorów jest taka sama) lub wówczas, gdy przepływ koncentruje się (występuje wyłącznie) w dwu przeciwstawnych miesiącach (przesuniętych względem siebie o pół roku, np. w styczniu i w lipcu). Indeks ten nie powinien być również stosowany do analiz sezonowości odpływu rzek epizodycznych. Stąd interpretacja IS_i musi być ostrożna, zwłaszcza w sytuacjach gdy ustrój wodny rzeki jest złożony.

Wyniki

Zróźnicowanie indeksów sezonowości odpływu rzek

Obliczono łącznie 2 192 indeksy sezonowości dla 40 przekrojów wodowskazowych i badanych wieloleci. Średnie i ekstremalne IS oraz współczynniki ich zmienności w wieloleciach są zawarte w tab. 2. Ze względu na fakt, że rozkłady IS_i nie są znane, do zaprezentowania zróźnicowania indeksów na diagramach typu *box & whisker*

Tab. 2. Indeksy sezonowości przepływów (IS) badanych rzek

Table 2. Seasonality indices of river discharge (IS) for the examined rivers

| Lp. No. | Rzeka River | Wodowskaz Water gauge | IS_{sr} [%] | $IS_{min(rok)}$ [%] | $IS_{max(rok)}$ [%] | CV_{IS} [%] |
|---------|--------------|-----------------------|---------------|-----------------------|------------------------|---------------|
| 1 | Mała Panew | Staniszczce Wielkie | 25,3 | 1,8 ₍₁₉₇₇₎ | 46,7 ₍₁₉₆₇₎ | 43,41 |
| 2 | Nysa Kłodzka | Kłodzko | 24,7 | 4,7 ₍₁₉₇₅₎ | 56,2 ₍₂₀₀₄₎ | 46,30 |
| 3 | Oława | Oława | 19,6 | 1,4 ₍₁₉₇₄₎ | 47,8 ₍₁₉₅₃₎ | 54,35 |
| 4 | Bystrzyca | Jarnołtów | 25,4 | 6,3 ₍₁₉₅₉₎ | 56,6 ₍₁₉₉₇₎ | 45,03 |
| 5 | Bóbr | Żagań | 24,1 | 7,4 ₍₁₉₇₄₎ | 42,0 ₍₁₉₉₂₎ | 37,56 |
| 6 | Warta | Działoszyn | 17,4 | 1,2 ₍₁₉₇₇₎ | 33,4 ₍₁₉₅₃₎ | 44,44 |
| 7 | Prosna | Bogusław | 31,8 | 0,7 ₍₁₉₈₄₎ | 61,5 ₍₁₉₅₃₎ | 38,33 |
| 8 | Wełna | Prušce | 37,0 | 7,2 ₍₁₉₉₇₎ | 65,7 ₍₁₉₇₀₎ | 36,54 |
| 9 | Gwda | Ptusza | 15,2 | 3,3 ₍₂₀₀₁₎ | 28,5 ₍₁₉₉₄₎ | 43,32 |
| 10 | Drawa | Drawiny | 14,0 | 3,1 ₍₁₉₉₆₎ | 26,2 ₍₁₉₉₄₎ | 38,29 |
| 11 | Ina | Goleniów | 23,8 | 3,2 ₍₁₉₉₃₎ | 47,6 ₍₁₉₇₀₎ | 46,01 |
| 12 | Przemsza | Jeleń | 8,5 | 1,0 ₍₁₉₉₀₎ | 20,8 ₍₁₉₆₂₎ | 52,37 |
| 13 | Soła | Oświęcim | 31,1 | 3,8 ₍₁₉₇₅₎ | 65,9 ₍₁₉₉₄₎ | 49,14 |
| 14 | Skawa | Wadowice | 27,0 | 2,2 ₍₁₉₉₀₎ | 56,0 ₍₁₉₆₂₎ | 45,87 |
| 15 | Raba | Proszówki | 31,7 | 7,0 ₍₁₉₈₁₎ | 59,2 ₍₁₉₈₇₎ | 38,91 |
| 16 | Poprad | Muszyna | 31,8 | 7,2 ₍₁₉₅₃₎ | 55,3 ₍₁₉₆₂₎ | 35,91 |

| Lp. No. | Rzeka River | Wodowskaz Water gauge | IS_{sr} [%] | $IS_{min(rok)}$ [%] | $IS_{max(rok)}$ [%] | CV_{IS} [%] |
|---------|-------------|-----------------------|---------------|------------------------|------------------------|---------------|
| 17 | Dunajec | Nowy Sącz | 30,8 | 3,7 ₍₂₀₀₇₎ | 54,5 ₍₁₉₈₇₎ | 37,96 |
| 18 | Biała | Koszyce Wielkie | 34,9 | 2,2 ₍₂₀₀₂₎ | 68,6 ₍₁₉₆₄₎ | 39,76 |
| 19 | Nida | Pińczów | 25,0 | 3,5 ₍₁₉₅₉₎ | 46,9 ₍₁₉₆₄₎ | 38,22 |
| 20 | Wisłoka | Mielec | 32,7 | 8,0 ₍₂₀₀₈₎ | 55,5 ₍₁₉₆₄₎ | 33,57 |
| 21 | San | Lesko | 28,3 | 5,7 ₍₁₉₇₁₎ | 66,9 ₍₁₉₆₂₎ | 45,46 |
| 22 | Wisłok | Tryńcza | 33,6 | 2,5 ₍₂₀₀₈₎ | 78,7 ₍₁₉₆₄₎ | 44,34 |
| 23 | Tanew | Harasiuki | 23,2 | 7,1 ₍₁₉₉₆₎ | 46,3 ₍₁₉₅₈₎ | 41,63 |
| 24 | Kamienna | Kunów | 30,0 | 5,1 ₍₁₉₉₀₎ | 53,3 ₍₁₉₆₀₎ | 35,59 |
| 25 | Wieprz | Krasnystaw | 16,3 | 3,7 ₍₂₀₀₈₎ | 48,8 ₍₁₉₆₄₎ | 50,39 |
| 26 | Pilica | Przedbórz | 19,9 | 3,7 ₍₁₉₅₉₎ | 35,0 ₍₂₀₀₆₎ | 38,63 |
| 27 | Narew | Suraż | 33,6 | 9,2 ₍₁₉₉₇₎ | 55,5 ₍₁₉₆₄₎ | 34,98 |
| 28 | Biebrza | Burzyn | 28,5 | 10,1 ₍₁₉₈₅₎ | 61,6 ₍₂₀₀₂₎ | 38,20 |
| 29 | Pisa | Ptaki | 17,1 | 2,4 ₍₁₉₈₀₎ | 32,3 ₍₁₉₇₀₎ | 46,23 |
| 30 | Liwiec | Łochów | 33,4 | 3,4 ₍₁₉₇₇₎ | 61,0 ₍₂₀₀₂₎ | 42,83 |
| 31 | Bzura | Sochaczew | 29,5 | 4,7 ₍₁₉₅₅₎ | 53,8 ₍₁₉₅₃₎ | 41,50 |
| 32 | Drwęca | Elgiszewo | 19,2 | 2,9 ₍₁₉₆₀₎ | 36,0 ₍₁₉₈₂₎ | 45,96 |
| 33 | Brda | Tuchola | 11,7 | 1,7 ₍₂₀₁₀₎ | 24,4 ₍₁₉₉₄₎ | 45,18 |
| 34 | Wda | Czarna Woda | 11,2 | 0,4 ₍₁₉₈₅₎ | 26,1 ₍₁₉₆₈₎ | 55,32 |
| 35 | Rega | Trzebiatów | 19,7 | 2,5 ₍₁₉₆₀₎ | 36,9 ₍₁₉₉₄₎ | 41,76 |
| 36 | Parsęta | Bardy | 16,9 | 1,8 ₍₁₉₈₄₎ | 34,3 ₍₁₉₉₄₎ | 46,86 |
| 37 | Wieprza | Stary Kraków | 12,8 | 1,9 ₍₁₉₉₁₎ | 27,6 ₍₁₉₇₅₎ | 44,39 |
| 38 | Słupia | Słupsk | 10,4 | 0,8 ₍₁₉₆₅₎ | 21,6 ₍₁₉₇₅₎ | 45,65 |
| 39 | Łupawa | Smoldzino | 9,1 | 2,0 ₍₁₉₅₁₎ | 20,4 ₍₁₉₇₅₎ | 47,42 |
| 40 | Łyna | Sępól | 23,7 | 5,5 ₍₂₀₀₁₎ | 44,3 ₍₂₀₀₂₎ | 43,66 |

Objaśnienia: IS_{sr} – średni wieloletni indeks sezonowości przepływów [%]; $IS_{min(rok)}$ i $IS_{max(rok)}$ – odpowiednio: minimalny i maksymalny indeks sezonowości przepływów z okresu obserwacji (w nawiasie podano rok wystąpienia danego IS) [%]; CV_{IS} – współczynnik zmienności indeksu sezonowości przepływów w wieloletniu [%]

Explanations: IS_{sr} – mean seasonality index of river discharge in a multiannual period [%]; $IS_{min(rok)}$ and $IS_{max(rok)}$ – minimum and maximum seasonality index of river discharge in a multiannual period (year of occurrence for a particular IS is shown in parentheses) [%]; CV_{IS} – variation coefficient of the seasonality index of river discharge in a multiannual period [%]

Źródło: opracowanie własne.

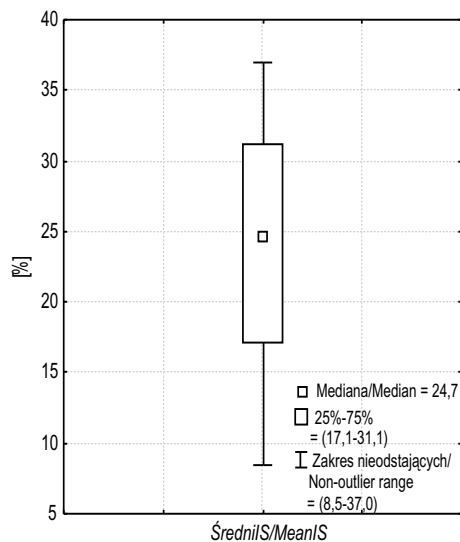
Source: authors' own work.

(w odniesieniu do zlewni i wielolecia) wykorzystano pozycyjne miary położenia, tj. wartość środkową (medianę) oraz pierwszy i trzeci kwartyl. W miarę potrzeby uwzględniano również wartości anomalne (odstające i ekstremalne). Do analiz statystycznych i konstrukcji diagramów wykorzystano standardowe programy obliczeniowe: *EXCEL* i *STATISTICA*.

Średnie wieloletnie indeksy sezonowości odpływu rozpatrywanych rzek zawierają się w przedziale: od 8,5% (Przemsza) do 37% (Wełna) (ryc. 3). Jednocześnie połowa z obliczonych indeksów średnich mieści się w granicach od 17,1% do 31,1%. Mediana uzyskana dla całej grupy rzek wynosi ok. 25%. Przeciętna sezonowość odpływu rzek w Polsce nie jest duża, choć wyraźnie zróżnicowana przestrzennie – zakresy wartości nieodstających są bardzo szerokie.

Indeksy sezonowości (IS_i) obliczone dla poszczególnych rzek i lat były bardzo zróżnicowane (por. tab. 2). Współczynniki zmienności wieloletniej (CV_{IS}) uzyskane dla poszczególnych przekrojów zawierają się jednak w dość wąskim przedziale od ok. 34% (Wisłoka, Narew) do ponad 55% (Czarna Woda, Oława) (ryc. 4). W połowie rzek współczynniki zmienności mieszczą się w zakresie od 38% do 46%. Zatem przeciętna zmienność wieloletnia poziomu sezonowości przepływów rzek Polski jest bardzo słabo zróżnicowana regionalnie.

Do pełnej charakterystyki zróżnicowania IS_i w badanej próbie rzek należy dodać wnioski wynikające z analizy wartości ekstremalnych. Maksymalne indeksy sezonowości w badanej grupie rzek zawierają się w granicach od 20,4% do 79% (ryc. 5A). Połowa indeksów najwyższych IS_{max} zawiera się jednocześnie w przedziale od 47,8% do 56,5%. Najniższe indeksy sezonowości zmie-



Ryc. 3. Zróżnicowanie średniego wieloletniego indeksu sezonowości przepływów (IS_{sp}) w badanej grupie rzek

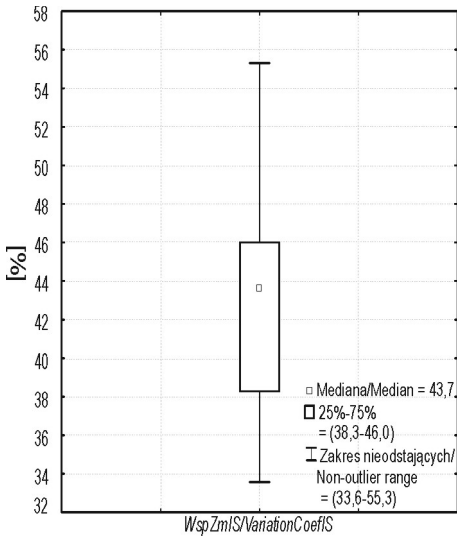
Fig. 3. Mean multiannual seasonality index of river discharge (IS_{sp}) for the analyzed rivers

Objaśnienia: Średni IS – średni indeks sezonowości dla wielolecia

Explanations: *Mean IS* – mean seasonality index for a multiannual period

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.



Ryc. 4. Zróżnicowanie współczynników zmienności wieloletniej indeksów sezonowości w badanej grupie rzek

Fig. 4. Variation Coefficients of the seasonality indices for the analyzed rivers

Objaśnienia: *WspZmIS* – współczynnik zmienności *IS* w wieloleciu

Explanations: *VariationCoefIS* – variation coefficient of the *IS* for the multiannual period

Źródło: opracowanie własne.

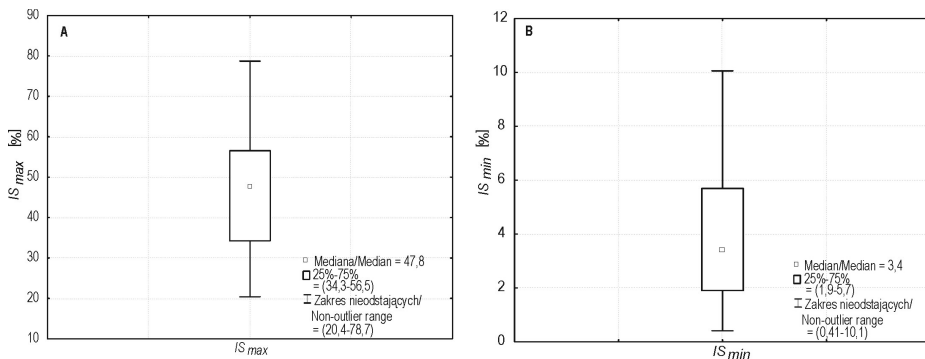
Source: authors' own work.

ności w wieloleciu: im większa jest różnica między ekstremami *IS*, tym mniejsza jest ich zmienność w wieloleciu.

Przeciętne indeksy sezonowości przepływu poszczególnych rzek mieszczą się w dość szerokim przedziale. Zróżnicowanie jest jeszcze większe, gdy ocenimy je na podstawie wartości skrajnych w wieloleciu (od poniżej 1% – np. Proсна, Wda, Przemsza, do 80% – Wisłok) (ryc. 9). Skala zróżnicowania przestrzennego sezonowej struktury odpływu rzeczny jest zatem w Polsce duża i bardzo zmienna w czasie;

niają się w dużo węższym przedziale: od 0,4% do 10,1% (ryc. 5B). Przedział 50-procentowej liczebności jest tu również bardzo wąski i nie przekracza 4,5%. Zakres zmienności w badanej grupie rzek, nazwany rozstępem (amplitudą), a będący różnicą między IS_{max} i IS_{min} jest natomiast duży (ryc. 6). Połowa rzek ma rozstępy z przedziału: od 32% do 51%, ale w skrajnych przypadkach mogą one nawet przekraczać 75% lub być mniejsze od 20%.

Interesujące wnioski płyną z analizy współzmienności średnich wieloletnich indeksów sezonowości odpływu rzek oraz ich miar dyspersji (rozstępów i współczynników zmienności) uzyskanych dla wielolecia i 40 rozpatrywanych rzek (ryc. 7, 8). Postać równań regresji, wysokie współczynniki korelacji i ich istotność na poziomie $\alpha=0,05$ (testy: t-Studenta i Snedecora) dowodzą, że dużej sezonowości przepływu rzeki odpowiada duży rozstęp między IS_{max} i IS_{min} (ryc. 7), lecz jednocześnie mała zmienność w wieloleciu mierzona współczynnikiem zmienności (ryc. 8). Rzeki o niskim poziomie sezonowości odpływu mają ten rozstęp wąski, ale relatywnie duży współczynnik zmienności *IS*. Prowadzi to do wniosku, że rozstęp indeksów sezonowości jest odwrotnie proporcjonalny do ich zmienności w wieloleciu.



Ryc. 5. Zróżnicowanie maksymalnych IS_{max} (A) i minimalnych IS_{min} (B) indeksów sezonowości przepływów w badanej grupie rzek

Fig. 5. Maximum IS_{max} (A) and minimum IS_{min} (B) seasonality indices of river discharge for the analyzed rivers

Objaśnienia: IS_{max} – najwyższy indeks sezonowości w wieloletniu, IS_{min} – najniższy indeks sezonowości w wieloletniu

Explanations: IS_{max} – maximum seasonality index in the multiannual period, IS_{min} – minimum seasonality index in the multiannual period

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

Ryc. 6. Zróżnicowanie rozstępu indeksów sezonowości w badanej grupie rzek

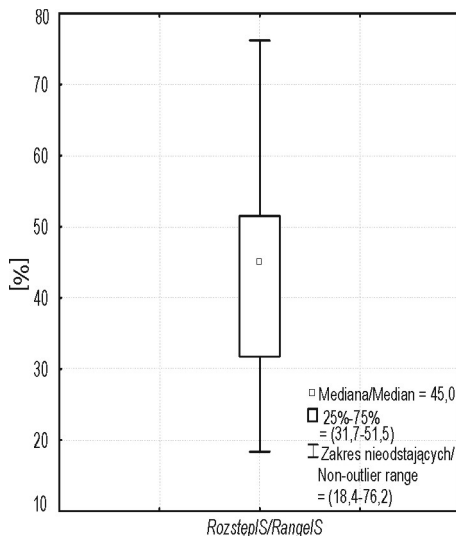
Fig. 6. Range of seasonality indices for the analyzed rivers

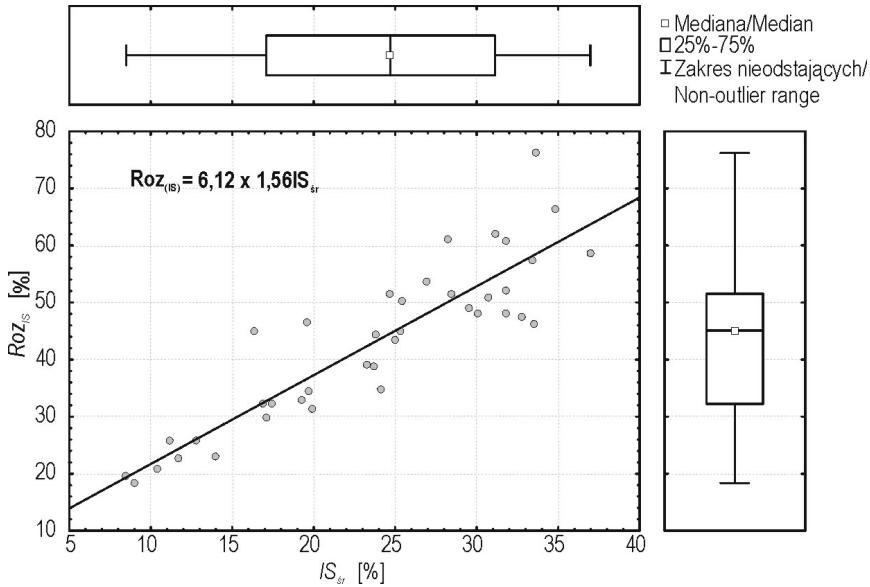
Objaśnienia: *Rozstęp IS* – rozstęp indeksów sezonowości w wieloletniu ($IS_{max} - IS_{min}$)

Explanations: *Range IS* – range of seasonality indices in the multiannual period ($IS_{max} - IS_{min}$)

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.





Ryc. 7. Korelacja między rozstępem indeksów sezonowości w wieloleciu (Roz_{IS}) i średnim wieloletnim indeksem sezonowości (IS_{sr}) w badanej grupie rzek

Fig. 7. Correlation between the range of seasonality indices in the multiannual period (Roz_{IS}) and the mean multiannual seasonality index of river discharge (IS_{sr}) for the analyzed rivers

Objaśnienia: Dodano diagramy *box & whisker* obu zmiennych

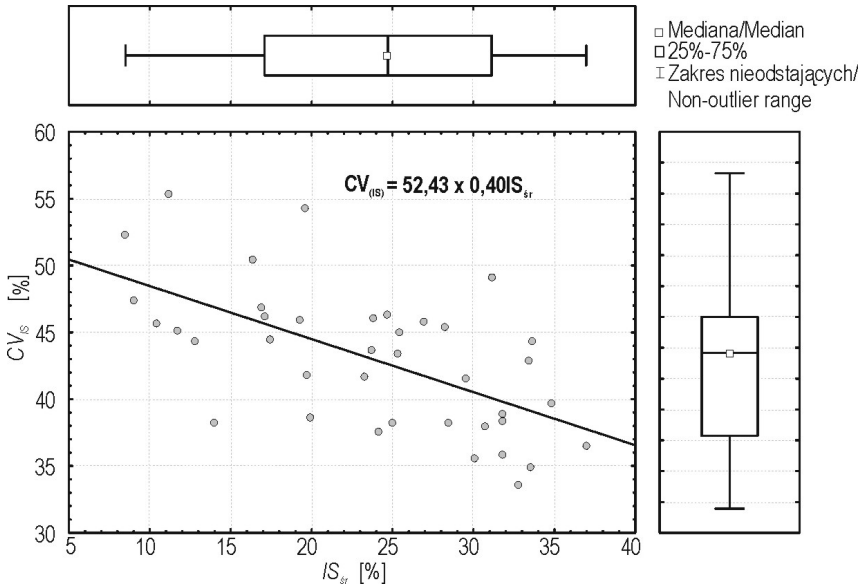
Explanations: *Box & whiskers* plots for the examined characteristics were added

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

od rzek i lat, w których odpływy są skrajnie wyrównane w ciągu roku, aż do sytuacji, w których ogromna większość wody odpływa z dużej liczby zlewni w stosunkowo krótkim czasie (1–2 miesiące).

Zaznacza się też pewien porządek przestrzenny. Najniższymi medianami, a zatem relatywnie niskim poziomem sezonowości odpływu, charakteryzują się rzeki pojezierne i przymorskie (Łupawa, Wda, Słupia, Brda, Wieprza, Drawa, Gwda). Połowa IS_7 tych rzek była w badanym wieloleciu mniejsza od 15%. Jednocześnie w grupie tej tylko sporadycznie zdarzały się lata, w których sezonowość przepływu była relatywnie wysoka ($IS_7 > 30\%$). Duży udział w powierzchni zlewni i retencyjna rola



Ryc. 8. Korelacja między współczynnikiem zmienności indeksu sezonowości (CV_{IS}) i średnim wieloletnim indeksem sezonowości (IS_{fr}) w badanej grupie rzek

Fig. 8. Correlation between the variability coefficient of seasonality indices in the multiannual period (CV_{IS}) and the mean multiannual seasonality index of river discharge (IS_{fr}) for the analyzed rivers

Objaśnienia: Dodano diagramy *box & whisker* obu zmiennych

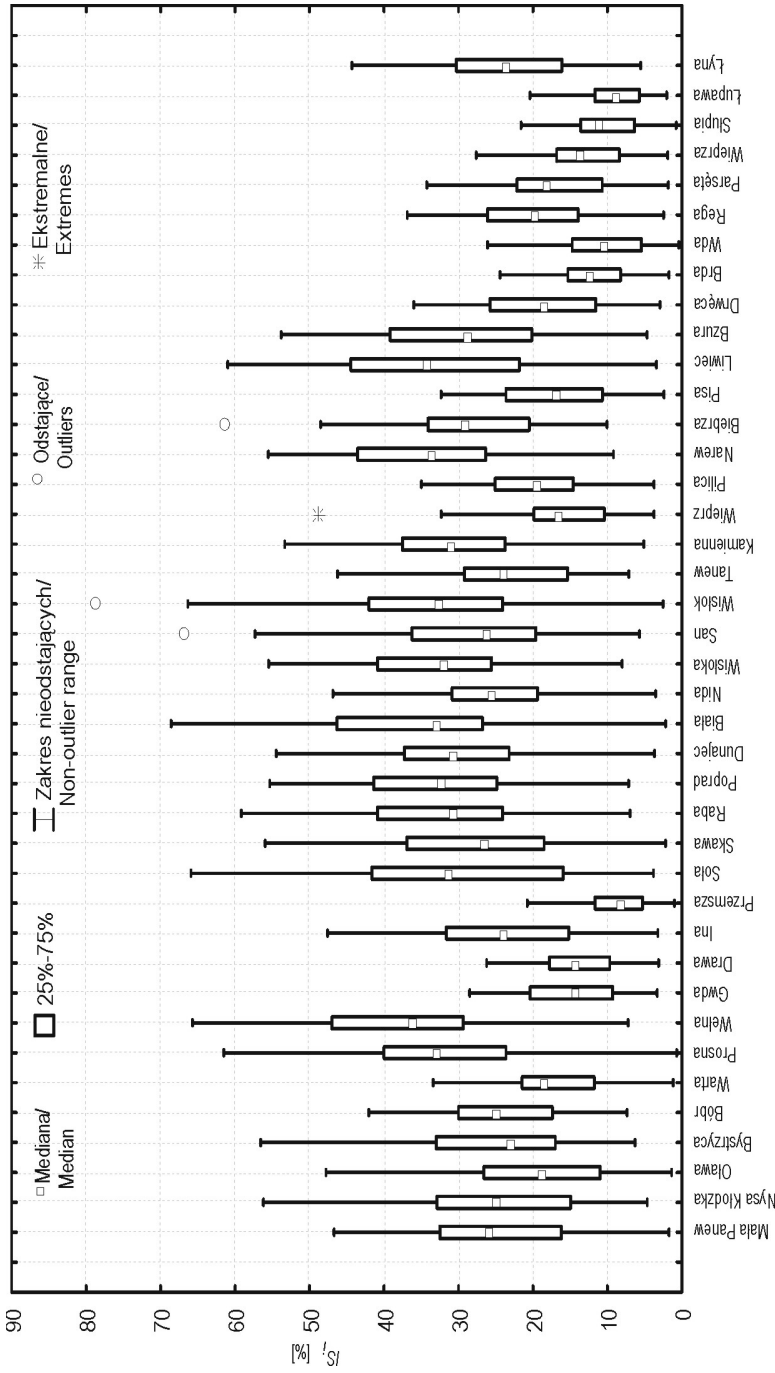
Explanations: *Box & whisker* plots for the examined characteristics were added

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

jezior, podmokłości i chłonnych zagłębień bezodpływowych wpływa na to bardzo wyraźnie, a morska odmiana klimatu na terenach Pojezierza Pomorskiego dodatkowo łagodzi dynamikę rocznych hydrogramów przepływu i zmniejsza skalę wieloletnich zmian sezonowości.

Stosunkowo niską sezonowością odpływu charakteryzują się również niektóre rzeki wyżynne – mediana $IS_f < 20\%$ (górną Wartą, Pilicą, Wieprz, Przemszą). Trudno nie dostrzec tu związku z dużym udziałem w zasilaniu wód pochodzących z rozległych, zasobnych i mało dynamicznych poziomów wodonośnych występujących w skałach



Ryc. 9. Podstawowe cechy rozkładów rocznych indeksów sezonowości przepływów badanych rzek (IS_j)

Fig. 9. Main characteristics of the seasonality index distributions for the analyzed rivers (IS_j)

Objasnienia: IS_j – roczne indeksy sezonowości

Explanations: IS_j – annual seasonality indices

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

węglanowych, których stabilny w czasie dopływ znacząco „wygładza” przepływy w ciągu roku i w wieloleciu. Nieco większa sezonowość (przeciętny $IS_i=20\%–30\%$) cechuje zaś rzeki sudeckie i pozostałe wyżynne (np.: Bóbr, Bystrzyca, Nida, Tanew, Mała Panew).

Najwyższe mediany IS_i uzyskano głównie dla rzek karpackich o reżimie pluwialno-niwalnym (np. Poprad, Dunajec) i niwalno-pluwialnym (np. Soła, Wisłoka, Wisłok, Biała, Raba). Przeciętna sezonowość przepływu tych cieków jest relatywnie wysoka. W czasie wielu lat badanego wielolecia IS_i rzek karpackich przekraczały 50%, sięgając niemal 80% (np. Wisłok). Dla tej grupy rzek co drugi, przeciętny, indeks sezonowości jest wyższy od 30%.

Do rzek o dużej sezonowości odpływu należy zaliczyć również Kamienną i Białą (reżim niwalno-pluwialny) oraz nizinne rzeki o ustroju niwalnym silnie wykształconym (np. Proсна, Narew, Liwiec, Wełna). Warto jednocześnie zauważyć, że wysokiej przeciętnej sezonowości odpływu towarzyszy tu zwykle duży rozstęp indeksów ekstremalnych, i odwrotnie (por. ryc. 7). W ogólności rozstęp ekstremalnych IS_i jest w rozpatrywanej grupie zlewni bardzo szeroki, przy czym dotyczy to zarówno wieloletnich zmian w poszczególnych rzekach, jak i przestrzennego zróżnicowania w całej grupie. Ekstremalnie wysokie indeksy są charakterystyczne dla rzek górskich, odznaczających się reżimem niwalno-pluwialnym. Do grupy tej należą: Wisłok ($IS_{max} = 78,7\%$) oraz Biała, San i Soła. Okresowo duża sezonowość przepływu ($IS_{max} > 60\%$) charakteryzuje też grupę rzek o ustroju niwalnym silnie wykształconym w tym: Wełnę, Biebrzę, Prosnę oraz Liwiec. Warto podkreślić, że rzeki, dla których uzyskano tu skrajnie wysokie indeksy sezonowości, odznaczają się równocześnie bardzo szerokim rozstępem tych wskaźników w wieloleciu.

Analizując najniższe indeksy sezonowości (IS_{min}) w badanej próbkę rzek, także można dostrzec pewne prawidłowości regionalne. Lata ze skrajnie niskim poziomem sezonowości wystąpiły głównie w rzekach przymorskich i pojeziernych (np. Wda, Słupia, Brda, Parsęta, Wieprza, Łupawa). Równie niskie indeksy uzyskano dla Przemszy oraz niektórych rzek z dorzecza Odry, np. Proсны, Warty, Oławy i Małej Panwi. Zwraca uwagę fakt, że niemal wszystkie wymienione rzeki (z wyjątkiem Proсны) charakteryzują się średnio wykształconym, niwalnym ustrojem wodnym. Na tle pozostałych rzek, w zdecydowanej większości, odznaczają się one również relatywnie wąskim rozstępem indeksów sezonowości. Obecność w wieloleciu lat o skrajnie wyrównanych przepływach i mała zmienność indeksów w wieloleciu wskazują, że ustrój tych rzek zmienia się z niwalnego średnio wykształconego w niwalny słabo wykształcony. Jest to oczywisty skutek coraz cieplejszych zim i coraz słabiej zaznaczających się wiosennych wezbrań roztopowych.

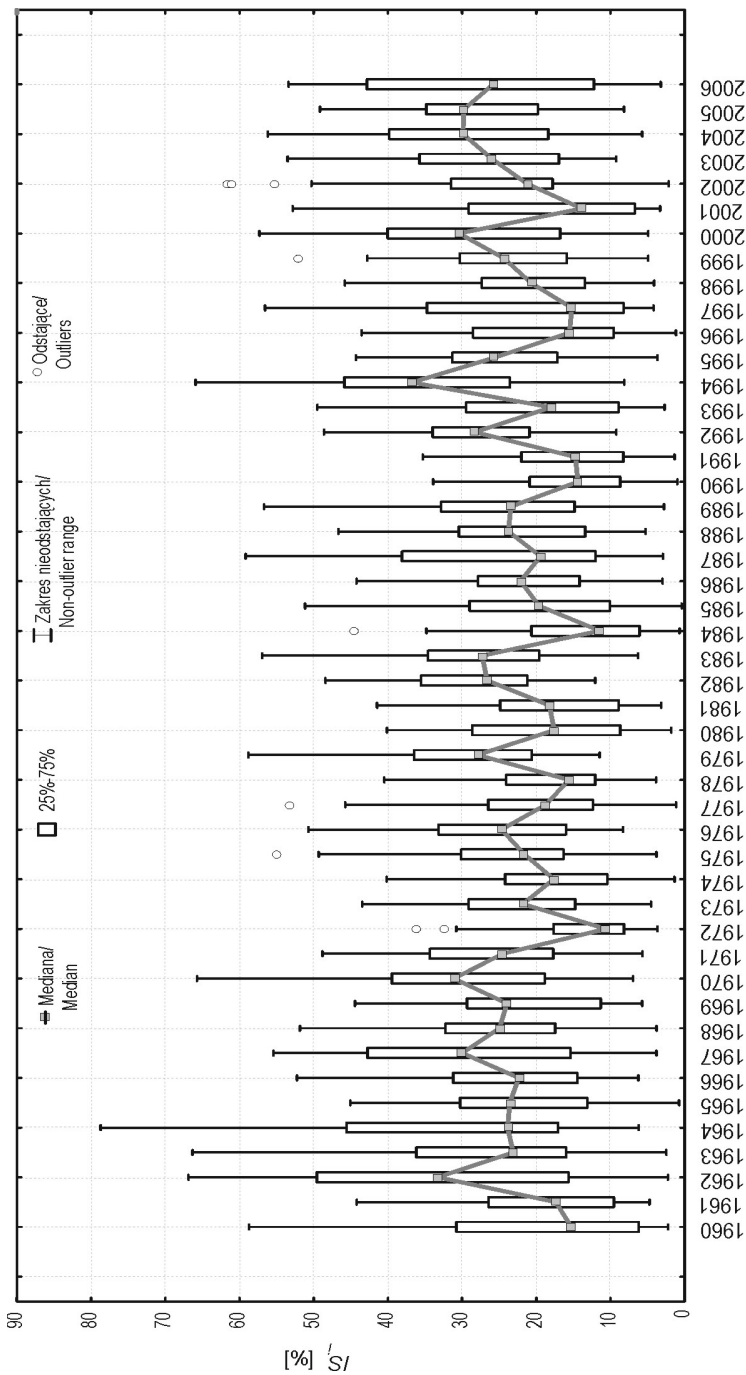
Zmiany i fluktuacje indeksów sezonowości odpływu w wieloleciu

W celu oceny wieloletniej zmienności i identyfikacji ewentualnych fluktuacji w sezonowej strukturze odpływu zbadano również rozkłady zmienności IS_t w poszczególnych latach wielolecia (ryc. 10). Aby zachować jednakową liczbę rzek, których danymi dysponowano w każdym roku, w analizie uwzględniono tylko serie IS_t pochodzące z wielolecia 1960–2006. Dla tego okresu dysponowano bowiem indeksami uzyskanymi dla wszystkich rzek oraz wszystkich lat. Wyjątkiem była Wisłoka, której seria ma lukę obserwacyjną w 1992 r.

Przeciętne indeksy sezonowości odpływu w całej grupie rzek były w wieloleciu 1960–2006 zróżnicowane (od 10% do 37%). Najmniejszą sezonowością odpływu rzeczno odznaczały się lata 1972 i 1984, największą: 1994 i 1962. Już z pobieżnej analizy zmian wartości przeciętnych oraz zmian zróżnicowania przestrzennego w wieloleciu wynika, że w badanym okresie fluktuacje indeksów sezonowości odpływu miały charakter losowy. Nie stwierdzono istotnych trendów, zarówno w odniesieniu do przeciętnego IS , jak i w stosunku do wewnętrznej zmienności indeksów w badanej grupie rzek (ryc. 10). Największe zróżnicowanie sezonowości przepływu wystąpiło na początku lat 60. Zakresy wartości nieodstających oraz szerokości przedziałów połowy liczebności były w tym czasie szczególnie szerokie (lata: 1960, 1962, 1963, 1964). Dostrzec można też pewne prawidłowości regionalne. W przypadku większości rzek górskich maksymalne indeksy sezonowości uzyskano dla pierwszej połowy lat 60. (np. 1962 – Skawa, Poprad, San; 1964 – Biała, Wisłoka, Wisłok). W latach: 1964 i 1994 w sześciu rzekach badanej próbki przepływu charakteryzowały się skrajnie wysoką sezonowością; co potwierdzają najwyższe indeksy IS_t . Zdecydowanie najwięcej maksymalnych indeksów sezonowości odpływu charakteryzowało lata 60. i 90. ubiegłego wieku (odpowiednio 13 i 8 przypadków) (por. tab. 2).

W przeciwieństwie do skrajnie wysokich IS_t , w występowaniu których można dostrzec pewien porządek czasowy i przestrzenny, bardzo niskie indeksy sezonowości pojawiały się dość równomiernie w poszczególnych dekadach rozpatrywanego wielolecia (por. tab. 2), przy czym najmniej minimów zanotowano w latach 60., a najwięcej w latach 80. XX w.

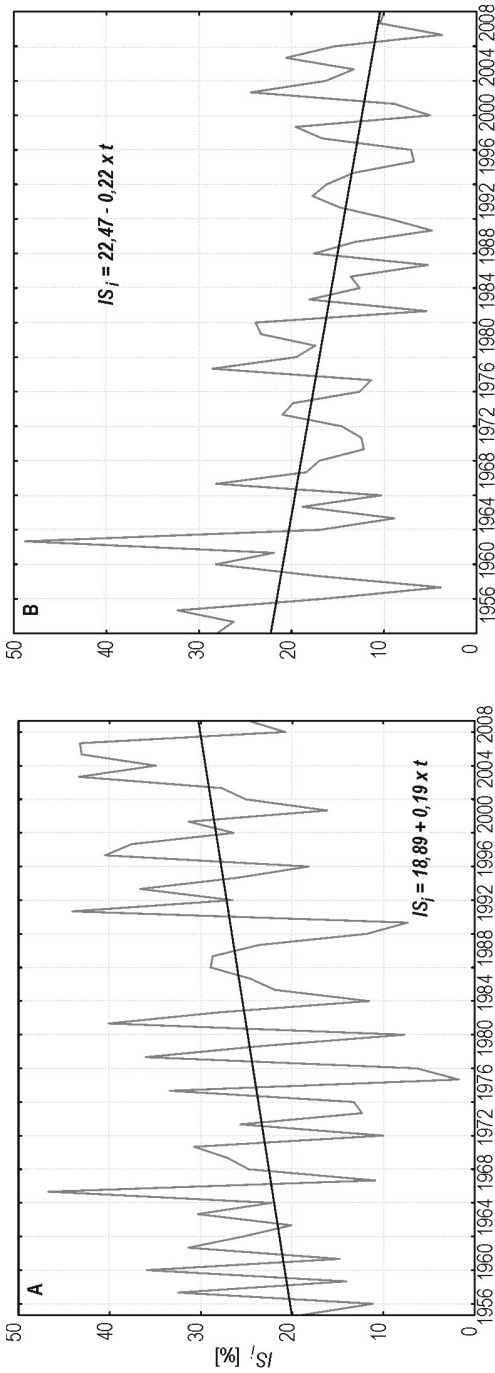
O ile nie stwierdzono istotnych trendów w poziomie sezonowości przepływu w skali całej próbki rzek, o tyle istotne tendencje zostały zauważone w seriach indeksów sezonowości siedmiu rzek. Statystyczną istotność (test t-Studenta; $\alpha=0,05$) wykazały cztery trendy malejące IS_t (Wisłok, Wieprz, Oława, Wda), wskazujące na systematyczny spadek sezonowości przepływu, trzy zaś istotne trendy rosnące dowodzą stopniowego wzrostu sezonowości przepływu w: Bobrze, Warcie i Małej Panwi (por. ryc. 11).



Ryc. 10. Wieloletnie zmiany sezonowej struktury odpływu z badanych zlewni
 Fig. 10. Multiannual changes in the seasonal structure of river runoff for the analyzed river basins

Objaśnienia: SI – indeksy sezonowości
 Explanations: SI – seasonality indices

Źródło: opracowanie własne.
 Source: authors' own work.



Ryc. 11. Statystycznie istotne trendy indeksów sezonowości IS w wieloletniu: A – rosnący (Mała Panew); B – malejący (Wieprz)
 Fig. 11. Statistically significant seasonality trends for river discharge IS in the multiannual period: A – upward trend (Mała Panew River); B – downward trend (Wieprz River)

Objaśnienia: IS_j – indeksy sezonowości

Explanations: IS_j – seasonality indices

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

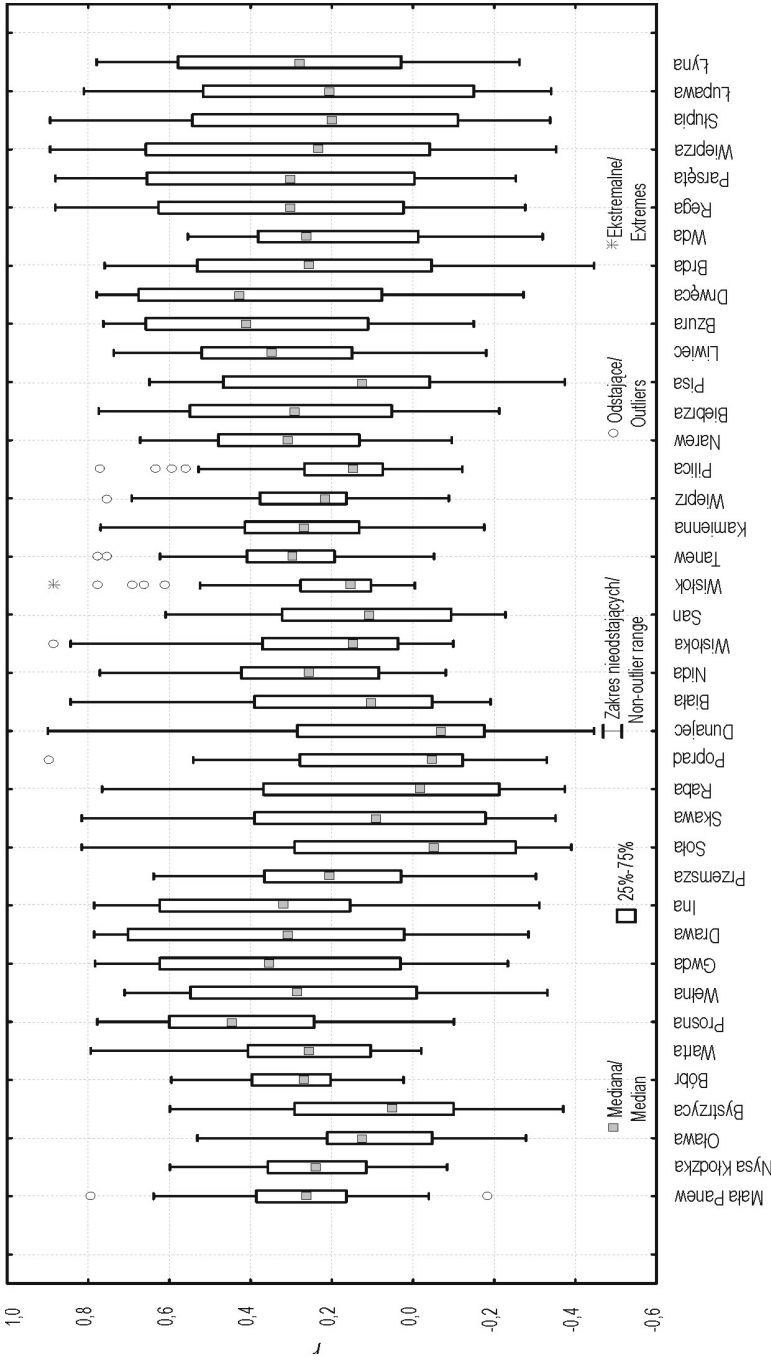
Korelacje przestrzenne indeksów sezonowości

Podjęto również próbę uchwycenia korelacyjnych związków przestrzennych. Powiązania te zbadano na podstawie współczynników korelacji (r) obliczonych dla szeregów czasowych IS_t poszczególnych rzek. Uzyskana macierz trójkątna współczynników korelacji (780 wartości) jest dość trudna zarówno do analizy, jak i interpretacji. Aby wydobyć najważniejsze informacje, które z niej płyną, zastosowano odpowiednio skonstruowany diagram typu *box & whisker* (ryc. 12).

Najlepiej współkorelują indeksy sezonowości przepływów rzek przymorskich, np. Parsęty i Regi ($r=0,89$), Słupi i Wieprzy ($r=0,89$) i kilku innych. Podobną korelację uzyskano dla indeksów rzek karpackich: Dunajca i Popradu ($r=0,90$), Wisłoka i Wisłoki ($r=0,90$) oraz niektórych rzek sudeckich i nizinnych.

W analizowanym zbiorze współczynników korelacji licznie występują wartości ujemne, które gdy są statystycznie istotne, dowodzą „niepodobieństwa” rzek w zakresie zmian sezonowości przepływu w poszczególnych latach wielolecia. Upraszczając, jeśli sezonowość przepływu rzeki A w danym roku jest wysoka, to rzeki B będzie niska, i odwrotnie. Najbardziej interesującym przypadkiem jest Brda, dla której uzyskano bardzo wysoką, ujemną i statystycznie istotną ($\alpha=0,05$) korelację indeksów sezonowości z podobnymi miarami wielu rzek, w tym z większością rzek karpackich. Zmiany sezonowości przepływu Brdy w wieloleciu są asynchroniczne w stosunku do podobnych zmian: Dunajca ($r=-0,45$), Soły ($r=-0,39$), Bystrzycy ($r=-0,37$), Skawy ($r=-0,35$), Popradu ($r=-0,33$) oraz Raby ($r=-0,32$). Także indeksy sezonowości innych rzek pojeziernych (np. Drawy, Słupi, Drwęcy) zmieniają się asynchronicznie w stosunku do zmian indeksów wielu rzek karpackich (współczynniki korelacji są także ujemne i statystycznie istotne). Podobne zmiany sezonowości wykazuje Raba i kilka innych rzek karpackich. Współczynniki są tu statystycznie istotnie i ujemnie korelują z podobnymi zmianami sezonowości odpływu rzek pojeziernych, np. Raba z Wieprzą ($r=-0,35$) i Łupawą ($r=-0,34$) oraz Pisą ($r=-0,34$). Jeśli rzeki karpackie charakteryzują się w danym roku wyrazistą sezonowością przepływu, to rzeki pojezierne mają słabo zaznaczoną sezonowość. W innym roku relacja może być odwrotna.

Połowa przeciętnych (median) współczynników korelacji indeksów sezonowości odpływu zawiera się w przedziale od 0,07 (Dunajec) do 0,45 (Prosna) (ryc. 12). Upraszczając nieco, można zatem stwierdzić, że wieloletnie zmiany sezonowości przepływu Prosny są najbardziej podobne do zmian występujących w większości pozostałych 39 rzek. Zmiany sezonowości przepływu w Dunajcu są natomiast najbardziej niepodobne do innych.



Ryc. 12. Współczynniki korelacji liniowej (r) indeksów sezonowości przepływów poszczególnych rzek z indeksami sezonowości pozostałych rzek badanego zbioru

Fig. 12. Correlation coefficients (r) for seasonality indices of river discharge for selected rivers and seasonality indices of river discharge for other rivers

Źródło: opracowanie własne.

Source: authors' own work.

Wnioski

Indeksy sezonowości, podobnie jak druga z pakietu miar zaproponowanych przez Markhama, zwana porą koncentracji, nie zostały, jak dotąd, należycie rozpropagowane. Odpowiednio użyte i przeanalizowane pozwalają szybko i obiektywnie ocenić oraz zbadać wieloletnią zmienność – jednej z ważniejszych cech ustroju rzecznego – poziom sezonowości przepływu (odpływu). Indeks sezonowości może być zatem użyteczną miarą dynamiki ustroju rzecznego, pozwalającą identyfikować i oceniać wagę ewentualnych zmian zachodzących w ustroju wodnym rzek w wyniku zmian i fluktuacji klimatu oraz przemian związanych z szeroko pojmowaną antropopresją.

Przeprowadzona wyżej analiza pozwala wysnuć dwa wnioski ogólne i dostrzec kilka prawidłowości szczegółowych. Po pierwsze, średnie indeksy sezonowości przepływu (8%–37%), jak i zakres ich zmienności czasowej liczbowo niewiele różnią się od podobnych miar obliczonych dla sum opadów atmosferycznych w Polsce (Kozuchowski, Wibig 1988), a także odpływu całkowitego z obszaru środkowej Polski (Bartnik, Jokiel 2001). Zwraca jednak uwagę szerszy niż w przypadku opadów rozstęp między ekstremami i większy współczynnik zmienności, które świadczą o istotnym wpływie regionalnego zróżnicowania poziomu retencji. Jednocześnie poziom sezonowości przepływu rzek jest wyraźnie wyższy od wahań zwierciadła płytkich wód podziemnych w środkowej Polsce (Tomalski 2010) oraz od skali zmian sezonowych większości cech fizykochemicznych wód podziemnych i powierzchniowych (poza temperaturą wody) (por. Stolarska 2008). Decydującą rolę w kształtowaniu struktury sezonowej odpływu mają czynniki klimatyczne i ich fluktuacje, retencja podziemna zaś stanowi rodzaj filtra wygładzającego i deformującego zmiany sezonowe. Sezonowa struktura odpływu rzek polskich jest równocześnie dość stabilnym w czasie i przestrzeni elementem ustroju rzecznego. Zaobserwowane wieloletnie zmiany poziomu sezonowości przepływu większości rzek miały charakter losowych fluktuacji, a istotne trendy indeksów sezonowości (rosnące lub malejące) ujawniły się tylko w kilku rzekach (7); nie stwierdzono też żadnego porządku przestrzennego w występowaniu trendów, zarówno w odniesieniu do ich siły (istotności), jak i kierunków.

Warto dodać do tego kilka spostrzeżeń szczegółowych. Najmniejsza sezonowość przepływu, zarówno w zakresie wartości przeciętnych, jak i różnych miar dyspersji, charakteryzuje rzeki pojezierne i przymorskie (Łupawę, Wdę, Słupię, Brdę, Wieprzę, Drawę, Gwdę). Sezonowa struktura odpływu rzek karpaccich, zarówno tych o ustroju pluwialno-niwalnym, jak i niwalno-pluwialnym, jest najbardziej wyrazista (Poprad, Dunajec, Soła, Wisłoka, Wisłok, Biała, Raba). Dużą sezonowością przepływu cechują się również rzeki nizinne o ustroju niwalnym silnie wykształconym (Prosna, Narew, Liwiec, Wełna). Ich współczynniki zmienności wskazują jednak na mniejszą niż w rzekach karpaccich dynamikę wieloletnich zmian sezonowości przepływu – zauważalny wpływ retencji podziemnej. Należy też podkreślić, że wieloletnia zmienność

poziomu sezonowości odpływu maleje wraz ze wzrostem średniego indeksu sezonowości, a rośnie w miarę zmniejszania się różnicy między ekstremami (rozstępu).

Współmienność indeksów sezonowości odpływu rzek odwadniających różne regiony fizycznogeograficzne jest bardzo zróżnicowana, choć uporządkowana w przestrzeni. Sezonowa struktura odpływu w rzekach sąsiednich i odwadniających te same regiony zmienia się w wieloleciu synchronicznie. Na podkreślenie zasługuje jednak fakt, że indeksy sezonowości odpływu rzek karpaccich i pojeziernych zmieniają się w wieloleciu asynchronicznie. W analizowanym zbiorze rzek polskich za „markery” zmian struktury sezonowej odpływu można uznać indeksy sezonowości IS_7 ; Proсны, Drwęcy oraz Bzury, gdyż ich korelacja z odpowiednikami uzyskanymi dla innych rzek jest największa i statystycznie istotna. Najmniej podobne do innych są natomiast wieloletnie zmiany sezonowości przepływu rzek górskich, np. Popradu, Dunajca, Bystrzycy i Soły.

Literatura

- Bartnik A., 2005, *Odpływ niski w Polsce*, Acta Geographica Lodziensia, 91, Wydawnictwo Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Łódź.
- Bartnik A., Jokiel P., 2001, *Zmiany w sezonowym rozkładzie odpływu w środkowej Polsce w wieloleciu 1951–1998*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 24 (2), 3–17.
- Jokiel P., 2004, *Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Jokiel P., 2009, *O sezonowym rozmieszczeniu odpływu w wybranych rzekach środkowej Polski*, Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej, 3 (2–3), 15–29.
- Jokiel P. (red.), 2015, *Metody statystyczne w badaniach hydrologicznych środkowej Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Kożuchowski K., Wibig J., 1988, *Kontynentalizm pluwialny w Polsce. Zróżnicowanie geograficzne i zmiany wieloletnie*, Acta Geographica Lodziensia, 55, Wydawnictwo Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Łódź.
- Kundzewicz Z., Kowalczak P., 2008, *Zmiany klimatu i ich skutki*, Wydawnictwo Kurpisz, Poznań.
- Markham Ch.G., 1970, *Seasonality in the Precipitation in the United States*, Annals of the Association of American Geographers, 3, 593–597.
- Mujere N., Eslamian S., 2014, *Climate Change Impacts on Hydrology and Water Resources*, [w:] S. Eslamian (red.), *Handbook of Engineering Hydrology Modeling: Climate Change and Variability* (Book II), CRC Press Taylor&Francis Group, Boca Raton, 113–126.
- Roczniki Hydrologiczne Wód Powierzchniowych (dorzecza: Odry i Wisły), 1951–2010, IMGW, Warszawa.
- Stolarska M., 2008, *Sezonowe zmiany zasobów i właściwości fizykochemicznych wód w małej zlewni nizinnej*, Acta Geographica Lodziensia, 94, Wydawnictwo Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Łódź.

- Tomalski P., 2010, *Sezonowość wahań płytkich wód podziemnych w środkowej Polsce w świetle miar Markhama*, [w:] T. Ciupa, R. Suligowski (red.), *Woda w badaniach geograficznych*, Instytut Geografii Uniwersytetu Jana Kochanowskiego, Kielce, 193–202.
- Tomaszewski E., 2001, *Sezonowe zmiany odpływu podziemnego w Polsce w latach 1971–1990*, *Acta Geographica Lodziensia*, 79, Wydawnictwo Łódzkiego Towarzystwa Naukowego, Łódź.
- Tomaszewski E., 2012, *Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski*, Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Wrześniński D., 2013, *Entropia odpływu rzek w Polsce*, Wydawnictwo Naukowe Bogucki, Poznań.

Paweł Jokiel
Uniwersytet Łódzki
Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź
e-mail: pawel.jokiel@geo.uni.lodz.pl

Beata Stanisławczyk
Uniwersytet Łódzki
Katedra Hydrologii i Gospodarki Wodnej
ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź
e-mail: b.stanislawczyk@o2.pl