Acta Sci. Pol.
Formatio Circumiectus 22 (4) 2023, 23–36
ENVIRONMENTAL PROCESSES

www.acta.urk.edu.pl ISSN 1644-0765 DOI: http://dx.doi.org/10.15576/ASP.FC/2023.22.4.16

ORIGINAL PAPER Accepted: 24.11.2023

PRAWDOPODOBIEŃSTWO PRZEWYŻSZENIA PRZEPŁYWÓW CHARAKTERYSTYCZNYCH NA OBSZARZE POLSKI

Katarzyna Baran-Gurgul✉ 0000-0003-0247-6136

Politechnika Krakowska, ul. Warszawska 24, 31-155 Kraków

ABSTRAKT

Cel pracy
Celami niniejszej pracy są: wyznaczenie empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia przepływów charakterystycznych Q_{char} (*SNQ*, *WNQ*, *NSQ*, *SSQ*, *WSQ*, *NWQ* i *SWQ*) na obszarze Polski, powiązanie Q_{char} z kwantylami Q_p i zbadanie zależności między empirycznym prawdopodobieństwem przewyższenia przepływu Q_{char} od: Q_p, pola powierzchni zlewni A i wysokością położenia zera wodowskazu H.

Materiał i metody
Przepływy charakterystyczne obliczono na podstawie ciągów przepływów dobowych z 50-lecia hydrologiczego (z okresu od 1 listopada 1971 roku do 31 października 2021 roku) w 355 przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych na terenie Polski. Empiryczne prawdopodobieństwa przewyższenia przepływów Q_{char} przedstawiono na wykresach, a ich rozkład przestrzenny – na mapach. Do oceny współzmienności zmiennych Q_{char} i Q_p, Q_{char} i A oraz Q_{char} i H wykorzystano korelacje: rang Spearmana oraz liniową Pearsona.

Wyniki i wnioski
Wyniki badań pozwoliły na przypisanie (w przybliżeniu) na obszarze Polski przepływom charakterystycznym *Qchar* kwantyli Q_p: *SNQ* – *Q*93%, *WNQ* – *Q*63%, *NSQ* – *Q*74%, *SSQ* – *Q*33%, *WSQ* – *Q*10%, *NWQ* – *Q*26% i *SWQ* – *Q*1,3%. Analizy wykazały, że w niektórych przypadkach zmienność empirycznego prawdopodobieństwa przekroczenia danego przepływu charakterystycznego jest tak duża, że należałoby stosować przypisanie Q_{char} do jednej wartości Q_p wraz z informacją o błędzie pomiarowym. Analiza korelacji i map wskazuje przede wszystkim na istotną zależność prawdopodobieństwa przewyższenia Q_{char} od wysokości H – w niektórych przypadkach jest to zależność dodatnia, w niektórych – ujemna.

Słowa kluczowe: przepływ charakterystyczny, przepływ prawdopodobny, prawdopodobieństwo przewyższenia, krzywa czasu przewyższenia przepływu

WPROWADZENIE

W opisie reżimu hydrologicznego rzeki w polskiej (i nie tylko) hydrologii i gospodarce wodnej wykorzystuje się często przepływy charakterystyczne. Przypływy te określa się na podstawie danych wieloletnich i dzieli się je na przepływy główne, okresowe i konwencjonalne (Byczkowski, 1996; Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997).

Przepływy główne I rzędu wyznaczane są dla wybranego okresu, którym może być np. rok, półrocze, sezon, okres wegetacyjny lub żeglugowy. W przypadku gdy rozważanym okresem jest rok hydrologiczny, przepływy główne I rzędu są obliczane jako roczne minimum *NQ*, średnia *SQ*, mediana *ZQ* lub maksimum *WQ* przepływu z ciągu dobowych (najczęściej) przepływów. Przepływy charakterystyczne

✉e-mail: katarzyna.baran-gurgul@pk.edu.pl

© Copyright by Wydawnictwo Uniwersytetu Rolniczego w Krakowie, Kraków 2023

główne II rzędu (*NNQ*, *SNQ*, *WNQ*, *NSQ*, *SSQ*, *WSQ*, *NWQ*, *SWQ* i *WWQ*), analizowane w niniejszej pracy, wyznaczane są na podstawie ciągów przepływów I rzędu w wieloleciu.

Przepływy okresowe to takie, które wraz z przepływami niższymi (lub wyższymi) trwają przez określony czas. Przepływy te pobierane są z krzywej czasu przewyższenia przepływu (Węglarczyk, 2010), zwaną też krzywą czasu trwania przepływów (Dębski, 1970), krzywą sumy czasów trwania przepływów wraz z wyższymi (Lambor, 1971) lub krzywą sum czasów trwania przepływów wraz z wyższymi (Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997).

Przepływy charakterystyczne II rzędu wyznaczane są najczęściej na podstawie ciągów dobowych przepływów z wielolecia, jednak długość tego wielolecia zazwyczaj nie jest jednoznacznie określona – może wynikać z przepisów, długości dostępnych danych, może być jednak przyjmowana subiektywnie. I tak na przykład Prawo Wodne (2017) w art. 270 pkt 270 definiuje średni niski przepływ z wielolecia (*SNQ*) na podstawie co najmniej 20 lat hydrologicznych, podczas gdy Stachý i in. (1991) czy Ozga-Zieliński i Walczykiewicz (2022) zalecają wykorzystanie 30-letniego ciągu danych, a Barbarossa i in. (2018) liczą m.in. minimalne przepływy z 56-lecia (1960–2015). Ze względu jednak na podejście statystyczne lub długość cykli hydrologicznych najczęściej sugerowaną m.in. przez Światową Organizację Meteorologiczną (WMO, 2023) długością badanego wielolecia jest okres nie krótszy niż 30 lat – WMO (2023) zaleca dla celów porównania charakterystyki hydrologicznej i klimatycznej przyjęcie konkretnego 30-lecia, tj. 1991–2020, i dla tego okresu przygotowany został zestaw norm klimatycznych. Ponieważ długość ciągów, zależnie od pracy i rodzaju analiz, dobierana jest subiektywnie (zazwyczaj jednak ciągi są dłuższe niż 30 lat), w niniejszej pracy brane są pod uwagę dobowe ciągi przepływów z 50-lecia hydrologicznego.

Przepływy konwencjonalne są ustalane na potrzeby związane z wykorzystaniem i ochroną zasobów wodnych lub ograniczeniem ich szkodliwego działania (Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z 2019 r. w sprawie zakresu instrukcji gospodarowania wodą). Wśród przepływów konwencjonalnych wyróżnia się: przepływ żeglowny, nienaruszalny, środowiskowy, gwarantowany, dozwolony, powodziowy, katastrofalny, brzegowy, brzegotwórczy czy miarodajny. Wiele z przepływów konwencjonalnych może być przepływem okresowym albo głównym. I tak na przykład przepływy nienaruszalne i środowiskowe najczęściej bazują na *SNQ* (Kostrzewa, 1977; Witowski i in., 2008; KZGW, 2017b), przepływ dozwolony często przyjmowany jest jako *SWQ* lub $WQ_{50\%}$, a przepływy miarodajne i kontrolne liczone są jako przepływ maksymalny roczny, którego prawdopodobieństwo przewyższenia wynosi p (Rozporządzenie Ministra Środowiska z 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie).

Przepływy charakterystyczne są szeroko stosowane – zarówno w Polsce, jak i na świecie (np. Stachý i in., 1991; King i Brown, 2006; Witowski i in., 2008; Barbarossa i in., 2018), dlatego niektóre prace poświęcone są im w całości (Stachý i in., 1991; King i Brown, 2006; Acreman, 2016; Barbarossa i in., 2018; Ozga-Zieliński i Walczykiewicz, 2022; Baran-Gurgul i in., 2022 i 2023), a Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej publikuje dane o przepływach charakterystycznych: dawniej w formie publikacji „Przepływy w charakterystyczne rzek polskich w latach 1951–1970" (IMGW, 1980) i obecnie – w rocznikach hydrologicznych wód powierzchniowych (IMGW-PIB, 2023).

Jednym z najczęściej stosowanych przepływów charakterystycznych w Polsce, nie tylko przy definiowaniu niżówek rzecznych, lecz także przy obliczaniu przepływów nienaruszalnych (Witowski i in., 2008) i środowiskowych (KZGW, 2017b), jest przepływ *SNQ*. Przepływ ten zgodnie z ustawą Prawo Wodne (2017) stanowi też podstawę naliczania przez Wody Polskie wysokości opłaty za usługi wodne za pobór wód.

Są także takie procesy (np. susza hydrologiczna), w których definicjach wykorzystywane są różne przepływy, w zależności od autora. I tak na przykład niżówka rzeczna zazwyczaj definiowana bywa jako ciągły okres z przepływem w danym przekroju rzeki niższym niż założony przepływ graniczny Q_g, którego wartość przyjmowana jest jako kwantyl $Q_{p\%}$, o prawdopodobieństwie przewyższenia p równym 70, 80, 90 lub 95% (np. Zelenhasić i Salvai, 1987; Stahl, 2001; Tallaksen i van Lanen, 2004; Jakubowski, 2005, 2006, 2011; Fleig i in., 2006; Tomaszewski, 2012; KZGW, 2017a; Baran-Gurgul, 2022) lub jako wybrany prze-

pływ charakterystyczny główny II rzędu, często *WNQ* lub *SNQ* (Zielińska, 1963; Ozga-Zielińska i Brzeziński, 1997; Bartczak, 2007; Tomaszewski, 2012).

Fakt, że niżówki mogą być zdefiniowane kilkoma metodami i przy zastosowaniu różnych przepływów granicznych, powoduje mocne zróżnicowanie otrzymywanych charakterystyk niżówek i często problem z ich porównaniem. Niestety niewiele jest prac porównujących charakterystyki niżówek rzecznych otrzymanych w różny sposób. Jednak niektórzy badacze zajmowali się tą problematyką, a wśród nich Raczyński (2015), który porównał charakterystyki niżówek (w latach hydrologicznych 1977–2013) na Lubelszczyźnie przy różnych Q_g, Tomaszewski (2018) – charakterystyki niżówek w zlewni Wisły (wielolecie 1951–2016, dwa Q_g) czy Baran-Gurgul (2020) – charakterystyki niżówek w zlewni Górnej Wisły (wielolecie 1984–2013, dwie metody, trzy różne wartości Q_g).

Aby porównać wyniki prac autorów przyjmujących za poziom graniczny definiujący niżówkę przepływy charakterystyczne z tymi przyjmującymi za Q_g przepływy prawdopodobne, warto znać powiązania między przepływami charakterystycznymi a prawdopodobnymi. Celem niniejszej pracy jest zbadanie zależności między przepływami głównymi II rzędu z przepływami prawdopodobnymi Q_p, w tym celu policzono empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia *p* danego przepływu głównego Q_{char} (*SNQ*, *WNQ*, *NSQ*, *SSQ*, *WSQ*, *NWQ* i *SWQ*) na obszarze całej Polski. Zbadano także korelacje Spearmana między wspomnianymi przepływami Q_{char} i Q_p oraz Q_{char} a polem powierzchni zlewni *A*, a także Q_{char} a wysokością położenia zera wodowskazu *H*. Dodatkowym celem artykułu jest rozszerzenie analiz wykonanych przez Węglarczyka (2014) na obszarze prawobrzeżnej części zlewni górnej Wisły i Raczyńskiego (2015) na Lubelszczyźnie.

OBSZAR BADAŃ, DANE I METODY

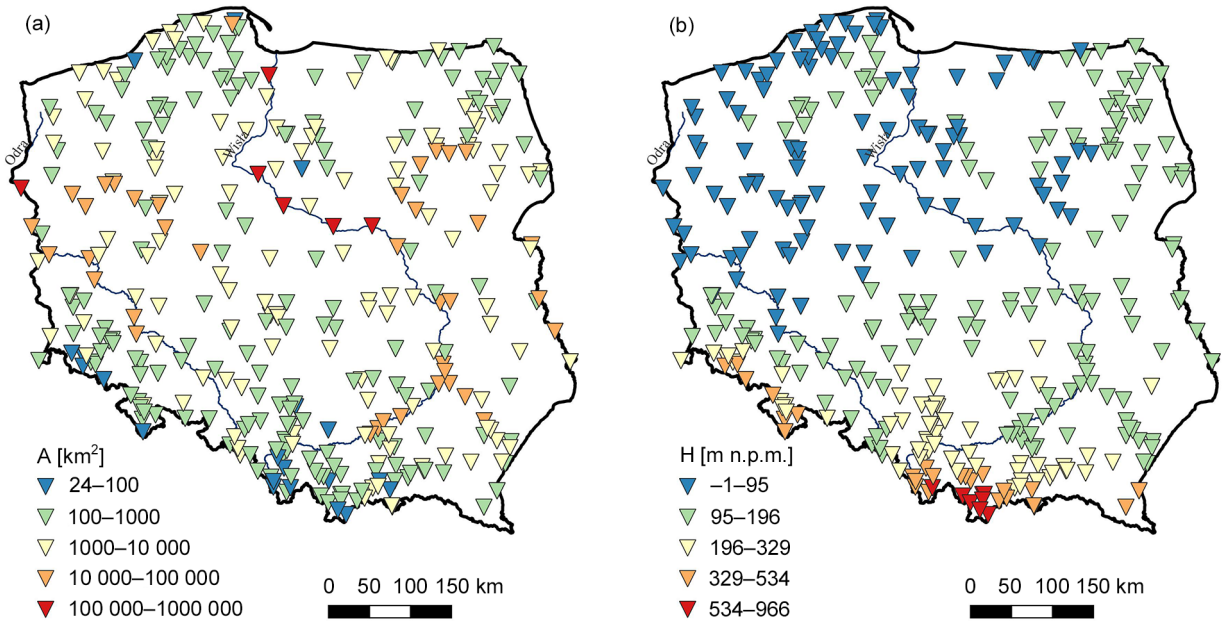
Obszar Polski, o powierzchni blisko 313 000 km^2, jest nachylony z południa na północny zachód, z najwyższym punktem – Rysami (2499 m n.p.m.) w Tatrach Wysokich. Charakterystyczną cechą ukształtowania terenu Polski jest pasowy układ ukształtowania powierzchni (układ lekko zbliżony do równoleżnikowego); od północy są to pasy: pobrzeży (Pobrzeża Południowo- i Wschodniobałtyckie), pojezierzy (Pojezierza Południowo- i Wschodniobałtyckie), nizin (niziny Środkowopolskie i Wysoczyzny z Polesiem), wyżyn (Wyżyny Polskie), kotlin (Podkarpacie Północne) i gór (Sudety i Karpaty). Polska jest krajem o urozmaiconej rzeźbie, ale w zdecydowanej większości nizinnym – około 91% powierzchni kraju znajduje się poniżej 300 m n.p.m.; niziny położone są w północnej i centralnej części kraju, natomiast wyżyny i góry na południu. Najwyższa część Polski, góry wysokie (ponad 1000 m n.p.m.), leżą na południu kraju i stanowią tylko 0,2% jej powierzchni.

Ze stacji wodowskazowych położonych na obszarze Polski do badań wybrano wszystkie te, na których zarejestrowane są pełne ciągi dobowych przepływów z ostatnich 50 lat hydrologicznych. W analizach wykorzystano zatem ciągi przepływów dobowych z okresu od 1 listopada 1971 roku do 31 października 2021 roku (50 lat hydrologicznych) w 355 przekrojach wodowskazowych zlokalizowanych na terenie Polski. Dane pozyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowego Instytutu Badawczego (ze strony https://danepubliczne.imgw.pl). Rozmieszczenie przekrojów wodowskazowych, wraz z informacją o wysokościach *H* położenia zer wodowskazów oraz powierzchniami zlewni *A* zamkniętych przekrojami wodowskazowymi przedstawiono na rycinie 1.

Przekroje wodowskazowe zamykają zlewnie o różnej powierzchni od 23,9 km^2 do 13 922,9 km^2, a wysokość położenia zera wodowskazów waha się od –0,56 m n.p.m. do 965,6 m n.p.m. Powierzchnie zlewni maleją wraz ze wzrostem wysokości położenia zera wodowskazów – współczynnik korelacji rang Spearmana między *A* i *H* wynosi –0,488, co oznacza, że korelacja jest raczej umiarkowana, ale istotna statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 5\%$ (ryc. 2).

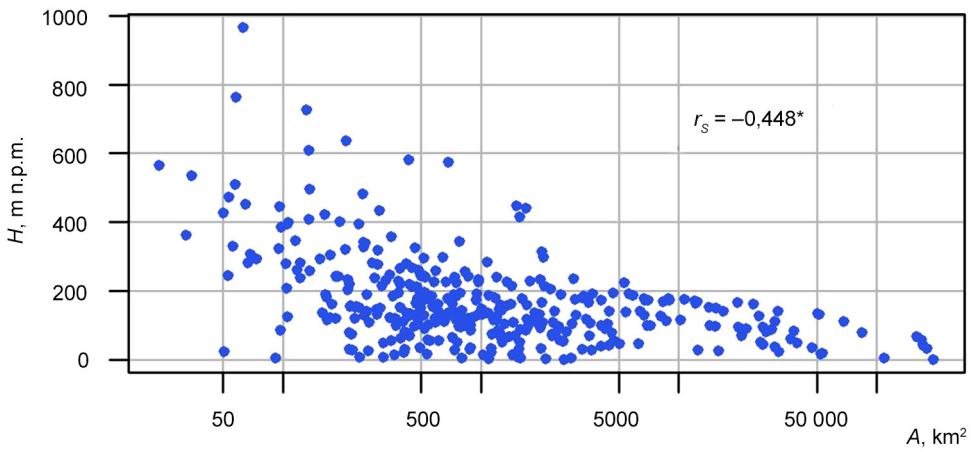
Ze względu na wspomniany wcześniej nizinny charakter obszaru Polski, zdecydowana większość, 313 z 355 stacji wodowskazowych, leży poniżej 300 m n.p.m. – 32 wodowskazy są położone na wyżynach (na wysokości położenia zera wodowskazu pomiędzy 300 a 500 m n.p.m.), pozostałych 10 wodowskazów jest górskich.

Około jedna piąta (76 z 355) badanych zlewni zamkniętych przekrojami wodowskazowymi ma powierzchnię mniejszą niż 300 km^2 (z czego 20 zlew-



Ryc. 1. Położenie wodowskazów na obszarze Polski wraz z informacją o: (a) powierzchni zlewni *A* oraz (b) wysokości *H* położenia zera wodowskazów (źródło: opracowanie własne)

Fig. 1. Location of gauging cross-sections in Poland with information on: (a) the area catchment area and (b) the gauging station elevation *H* (source: own elaboration)



Ryc. 2. Wykres rozrzutu przedstawiający zależność powierzchni zlewni *A* od wysokości *H* położenia zera wodowskazów; r_S jest współczynnikiem korelacji Spearmana, a symbol * oznacza korelację istotną statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ (źródło: opracowanie własne)

Fig. 2. Scatterplot that shows the relationship between catchment area *A* and gauging station elevation *H*; r_S is a Spearman correlation coefficient, asterisk * means a significant correlation at the significance level $\alpha = 0.05$ (source: own elaboration)

ni – mniejszą niż 100 km^2), natomiast obszary 46% (162 z 355) zlewni mają powierzchnię przekraczającą 1000 km^2. W pracy uwzględniono także kilka bardzo dużych zlewni – 44 zlewnie mają powierzchnie powyżej 10 000 km^2, z czego 12 zlewni – powyżej 50 000 km^2.

Na podstawie 50-letnich serii przepływów dobowych (N = 18 250 przepływów) w każdym z 355 przekrojów (w = 1, 2, ..., 355), obliczono przepływy charakterystyczne I rzędu, tj. szeregi rocznych przepływów minimalnych NQ_i^w, średnich SQ_i^w i maksymalnych $WQ_i^w (i = 1, 2, ..., 50)$, a następnie określono przepływy II rzędu Q_{char}:

$$SNQ^w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} NQ_i^w,\ WNQ^w = \max_{i=1,2,...n} NQ_i^w \quad (1)$$

$$NSQ^w = \min_{i=1,2,...n} SQ_i^w,\ SSQ^w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} SQ_i^w,\ WSQ^w = \max_{i=1,2,...n} SQ_i^w \quad (2)$$

$$NWQ^w = \min_{i=1,2,...n} WQ_i^w, SWQ^w = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} WQ_i^w \quad (3)$$

Symbol n w powyższych wzorach oznacza liczbę lat badanego wielolecia, czyli w tej pracy n jest równe 50.

Dla porównania, przepływy Q_{char} przedstawiono na wykresach i naniesiono na mapę Polski, tworząc rozkład przestrzenny Q_{char}.

Do obliczania empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia p dla zadanego przepływu charakterystycznego (w przekroju wodowskazowym w = 1, 2, …, n) zastosowano wzór:

$$p^w = P(Q^w \geq Q_{char}^w) = \frac{1}{N}\#\left\{Q_i^w : Q_i^w \geq Q_{char}^w\right\}_{i=1,2,...,N} \quad (4)$$

gdzie N to liczba dni w okresie 50-letnim, czyli N = 18 250 w badanym okresie 1 listopada 1971 roku do 31 października 2021 roku, a znak „#" oznacza liczebność (moc) zbioru, tj. liczbę przepływów nie mniejszych niż dany przepływ charakterystyczny Q_{char}.

Do oceny współzmienności zmiennych Q_{char} i Q_p, Q_{char} i A oraz Q_{char} i H wykorzystano korelację rang Spearmana.

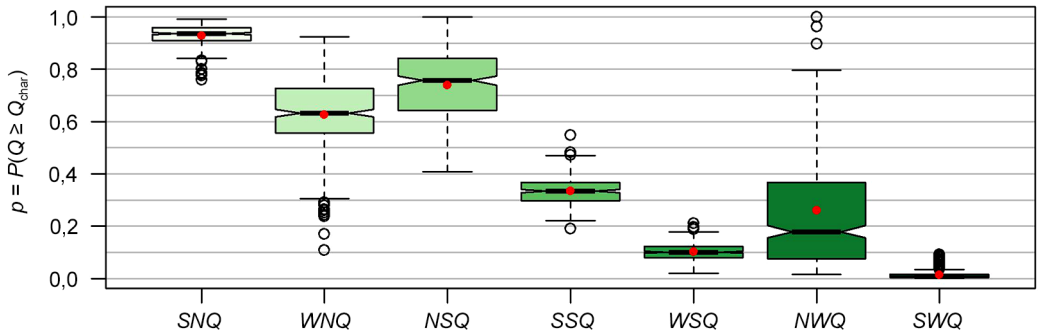
Wszystkie obliczenia statystyczne wykonano z wykorzystaniem pakietu oprogramowania GNU R (RCore Team 2023), a dla rozważanych w pracy testów przyjęto poziom istotności α = 0,05.

WYNIKI I DYSKUSJA

Na podstawie 50-letnich serii przepływów dobowych (lata hydrologiczne 1972–2021), dla każdej z 355 stacji wodowskazowych na obszarze Polski obliczono przepływy charakterystyczne Q_{char} określone równaniami (1–3), a następnie każdemu Q_{char} przypisano empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia $p = P(Q \geq Q_{char})$ wyznaczone z równania (4). Wyniki przedstawiono na rycinach 3 i 4 oraz w tabeli 1.

Spodziewane najwyższe wartości empirycznych prawdopodobieństw przewyższenia p przepływu charakterystycznego, świadczące o najrzadszym wystąpieniu konkretnego przepływu Q_{char} obserwuje się dla przepływów najniższych – *SNQ* (ryc. 3) – p we wszystkich z 355 przekrojów jest wyższe niż 76%, a średnio wynosi 93,9% (tab. 1). Ciąg średnich (i median) empirycznych prawdopodobieństw przewyższenia przepływów *SNQ*, *WNQ*, *SSQ*, *WSQ* i *SWQ* jest malejący; a średnie (i mediany) prawdopodobieństw p przepływów *NSQ* i *NWQ* – zaburzają ten trend; *NSQ* są średnio wyższe niż *WNQ*, a *NWQ* średnio wyższe od *WSQ* (ryc. 3). Tymczasem Węglarczyk (2014) w swoich analizach przeprowadzonych w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły na ciągach przepływów z lat 1984–2013 nie zaobserwował podobnych odmienności – w zlewni górnej Wisły średni przepływ *NSQ* jest niższy niż *WNQ*.

Analiza wykazała mocne zróżnicowanie wartości p na obszarze Polski (ryc. 4); w przypadku przepływów *NSQ*, *WNQ*, a przede wszystkim *NWQ* – odchylenie standardowe p jest wyższe niż 13%, natomiast rozstęp p dla *NSQ* jest bliski 60%, w pozostałych przypadkach przekracza 80% (tab. 1). We wszystkich wspomnianych przypadkach, dla *NSQ*, *WNQ*, *NWQ*, przedziały zmienności p są tak duże, że w większości się pokrywają, co w dużej mierze wynika z dużego zróżnicowania przepływów *NWQ* i *WNQ* na obszarze Polski. Zupełnie inną sytuację można zaobserwować w przypadku przepływów *SNQ*, *SSQ*, *WSQ* czy *SWQ* – gdzie rozstępy i odchylenia standardowe są mniejsze. Na dużą, skokową zmienność *WNQ* (przede



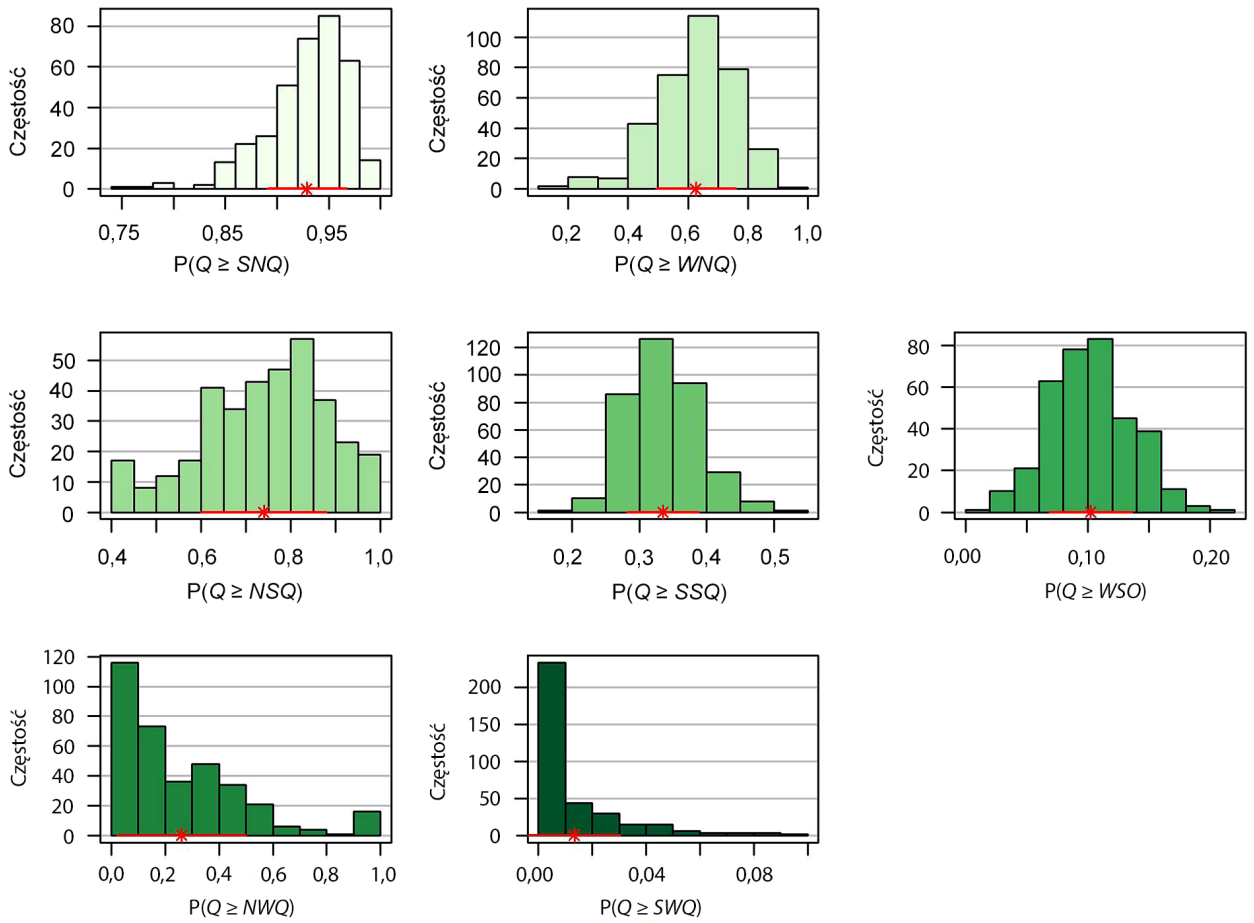
Ryc. 3. Rozkład empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] w 355 przekrojach wodowskazowych. Czerwone kropki oznaczają średnie empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia (źródło: opracowanie własne)

Fig. 3. Distribution of the empirical exeedance probability $P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] for the 355 gauging gross-sections. Red points means the average exeedance probability (source: own elaboration)

Tabela 1. Kwartyle p_{min}, $p_{25\%}$, $p_{50\%}$, $p_{75\%}$, p_{max}, rozstęp p, średnia $p_{śr}$, odchylenie standardowe s_p i współczynnik skośności cs_p empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $p = P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} (źródło: opracowanie własne)

Table 1. Quartiles p_{min}, $p_{25\%}$, $p_{50\%}$, $p_{75\%}$, p_{max}, range between min and max of p, mean $p_{śr}$ standard deviation s_p and the skewness cs_p of the empirical exeedance probability $p = P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} (source: own elaboration)

	Przepływ charakterystyczny Q_{char}, Characteristic flow Q_{char}						
	SNQ [m³/s]	*WNQ* [m³/s]	*NSQ* [m³/s]	*SSQ* [m³/s]	*WSQ* [m³/s]	*NWQ* [m³/s]	*SWQ* [m³/s]
p_{min}	76,0%	10,9%	40,7%	19,0%	2,0%	1,5%	0,1%
$p_{25\%}$	91,0%	55,6%	64,3%	29,7%	7,8%	7,5%	0,3%
$p_{50\%}$	93,6%	63,2%	75,7%	33,4%	10,1%	17,9%	0,6%
$\boldsymbol{p_{śr}}$	**93,9%**	**62,6%**	**74,0%**	**33,5%**	**10,2%**	**26,1%**	**1,3%**
$p_{75\%}$	95,8%	72,7%	84,3%	36,7%	12,2%	36,7%	1,6%
p_{max}	99,1%	92,4%	100,0%	54,8%	21,0%	100,0%	9,3%
rozstęp, range	23,1%	81,5%	59,3%	35,8%	19,0%	98,5%	9,2%
s_p	3,8%	13,3%	13,9%	4,3%	3,4%	23,8%	1,7%
cs_p	-1,21	-0,64	-0,36	0,44	0,22	1,46	2,29



Ryc. 4. Histogramy empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $p = P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] w 355 przekrojach wodowskazowych. Czerwona gwiazdka oznacza średnie empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia $p_{śr}$, a długość czerwonej linii jest równa dwóm odchyleniom standardowym s_d zmiennej p (źródło: opracowanie własne)

Fig. 4. Histograms of the empirical exeedance probability $p = P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] for the 355 gauging gross-sections. Red asterix means the average exeedance probability $p_{śr}$, and red line length is equal two standard deviations s_d of p (source: own elaboration)

wszystkim w zależności od przejętej długości okresu obserwacji) zwracali także uwagę Ozga-Zielińska i Brzeziński (1997) oraz Tomaszewski (2012).

Rozkłady prawdopodobieństw p dla przepływów niższych: *SNQ*, *WNQ* i *NSQ*, wykazują asymetrię ujemną, pozostałe zaś rozkłady – dodatnią (ryc. 4 i tab. 1). Spodziewanie najbardziej lewostronnie asymetryczny jest rozkład empirycznych prawdopodobieństw przewyższenia p przepływu *SNQ*, a najbardziej prawostronnie asymetryczny – rozkład p przepływu *SWQ*. Ze względu na małe współczynniki skośności, rozkłady p przepływów *WSQ* i *SSQ* są prawie symetryczne. Węglarczyk (2014) zwrócił uwagę na bimodalność rozkładu p dla *NSQ* (z lat 1984–2013) w zlewni górnej Wisły, która mogłaby świadczyć o istnieniu dwóch odrębnych populacji; uwzględniając jednak przekroje położone na obszarze całej Polski, dwumodalność *NSQ* (z lat 1972–2021) nie jest zauważalna (ryc. 4).

Ważnym wynikiem tej pracy, przede wszystkim pod względem aplikacyjnym, jest określenie średnich wartości empirycznych prawdopodobieństw

przewyższenia pozwalających przypisać (w przybliżeniu) kwantyl Q_p do przepływu charakterystycznego Q_{char}. Jak przedstawiono w tabeli 1, przepływowi charakterystycznemu *SNQ* można przypisać Q_p o prawdopodobieństwie przewyższenia p = 94% (95%, 95%), *WNQ* – 63% (76%, 60–80%), *NSQ* – 74% (53%), *SSQ* – 33% (28%), *WSQ* – 10%, *NWQ* – 26% a *SWQ* – 1,3% – dla porównania, w nawiasach podane są wartości otrzymane przez Węglarczyka (2014) dla zlewni górnej Wisły (wielolecie 1984–2013) oraz (po przecinku) przez Raczyńskiego (2015) dla Lubelszczyzny (wielolecie 1976–2013).

Najmniejszą różnicę między wynikami tej pracy i innych autorów zaobserwować można dla przepływu *SNQ*, któremu dla całej Polski przypisany jest kwantyl Q_p wynoszący $Q_{94\%}$, a dla zlewni górnej Wisły i Lubelszczyzny – kwantyl $Q_{95\%}$. W pozostałych przypadkach wyniki uzyskane przez różnych autorów znacząco się różnią, co wynika z przyjęcia do obliczeń danych z innych lat oraz prowadzenia badań na różnych obszarach (cała Polska a prawobrzeżna część zlewni górnej Wisły i Lubelszczyzna). Największą różnicę między wynikami badań w tej pracy i Węglarczyka (2014) obserwuje się dla przepływu *NSQ*, któremu przypisany kwantyl Q_p dla całej Polski wynosi $Q_{74\%}$, a dla zlewni górnej Wisły – $Q_{53\%}$.

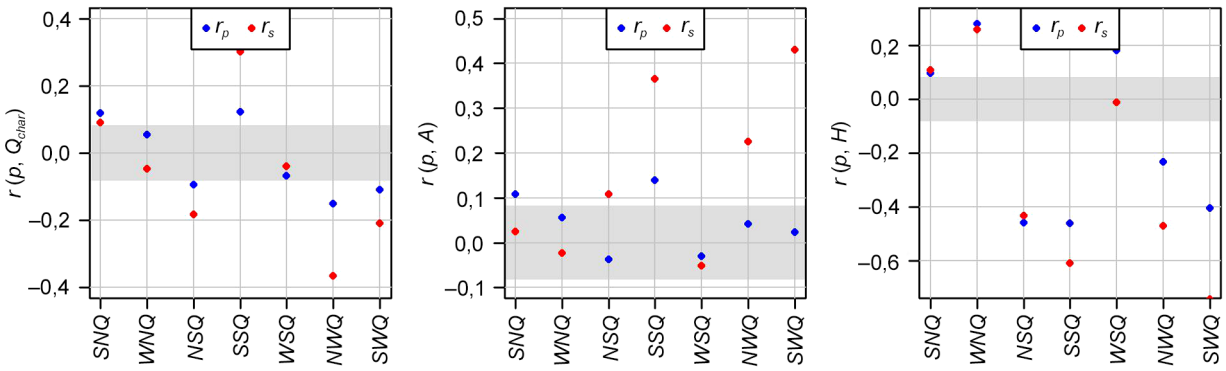
Jak już wspomniano we wstępie, jedną z częściej wykorzystywanych w analizie niżówek rzecznych wartością przepływu granicznego jest kwantyl $Q_{70\%}$ lub przepływy charakterystyczne *SNQ* lub *WNQ*. W swojej pracy w 2008 roku Tokarczyk (2008) uznała, że wartość $Q_{70\%}$ dla zlewni z obszaru Polski przyjmuje wartość pomiędzy *WNQ* a *SNQ*, a w 2010 roku (Tokarczyk 2010) stwierdziła, że $Q_{70\%}$ jest w przybliżeniu równe *SNQ* – badania prowadzone były w zlewni Nysy Kłodzkiej na danych z lat 1966–2005. Stwierdzenia te nie pokrywają się z wynikami analiz Węglarczyka (2014), Raczyńskiego (2015) oraz niniejszej pracy – niezależnie od obszaru i przyjętego wielolecia, przepływ $Q_{70\%}$ leży pomiędzy *WNQ* a *NSQ*, z tym że w zlewni górnej Wisły i na Lubelszczyźnie zbliżony jest do *WNQ* (Węglarczyk, 2014; Raczyński, 2015), a na obszarze całej Polski – raczej do *NSQ*. Wpływ na uzyskane wyniki ma fakt, że zmienność prawdopodobieństwa przewyższenia dla *WNQ* i *NSQ* jest znacząca – przedziały zmienności p na obszarze Polski są duże (odchylenia standardowe p wynoszą odpowiednio 13,3% i 13,9%), że w dużym stopniu pokrywają się (ryc. 4, tab. 1).

W większości z rozważanych przypadków empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia p jest istotnie skorelowane z przepływem charakterystycznym Q_{char} – wyjątek stanowią dwa przepływy: *WNQ* i *WSQ* (ryc. 5 i tab. 2). Korelacje istotne są niewielkie (niższe niż 0,4 co do wartości bezwzględnej) i w części przypadków (*SNQ* i *SSQ*) są dodatnie, a w części (*NSQ*, *NWQ*, *SWQ*) – ujemne.

W czterech z siedmiu przypadków korelacja między empirycznym prawdopodobieństwem przewyższenia p a polem powierzchni A zamkniętej przekrojem wodowskazowym jest niska (max 43%), ale istotna statystycznie na poziomie istotności α = 5%. Wszystkie istotne korelacje są dodatnie, co oznacza, że im większy obszar zlewni, tym większe prawdopodobieństwo przewyższenia danego przepływu Q_{char}, czyli tym dłuższy jest średni roczny czas trwania przepływów przekraczających zadaną wartość Q_{char}.

Wszystkie korelacje p i wysokości położenia zera wodowskazu H (z wyjątkiem *WSQ*) są istotne statystycznie, ale niektóre są dodatnie, a niektóre ujemne. Dodatnie współczynniki korelacji są bardzo małe (poniżej 0,3), ujemne natomiast są wyższe co do wartości bezwzględnej niż 0,4. Te ujemne korelacje oznaczają, że im wyżej przekrój wodowskazowy jest położony, tym mniej obserwuje się dni z przepływami charakterystycznymi *NSQ*, *SSQ*, *NWQ* i *SWQ*.

Wnioski uzyskane z analizy korelacji, szczególnie badania współzmienności p i H , pokrywają się z wnioskami wynikającymi z analizy rozkładów przestrzennych p przedstawionych na mapach (ryc. 6–8) – największe wartości empirycznych prawdopodobieństw przewyższenia przepływów *SNQ*, *WNQ*, *WSQ* obserwuje się na najwyższym południowym obszarze Polski, a najmniejsze p dla tych przepływów występują głównie w centralnej, najniższej Polsce (w przypadku tych przepływów corr(p, H) jest dodatnia). W pozostałych przypadkach korelacja między p a H jest ujemna – i rzeczywiście najmniejsze wartości empirycznych prawdopodobieństw przewyższenia obserwuje się w górach, największe – w pasie nizin.



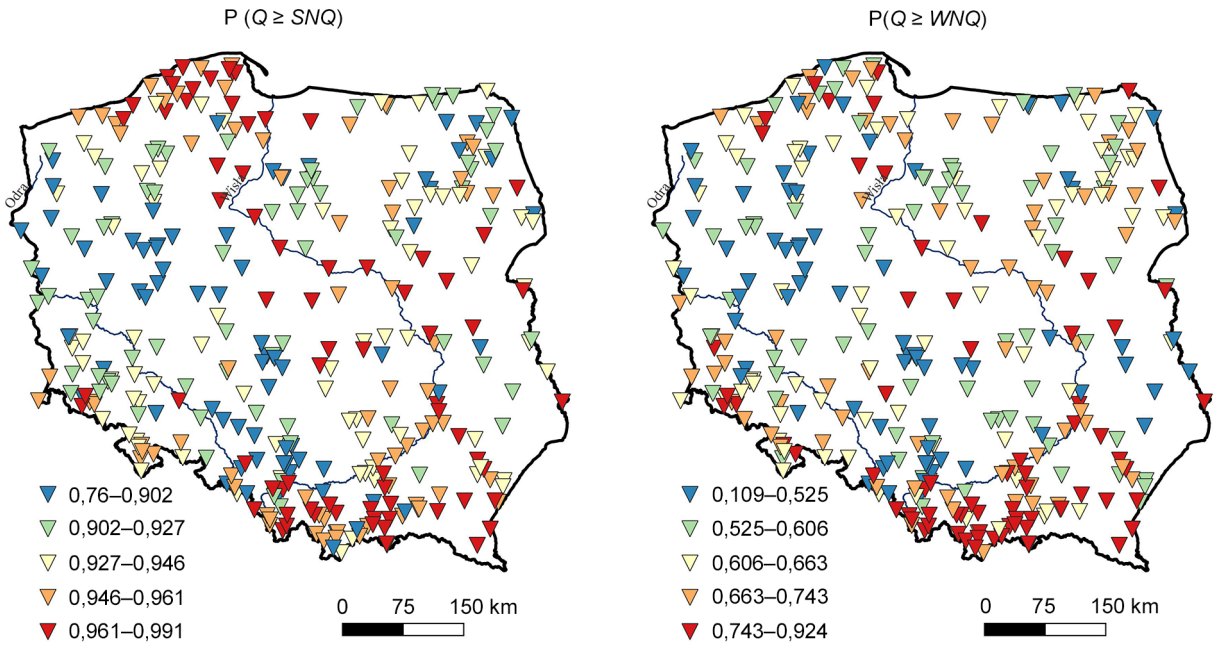
Ryc. 5. Współczynniki korelacji Spearmana r_s empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $p = P(Q \geq Q_{char})$ przepływu charakterystycznego Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] z: Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$], powierzchnią zlewni A [km^2] i wysokością położenia zera wodowskazu H [m n.p.m.]. Szare pole oznacza korelację nieistotną na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ (źródło: opracowanie własne)

Fig. 5. Spearman r_s correlation coefficients of the empirical exeedance probability $p = P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] with Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$], cachment area A [km^2] and gauging station elevation H [m.a.s.l.]. Grey box means a nonsignificant correlation at the significance level $\alpha = 0.05$ (source: own elaboration)

Tabela 2. Współczynniki korelacji Spearmana r_s empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $p = P(Q \geq Q_{char})$ przepływu charakterystycznego Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] z: Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$], powierzchnią zlewni A [km^2] i wysokością położenia zera wodowskazu H [m n.p.m.]. Gwiazdka * oznacza korelację istotną na poziomie istotności $\alpha = 0{,}05$ (źródło: opracowanie własne)

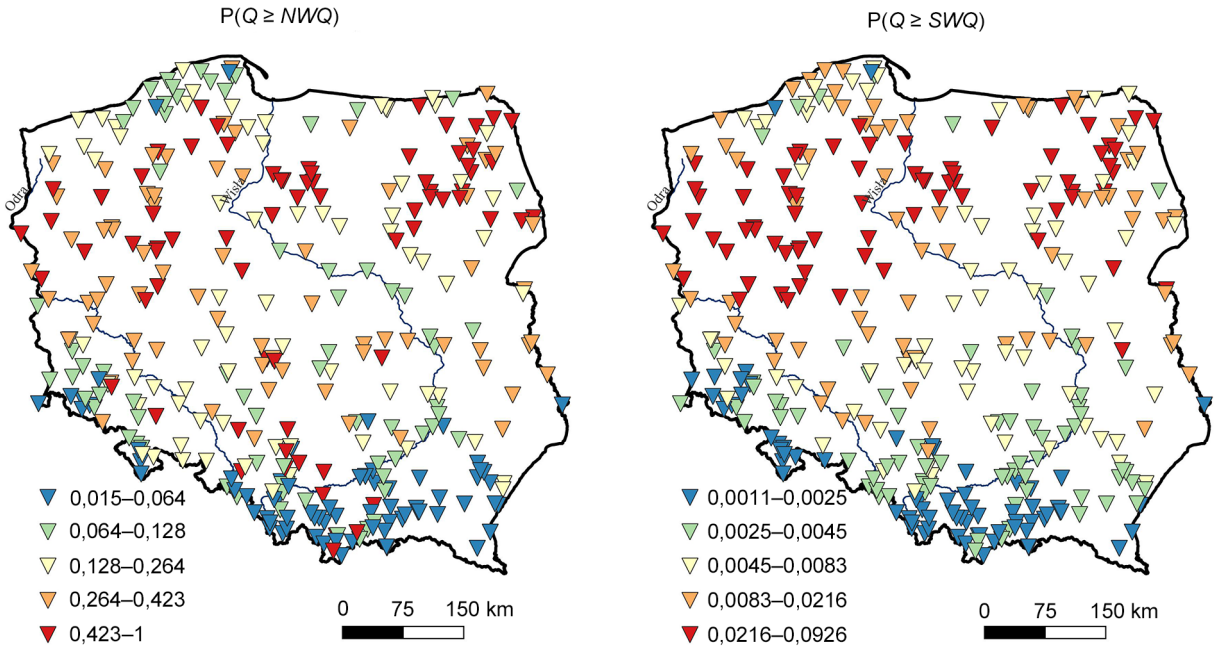
Table 2. Spearman r_s correlation coefficients of the empirical exeedance probability $p = P(Q \geq Q_{char})$ of the Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] with Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$], cachment area A [km^2] and gauging station elevation H [m.a.s.l.]. Asterisk * means a significant correlation at the significance level $\alpha = 0.05$ (source: own elaboration)

	Przepływ charakterystyczny Q_{char}, Characteristic flow Q_{char}						
	SNQ	*WNQ*	*NSQ*	*SSQ*	*WSQ*	*NWQ*	*SWQ*
$r_s(p, Q_{char})$	0,090*	–0,047	–0,182*	0,302*	–0,039	–0,366*	–0,210*
$r_s(p, A)$	0,025	–0,023	0,108*	0,366*	–0,052	0,225*	0,430*
$r_s(p, H)$	0,109*	0,260*	–0,434*	–0,610*	0,011	–0,470*	–0,743*



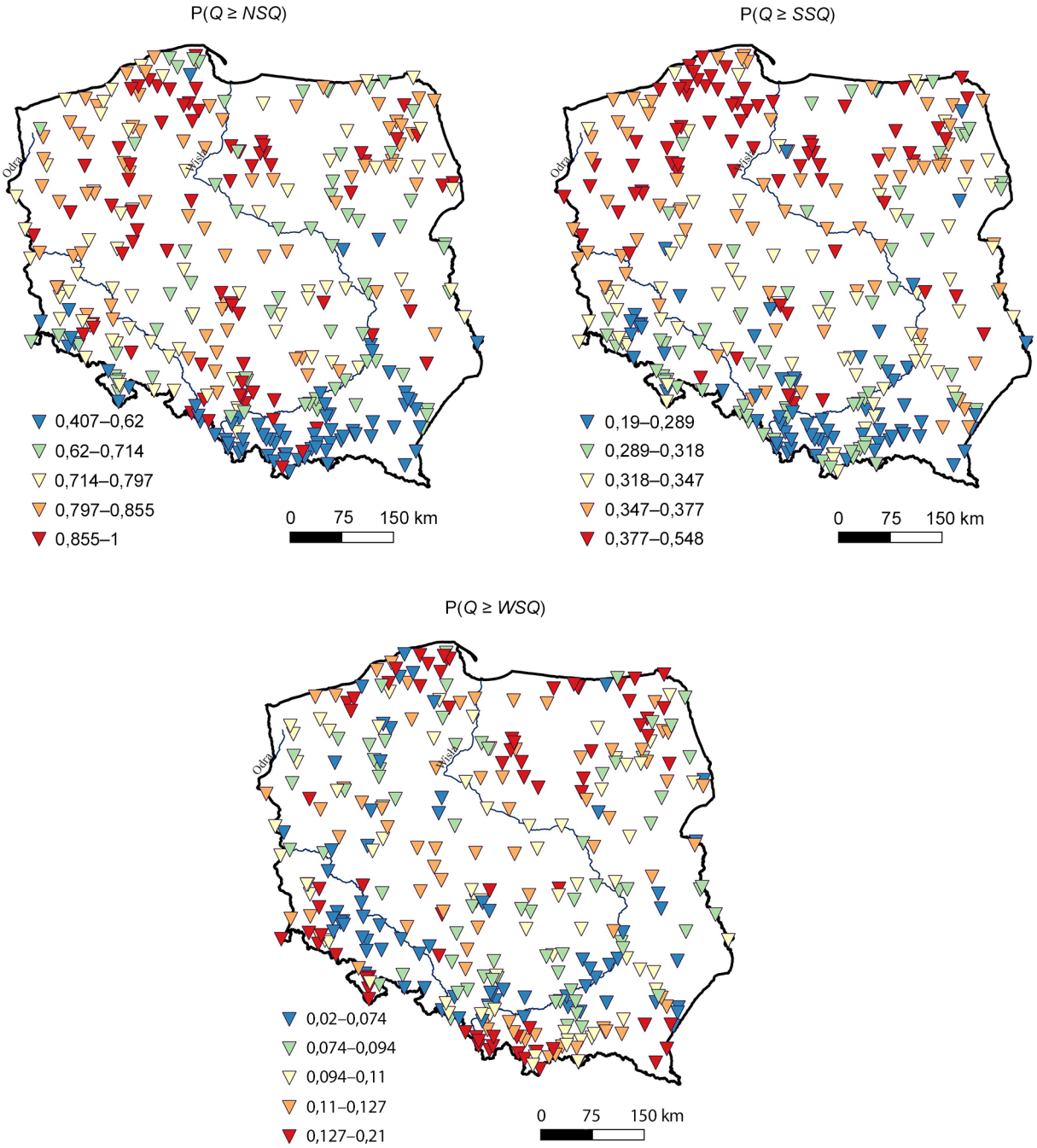
Ryc. 6. Rozkład przestrzenny empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} [m^3 · s^{-1}] = {*SNQ*, *WNQ*} na obszarze Polski (źródło: opracowanie własne)

Fig. 6. Spatial distribution of the empirical exeedance probability $P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [m^3 · s^{-1}] = {*SNQ*, *WNQ*} in Poland (source: own elaboration)



Ryc. 7. Rozkład przestrzenny empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} [m^3 · s^{-1}] = {*NWQ*, *SWQ*} na obszarze Polski (źródło: opracowanie)

Fig. 7. Spatial distribution of the empirical exeedance probability $P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [m^3 · s^{-1}] = {*NWQ*, *SWQ*} in Poland (source: own elaboration)



Ryc. 8. Rozkład przestrzenny empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia $P(Q \geq Q_{char})$ przepływów charakterystycznych Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] = {*NSQ*, *SSQ*, *WSQ*} na obszarze Polski (źródło: opracowanie własne)

Fig. 8. Spatial distribution of the empirical exeedance probability $P(Q \geq Q_{char})$ of the characteristic flows Q_{char} [$m^3 \cdot s^{-1}$] = {*NSQ*, *SSQ*, *WSQ*} in Poland (source: own elaboration)

WNIOSKI

Głównym celem pracy było ustalenie związku między przepływem prawdopodobnym Q_p a przepływami charakterystycznymi głównymi II rzędu, tj. *SNQ*, *WNQ*, *NSQ*, *SSQ*, *WSQ*, *NWQ*, *SWQ*, które nie są związane z częstością ich przekraczania. Dobór przepływu (charakterystyczny główny czy prawdopodobny) w definiowaniu niektórych zjawisk jest subiektywny i ustalany przez konkretnego autora, co utrudnia porównanie wyników badań prowadzonych przez wielu autorów. W takiej sytuacji wydaje się, że analiza związku między wspomnianymi przepływami jest potrzebna, ale jak już wcześniej wspomniano, badania takie są rzadkie.

W niniejszej pracy obliczono empiryczne prawdopodobieństwo przewyższenia przepływu charakterystycznego Q_{char} i wykorzystując aż 355 przekrojów wodowskazowych rozmieszczonych na obszarze Polski, podjęto próbę przypisania (w przybliżeniu) kwantyla Q_p do przepływu charakterystycznego Q_{char}.

O ile w przypadku przepływów *SNQ*, *WSQ*, *SWQ* i ewentualnie *SSQ* przypisanie średnich obszarowych wartości prawdopodobieństwa przewyższenia (odpowiednio są to kwantyle $Q_{94\%}$, $Q_{10\%}$, $Q_{1,3\%}$, $Q_{33\%}$) wydaje się obarczone niewielkim błędem (odchylenie standardowe *p* jest mniejsze niż niż 5%), o tyle w pozostałych przypadkach zmienność empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia danego przepływu charakterystycznego jest duża (odchylenia standardowe przekraczają 10%) – w tych przypadkach (ale pewnie lepiej jednak we wszystkich) należałoby stosować przypisanie Q_{char} do jednej wartości Q_p wraz z informacją o błędzie pomiarowym.

Biorąc pod uwagę, że najprawdopodobniej najczęściej używanym przepływem charakterystycznym w Polsce jest przepływ *SNQ* (wykorzystany m.in. w obliczaniu niżówek, przepływu nienaruszalnego i środowiskowego), znaczącym wnioskiem jest, że niezależnie od przyjętego wielolecia i obszaru badań, prawdopodobieństwo przewyższenia przepływu *SNQ* wynosi około 94–95% – 94% w niniejszej pracy, 95% w pracach: Węglarczyka (2014), Raczyńskiego (2015) i Stachego (1990).

Ważnych informacji dostarczyły obliczone w pracy korelacje (szczególnie zależności *p* i *H*) i załączone mapy obrazujące rozkład empirycznego prawdopodobieństwa przewyższenia przepływu Q_{char} na obszarze Polski. We wszystkich przypadkach (poza przepływem *WSQ*) współczynnik korelacji Spearmana corr (*p*, *H*) jest istotny statystycznie na poziomie istotności $\alpha = 5\%$, a wartości największe co do wartości bezwzględnej (czyli wyższe niż 0,4) występują dla przepływów *NSQ*, *SSQ*, *NWQ* i *SWQ*. Rozkład przestrzenny *p* przedstawiony na mapach potwierdza tę zależność – największe wartości prawdopodobieństwa przewyższenia najczęściej obserwuje się w górach, a najniższe na nizinach.

BIBLIOGRAFIA

Acreman, M. (2016). Environmental flows – basics for novices. WIREs Water, 3, 622–628. DOI: 10.1002/wat2.1160

Baran-Gurgul, K. (2020). Niżówki maksymalne w prawobrzeżnej części zlewni Górnej Wisły. Praca doktorska. Kraków: Politechnika Krakowska.

Baran-Gurgul, K. (2022). The spatial and temporal variability of hydrological drought in the Polish Carpathians. Journal of Hydrology and Hydromechanics, 70, 2, 156–169. DOI: 10.2478/johh-2022-0007

Baran-Gurgul, K., Kołodziejczyk, K., Rutkowska, A. (2022). Czasowa i przestrzenna zmienność średniego przepływu w Polsce – ujęcie regionalne. W: B. Więzik (red.), Współczesne problemy gospodarowania zasobami wodnymi: IV Krajowy Kongres Hydrologiczny, 21–23.09.2022. Warszawa: Komitet Gospodarki Wodnej Polskiej Akademii Nauk, 5–18.

Baran-Gurgul, K., Kołodziejczyk, K., Rutkowska, A. (2023). Spatial variability of average annual and monthly minimum river flow in Poland. Geoinformatica Polonica, 22, 7–20. DOI: 10.4467/21995923GP.23.001.18600

Barbarossa, V., Huijbregts, M., Beusen, A., Beck, H.E., King, H., Schipper, A.M. (2018). FLO1K, global maps of mean, maximum and minimum annual streamflow at 1 km resolution from 1960 through 2015. Sci Data 5, 180052. DOI: 10.1038/sdata.2018.52

Bartczak, A. (2007). Wieloletnia zmienność odpływu rzecznego z dorzecza Zgłowiączki. Polska Akademia Nauk, IGiPZ, Prace Geograficzne, 209.

Byczkowski, A. (1996). Hydrologia (tom I–II). Warszawa: Wydawnictwo SGGW.

Dębski, K. (1970). Hydrologia. Warszawa: Arkady.

Fleig, A.K., Tallaksen, L.M., Hisdal, H., Demuth, S. (2006). A global evaluation of stream-flow drought characteristics. Hydrol. Earth Syst. Sc., 10, 535–552.

IMGW (1980). Przepływy charakterystyczne rzek polskich w latach 1951–1970. Warszawa: Wydawnictwa Komunikacji i Łączności.

IMGW-PIB (2023) Rocznik hydrologiczny wód powierzchniowych 2022. Wydział Baz Danych i Archiwum IMGW-PIB.

Jakubowski, W. (2005). Rozkłady prawdopodobieństwa niżówek maksymalnych. Przegląd Geofizyczny, L, 3–4, 229–248.

Jakubowski, W. (2006). An application of the Bivariate Generalized Pareto Distribution for the probabilities of low flow extremes estimation. Hydrol. Earth Syst. Sc. Discuss., 3, 859–893.

Jakubowski, W. (2011). Rozkłady prawdopodobieństwa w ocenie suszy hydrologicznej. Monografia. Wrocław: Uniwersytet Przyrodniczy.

King, J., Brown, C. (2006). Environmental flows: Strikingthe balance between development and resource pro-tection. Ecology and Society,11, 26.

Kostrzewa, H. (1977). Weryfikacja kryteriów i wielkości przepływu nienaruszalnego dla rzek. Mat. Bad. IMGW, Gospodarka wodna i ochrona wód.

KZGW (2017a). Opracowanie materiałów merytorycznych do sporządzenia projektów planów przeciwdziałania skutkom suszy na obszarach dorzeczy. Etap II – aktualizacja opracowania „Ochrona przed suszą w planowaniu gospodarowania wodami – metodyka postępowania". Warszawa: Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej.

KZGW (2017b). Wdrożenie metody szacowania przepływów środowiskowych w Polsce. Weryfikacja i kalibracja metody szacowania przepływów środowiskowych – metodyka i część terenowa. Zad. 1.1.3 Metodyka weryfikacji i kalibracji metody szacowania przepływów środowiskowych. Warszawa: Krajowy Zarząd Gospodarki Wodnej.

Lambor, J. (1971). Hydrologia inżynierska. Warszawa: Arkady.

Ozga-Zielińska, M., Brzeziński, J. (1997). Hydrologia stosowana. Wyd. 2, Warszawa: PWN.

Ozga-Zieliński, B., Walczykiewicz, T., (red.) (2022). Metody obliczania przepływu średniego niskiego *SNQ*. Warszawa: IMGW-PIB.

Prawo Wodne (Ustawa z dnia 20 lipca 2017 r., Dz. U. 2017, poz. 1566).

R Core Team, R: A Language and Environment for Statistical Computing (R Foundation for Statistical Computing, Austria, http://www.R-project.org/, 2023) (dostęp: 14 sierpnia 2023).

Raczyński, K. (2015). Metody separacji niżówek na zdarzenia niezależne na przykładzie rzek Polski Wschodniej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie, 15 (4), 39–56.

Rozporządzenie Ministra Gospodarki Morskiej i Żeglugi Śródlądowej z 21 sierpnia 2019 r. w sprawie zakresu instrukcji gospodarowania wodą (Dz. U. RP, poz. 1795).

Rozporządzenie Ministra Środowiska z dnia 20 kwietnia 2007 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać budowle hydrotechniczne i ich usytuowanie (Dz.U. 2007 nr 86, poz. 579).

Smakhtin, V.U. (2001). Low flow hydrology: A review. J. Hydrol., 240, 147–186.

Stachý, J. (1990). Przepływ średni niski SNQ jako miarodajna charakterystyka projektowa. Przegląd Geofizyczny, 35, 1–2, 45–54.

Stachý, J., Biernat, B., Bondarczuk, Z., Czarnecka, H., Dobrzyńska, H., Fal, B. (1991). Zasady obliczania przepływów średnich niskich rzek polskich. Warszawa: IMGW.

Stahl, K. (2001). Hydrological Drought. A Study across Europe. PhD Thesis Albert-Ludwigs Universität Freiburg, Freiburger Schriften zur Hydrologie no 15, Freiburg, Germany.

Tallaksen, L.M., van Lanen, H.A.J. (Eds.) (2004). Hydrological drought – processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Developments in Water Science, 48. Elsevier B.V., 580.

Tokarczyk, T. (2008). Wskaźniki oceny suszy stosowane w Polsce i na świecie. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 7, 167–182.

Tokarczyk, T. (2010). Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej. Warszawa: Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej.

Tomaszewski, E. (2012). Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski. Łódź: Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego.

Tomaszewski, E. (2018). Drought streamflow deficits assessment, applying constant and variable threshold levels, as illustrated with the example of selected catchments in the Vistula river basin. Acta Sci. Pol. Formatio Circumiectus 17 (3), 205–216.

Węglarczyk, S. (2010). Statystyka w inżynierii środowiska. Kraków: Wydawnictwo PK.

Węglarczyk, S. (2014). Exceedance probability of selected low characteristic flows in mountain catchments. Infrastruktura i ekologia terenów wiejskich. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, 4, 3, 1421–1429. DOI: 10.14597/infraeco.2014.4.3.107

Witowski, K., Filipkowski, A., Gromiec, M.J. (2008). Obliczanie przepływu nienaruszalnego – poradnik. Warszawa: IMGW.

WMO. Statement on the Term Hydrological Normal, Hydrological Coordination Panel. https://community.wmo.int/activity-areas/hydrology-and-water-resources/hydrological-coordination-panel (dostęp: 31 października 2023).

Zelenhasić, E., Salvai, A. (1987). A method of streamflow drought analysis. Water Resour. Manag., 23, 1, 156–168.

Zielińska, M. (1963). Statystyczne metody opracowania niżówek. Geophysical Review, 8 (16), 1–2, 75–87.

EXCEEDANCE PROBABILITY OF CHARACTERISTIC FLOWS IN POLAND

ABSTRACT

Aim of the study

The goals of this paper are: to determine the empirical exeedance probability of the characteristic flows Q_{char} (*SNQ*, *WNQ*, *NSQ*, *SSQ*, *WSQ*, *NWQ* i *SWQ*) in Poland; to link the flows Q_{char} with quantiles Q_p and to examine the relationship between the empirical exeedance probability of the flow Q_{char} from: Q_p, the catchment area A and the gauging station elevation H.

Material and methods

Characteristic flows were calculated on the basis of 50-year daily flow time series (from November 1, 1971 to October 31, 2021) in 355 gauging cross-sections located throughout Poland. The empirical exeedance probabilities of the flows Q_{char} are presented in graphs, and their spatial distribution - in maps. In order to assess the relationship between the variables Q_{char} and Q_p, Q_{char} and A, and Q_{char} and H, Spearman's rank correlations were examined.

Results and conclusions

The results of the research allowed to assign (approximately) in Poland to the characteristic flows Q_{char} quantiles Q_p: $SNQ – Q_{94\%}$, $WNQ – Q_{63\%}$, $NSQ – Q_{74\%}$, $SSQ – Q_{33\%}$, $WSQ – Q_{10\%}$, $NWQ – Q_{26\%}$ i $SWQ – Q_{1,3\%}$.

The analyzes showed that in some cases the variability of the empirical exceedance probability of a given characteristic flow is so high that it would be appropriate to assign Q_{char} to one value Q_p together with information about the measurement error. The analysis of correlations and maps shows, above all, a significant dependence of the exceedance probability of the flows Q_{char} on the gauging station elevation H – in some cases it is a positive relationship, in some – negative.

Keywords: characteristic flow, probable flow, exceedance probability, flow duration curve