

Wpłynęło 17.09.2015 r.
Zrecenzowano 23.11.2015 r.
Zaakceptowano 01.12.2015 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

METODY SEPARACJI NIŻÓWEK NA ZDARZENIA NIEZALEŻNE NA PRZYKŁADZIE RZEK POLSKI WSCHODNIEJ

Krzysztof RACZYŃSKI^{ABCDEF}

Uniwersytet Marii Curie-Skłodowskiej, Wydział Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej

Streszczenie

W pracy przeprowadzono analizę zmienności parametrów niżówek w zależności od przyjętej metody separacji na zdarzenia niezależne. Analizę wykonano na podstawie wartości dobowych przepływów dla 17 przekrojów wodowskazowych IMGW, zlokalizowanych na rzekach Lubelszczyzny w okresie 01.11.1976–31.10.2013. Do wyznaczenia okresów niżówkowych zastosowano metodę TLM (ang. Threshold Level Method). Za wartość graniczną przyjęto przepływ o prawdopodobieństwie przewyższenia 90% (Q_{90}), odczytaną z krzywej czasów przewyższenia przepływu. Do separacji niżówek na zdarzenia niezależne zastosowano metodę SPA (ang. Sequent Peak Algorithm), opartą na bilansie objętości oraz deficytów odpływu, metodę średniej ruchomej, MA (ang. moving average), z 10-dniowym okresem uśrednienia, metodę POT (ang. Peak Over Threshold) oraz kryterium IC (ang. Inter-event time and volume based Criterion), dla którego przyjęto za maksymalną długość trwania przewyższenia przepływu graniczne okresy 3-, 5-, 6-, 10- oraz 15-dniowe. Wartości parametrów niżówek separowanych metodą SPA odstawały od pozostałych metod. Często występowały również zależności odwrotne, jednak zasadniczą różnicą między metodą SPA, a pozostałymi kryteriami było występowanie susz wieloletnich. Prowadziło to do występowania zmniejszonej liczby niżówek z jednoczesnym wydłużonym czasem ich trwania. Długie okresy bilansowania przepływu przekładały się na zmniejszenie wielkości sum deficytów odpływu uzyskiwanych tą metodą. Spośród zastosowanych kryteriów czasowych najlepszym dopasowaniem charakteryzowały się metoda MA oraz kryterium mieszane IC6. Wydłużanie czasu trwania przewyższenia przepływu t_{crit} dla kryterium IC powodowało przybliżanie parametrów niżówek do tych uzyskanych metodą SPA. Największe natężenie niżówek uzyskano metodą POT oraz kryterium IC3. Epizody identyfikowane tymi metodami były najkrótsze, a ich deficyty największe. Również zróżnicowanie między parametrami niżówek, z zastosowaniem metod POT oraz IC3 w zależności od charakteru zlewni, było najmniejsze.

Słowa kluczowe: Lubelszczyzna, niedobory odpływu, niżówki, separacja niżówek, susza hydrologiczna

Do cytowania For citation: Raczyński K. 2015. Metody separacji niżówek na zdarzenia niezależne na przykładzie rzek Polski Wschodniej. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 15. Z. 4 (52) s. 39–56.

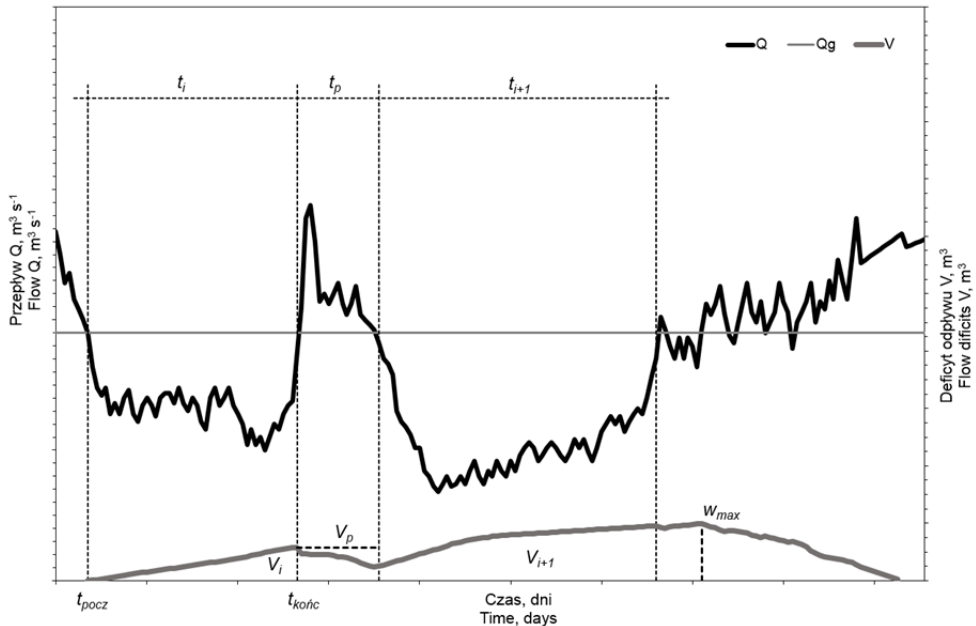
WSTĘP

W analizach niżówek często spotykanym problemem jest rozdział epizodów na zdarzenia niezależne. Niżówka, zgodnie z założeniami metody przepływów granicznych (Threshold Level Method, TLM), jest to okres, w którym wartości przepływu opadają poniżej przyjętego wcześniej poziomu granicznego Q_g [YEVJEVICH 1967; ZIELIŃSKA 1963a; 1963b]. Takie założenie może spowodować, że dojdzie do rozdziału dłuższych epizodów na dwa lub więcej zdarzeń, rozdzielonych nawet chwilowymi podniesieniami stanów wód w rzece [OZGA-ZIELIŃSKA, BRZEZIŃSKI 1997]. Przyczyny występowania takich podniesień mogą być różne, na przykład duży zrzut wody do cieków lub nawałny deszcz. W celu pominięcia różnych zjawisk losowych wpływających na ciągłość przepływów niżówkowych, autorzy przyjmują różne metody separacji niżówek. ZIELIŃSKA [1963a] przyjęła, że okresy niżówkowe powinno traktować się jako jedną niżówkę, jeżeli wartość progowa przepływu została przekroczona na okres do 15 dni, a wartości przepływów w tym czasie zawierały się w przedziale WNQ (Q_g) a SSQ . Rozpatrując niżówkę w kategoriach suszy hydrologicznej i związanych z nią deficytów odpływu, można dojść do wniosku, że odpowiednie kryterium rozdziału powinno być oparte na wartości deficytu odpływu powstałego w czasie trwania niżówki, a nie na czasach trwania określonych wartości przepływu. Na tej podstawie VOGEL i STEDINGER [1987] zastosowali algorytm bazujący na bilansie wodnym zbiornika. W czasie trwania niżówki deficyt odpływu rośnie i jest uzupełniany w okresach przewyższenia przepływu. Do czasu całkowitego uzupełnienia powstałych niedoborów wszystkie występujące niżówki uważane są za zależne. Obecnie w literaturze funkcjonują cztery główne metody separacji niżówek bazujące na wielkościach deficytów lub czasach trwania przewyższenia przepływów granicznych [TOKARCZYK 2010], a autorzy opracowań przyjmują najczęściej jedną metodę separacji. Wciąż jednak brakuje opracowań porównawczych parametrów niżówek w zależności od stosowanej metody separacji, gdy parametry wejściowe są niezmiennie, tak aby możliwa była ocena stopnia zmian parametrów niżówek w zależności od zastosowanej metody. W niniejszej pracy przedstawiono zmienność parametrów niżówek występujących w obszarze Lubelszczyzny, w zależności od stosowanej metody separacji, a także podjęto próbę oceny słuszności stosowania wskazanych metod w zależności od charakteru opracowania. W analizie zastosowano metodę opartą na deficycie odpływu – SPA, metody bazujące na wartościach czasowych – MA oraz POT, a także kryterium mieszane – IC. Dodatkowo dla kryterium IC zastosowano różne długości czasów krytycznych przewyższenia przepływu.

METODY BADAŃ

Okresy występowania niżówek zostały zidentyfikowane za pomocą metody przepływu granicznego (TLM). Metoda ta została wprowadzona przez YEVJEVICH [1967] i definiuje niżówkę jako okres, w którym wartości przepływu opadają poniżej przyjętej wartości granicznej przepływu Q_g . Do dalszej analizy za wartość progową przepływu przyjęto wysokość przepływu o prawdopodobieństwie przewyższenia 90% (Q_{90}), odczytaną z krzywej czasów przewyższenia przepływu, wyznaczonej dla całego okresu badawczego [WĘGLARCZYK 2014]. Dodatkowo przyjęto minimalny czas trwania niżówki równy 10 dni, w celu wykluczenia chwilowych obniżen poziomu wody w cieku [KAZNOWSKA, BANASIK 2011].

Kryterium bazującym na założeniach metody przepływu granicznego jest metoda POT (Peak Over Threshold), w której koniec niżówki następuje wraz z przewyższeniem wartości granicznej Q_g [BARAN-GURGUL 2014]. Niektórzy autorzy, stosując tę metodę, łączą niżówki w jedno zdarzenie, jeżeli przepływy rozdzielające dwa zdarzenia utrzymywały się krócej niż 3 dni [TOKARCZYK 2010]. Czas trwania niżówki t_i obejmuje okres przepływów niższych od przyjętego poziomu granicznego (rys. 1), a niedobór odpływu V_i rozumiany jest jako:



Rys. 1. Schemat podziału wartości przepływów dobowych na okresy niżówkowe; t – czas, V – objętość deficytu odpływu; Q_g – przepływ graniczny; źródło: opracowanie własne

Fig. 1. A scheme of dividing daily flow values into low flow periods; t – time, V – flow deficiency, Q_g – threshold level; source: own elaboration

$$V_i = \int_{t_{pocz}}^{t_{końc}} (Q_g - Q) dt \quad (1)$$

gdzie:

- t = czas (t_{pocz}) początku niżówki, ($t_{końc}$) końca niżówki;
- V_i = objętość niedoboru odpływu niżówki;
- Q = wielkość przepływu dobowego;
- Q_g = wielkość przepływu granicznego.

Kryterium IT (Inter-event Time criterion), zaproponowane przez ZELENHASIC i SALVAI [1987], definiuje dwie niżówki jako zdarzenia zależne, gdy przewyższenie wartości przepływu granicznego wystąpiło w okresie krótszym niż przyjęty wcześniej krytyczny czas trwania t_{crit} . Parametry niżówek zależnych obliczane są w sposób następujący:

$$\begin{aligned} t_n &= t_i + t_{i+1} \\ V_n &= V_i + V_{i+1} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

- t = czas trwania (t_n) zdarzenia, (t_i) pierwszej niżówki zależnej, (t_{i+1}) kolejnej niżówki zależnej;
- V = objętość niedoboru odpływu (V_n) zdarzenia, (V_i) pierwszej niżówki zależnej, (V_{i+1}) kolejnej niżówki zależnej.

Podobne kryterium zastosowała ZIELIŃSKA [1963b], stosując czasowe rozdziały niżówek przepływem przewyższającym poziom graniczny o czasie trwania do 15 dni. Różnice między tą metodą, a kryterium IT stanowi założenie, że wartości przepływu powinny zawierać się w przedziale pomiędzy Q_g , a przepływem średnim wieloletnim. Bazując na kryterium IT można sformułować podobne kryterium oparte na objętości wody, jaka została dostarczona w okresie podniesienia przepływu. MADSEN i ROSJEBERG [1995] zaproponowali modyfikację kryterium, polegającą na kombinacji kryteriów opartych na czasie i objętości. W metodzie IC (Inter-event time and volume based Criterion) parametry niżówek zależnych obliczane są według następujących zasad:

$$\begin{aligned} t_n &= t_i + t_{i+1} + t_p \\ V_n &= V_i + V_{i+1} - V_p \end{aligned} \quad (3)$$

gdzie:

- t = czas trwania (t_n) zdarzenia, (t_i) pierwszej niżówki zależnej, (t_{i+1}) kolejnej niżówki zależnej, (t_p) przewyższenia przepływu granicznego;

V = objętość niedoboru odpływu (V_n) zdarzenia, (V_i) pierwszej niżówki zależnej, (V_{i+1}) kolejnej niżówki zależnej, (V_p) przewyższenia przepływu granicznego.

Kolejnym kryterium opartym na czasie trwania jest metoda MA (Moving Average), polegająca na wygładzaniu wartości przepływu n -dniową średnią ruchomą [TOKARCZYK 2010]. W rezultacie krótkie przewyższenia przepływu są wygładzane w wyniku zastosowania średniej, a niżówki są traktowane jako zależne, jeżeli wartość średniej nie przekroczyła poziomu granicznego Q_g [TALLAKSEN i in. 1997]. Parametry niżówek są obliczane za pomocą równań (3). FLEIG i in. [2006] zalecają stosowanie 10-dniowej średniej ruchomej, natomiast HISDAL i in. [2002] średniej 11-dniowej.

Ostatnie kryterium oparte jest w całości na wartościach deficytów odpływu. Metoda SPA (Sequent Peak Algorithm) bazuje na bilansie odpływu:

$$w(t) = \begin{cases} w(t-1) + Q_g - Q(t) & \text{gdy : } w(t-1) + Q_g - Q(t) > 0 \\ 0 & \text{gdy : } w(t-1) + Q_g - Q(t) \leq 0 \end{cases} \quad (4)$$

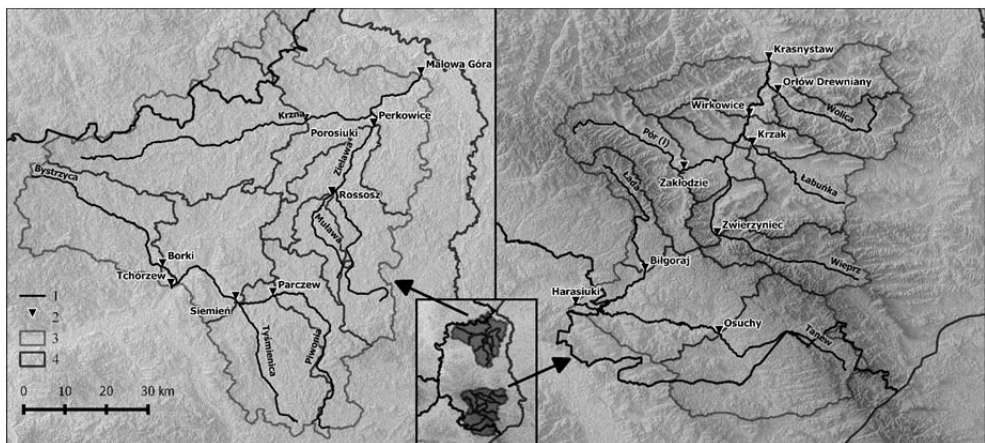
W kolejnych dniach od osiągnięcia przepływu granicznego Q_g , sumuje się wartości objętości odpływu, $w(t)$ – dodatnie w czasie niżówek, ujemne w czasie przewyższenia – do czasu, gdy wartość $w(t)$ ulegnie wyrównaniu (≤ 0). Maksymalna osiągnięta objętość w_{\max} jest wielkością deficytu odpływu całej niżówki. Do momentu osiągnięcia przez $w(t)$ wartości 0, wszystkie epizody określone metodą TLM są uważane za zależne. Czas trwania całej niżówki równy jest okresowi od początku ($w(t) > 0$) do momentu osiągnięcia w_{\max} . Ponieważ metoda ta opiera się na bezpośredniej definicji suszy, traktowanej jako niedobór wody, jest często stosowana w opracowaniach takich autorów, jak: KJELDSEN i in. [2000], TALLAKSEN i in. [1997], VAN LANEN i in. [2008].

Stosowanie powyższych metod związane jest z pewnymi ograniczeniami. Metoda SPA jest zalecana, gdy poziom graniczny jest niski, jednak wyniki odstają od wyników uzyskanych innymi metodami, również ze względu na występowanie zwiększonej liczby susz wieloletnich [TALLAKSEN i in. 1997]. Metoda średniej ruchomej (MA) powoduje modyfikację rzeczywistych wartości odpływu, przez co prowadzi do zmian wielkości deficytów z jednoczesnym zachowaniem czasów trwania; jest ona także zalecana do porównań rzek o różnym charakterze [FLEIG i in. 2006]. W przypadku kryterium IC zasadniczym problemem jest przyjęcie wartości krytycznej czasu trwania przewyższenia przepływu. W literaturze za t_{crit} przyjmowane są zarówno okresy 3-dniowe [SUNG, CHUNG 2014], jak i 5- lub 6-dniowe [FLEIG i in. 2006; KO, TARHULE 1994; MADSEN, ROSBJERG 1998; TALLAKSEN i in. 1997]. YANG i in. [2015] przyjęli okres miesiąca jako czas separacji niżówek, a YAHIAOUI i in. [2009] zalecają dobrać okres każdorazowo w zależności od potrzeb analizy. W metodzie POT wartości deficytów odpływu są najwięk-

sze z jednoczesnym zachowaniem najkrótszych czasów trwania [BARAN-GURGUL 2014].

W niniejszej pracy dokonano oceny zmienności parametrów niżówek separowanych za pomocą metody POT, 10-dniowej średniej ruchomej MA, SPA oraz kryterium IC z rozdziałem krytycznym na poziomie 3 dni (IC3), 5 dni (IC5), 6 dni (IC6), 10 (IC10) oraz 15 dni (IC15). Parametry niżówek wyznaczono z zastosowaniem powyższych definicji.

Analizę wykonano na podstawie wartości dobowych przepływów z okresu 01.11.1976 – 31.10.2013, udostępnionych przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej dla 17 przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na obszarze Polski Wschodniej. Północny obszar badawczy, położony na nizinie, stanowią dorzecza Krzny oraz Tyśmienicy, gdzie zlokalizowanych jest 8 profili wodowskazowych. Część południowa, położona w obszarze wyżynnym, obejmuje dorzecza Górnego Wieprza i Tanwi (rys. 2). Ciągi danych zostały zweryfikowane pod kątem występowania niejednorodności metodami genetycznymi oraz statystycznymi, według algorytmu opisanego przez OZGĘ-ZIELIŃSKĄ i in. [1999].



Rys. 2. Położenie przekrojów wodowskazowych w obszarze badawczym; 1 – rzeki, 2 – przekroje wodowskazowe, 3 – zlewnie badawcze, 4 – granice województw; źródło: opracowanie własne

Fig. 2. Location of gauging sections in the study area; 1 – rivers, 2 – gauging sections, 3 – river catchments, 4 – borders of provinces; source: own elaboration

WYNIKI BADAŃ

Jedną z podstawowych charakterystyk stosowanych do opisu niżówek jest liczba ich wystąpień w przedziale czasowym. Spośród badanych metod największą liczbę niżówek uzyskano za pomocą metody POT (średnio 83 niżówki) oraz IC3 (średnio 72 niżówki). Choć średnia liczba niżówek dla obszarów wyżynnych

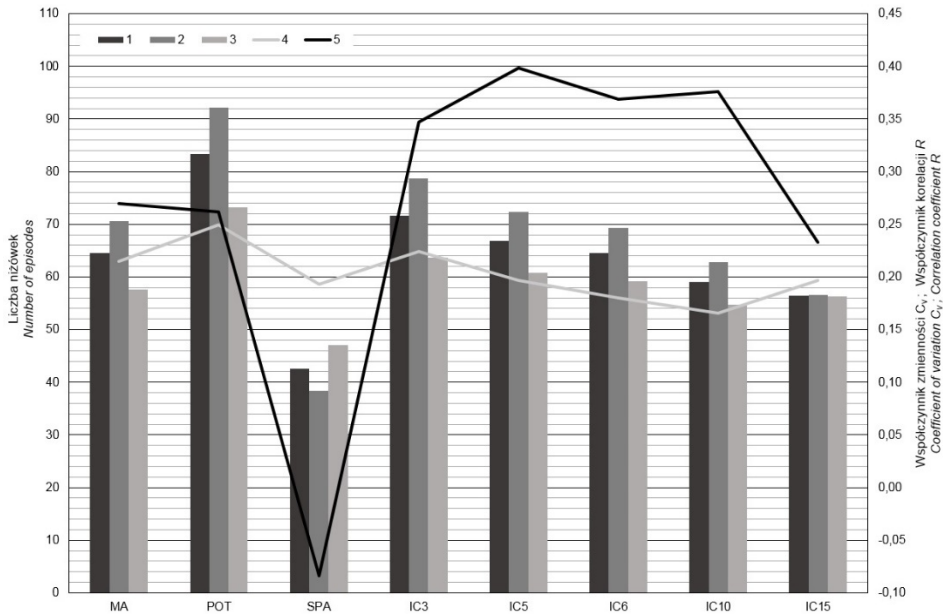
i nizinnych uzyskana dla metody POT wskazywała na rozdział w zależności od charakteru zlewni, to korelacja z wielkością zlewni była słaba, na poziomie 0,26 (rys. 3). Liczby niżówek uzyskane metodą POT charakteryzowały się również największą zmiennością wartości ($C_v = 25\%$).

Metodą SPA uzyskano najmniejszą liczbę niżówek (średnio 43 wystąpienia), gdy średnia zmienność wartości $C_v = 19,3\%$. Metoda ta, jako jedyna, wskazywała odwrotną korelację liczby niżówek w zależności od charakteru zlewni. W obszarze nizinym występowało średnio 47 niżówek, a w obszarze wyżynnym 38. Nie obserwowano tutaj również istotnych korelacji pomiędzy liczbą niżówek, a powierzchnią zlewni ($R = -0,08$). Największa liczba niżówek wystąpiła w Tchórzewie (54), a najmniejsza w Krasnymstawie (25). Gdy zastosowano metodę średniej ruchomej uzyskano korelację liczby wystąpień z powierzchnią zlewni na poziomie 0,27. W obszarze wyżynnym występowało średnio 70 niżówek, a w obszarze nizinym 57 epizodów. Średnio w całym obszarze, według metody MA, występowały 64 niżówki. Rozkład między średnią liczbą niżówek w kolejnych przekrojach był zbliżony do rozkładu uzyskanego w metodzie POT.

Stosując kryterium IC z 10-dniowym rozdziałem krytycznym, uzyskano najmniejszą zmienność wyników ($C_v \sim 16\%$). Wraz z wydłużaniem czasu krytycznego, przyjmowanego w metodzie IC, malała średnia liczba niżówek – od 72 wystąpień dla 3-dniowego czasu rozdziału, do 56 dla 15-dniowego t_{crit} (rys. 3). We wszystkich przypadkach stosowania kryterium IC zaobserwowano najmniejszą liczbę niżówek w przekrojach Borki oraz Parczew, a największą w Osuchach. Najwyższy stopień korelacji z powierzchnią zlewni występował, gdy stosowano 5-dniowy rozdział ($R = 0,40$) oraz 10-dniowy rozdział ($R = 0,38$), najniższy natomiast dla 15 dni ($R = 0,23$); w pozostałych przypadkach korelacja utrzymywała się na poziomie 0,35. Wraz z wydłużaniem krytycznego czasu trwania przewyższenia przepływu obserwowano zmniejszanie się różnicy między średnią liczbą niżówek występujących w obszarach wyżynnych a nizinnych. Dla kryterium 3-dniowego różnica ta wynosiła 15, a dla rozdziału 15-dniowego – 1.

Wyniki uzyskane metodami MA oraz IC5 i IC6 były zbliżone. Z wyjątkiem metody SPA wszystkie kryteria wskazywały największą liczbę wystąpień epizodów niżówkowych w przekrojach Krasnymstaw oraz Osuchy, a najmniejszą w Borkach i Parczewie. W przypadku metody SPA zależność była odwrotna, największa liczba niżówek występowała w zlewniach nizinnych, a najmniejsza w zlewniach wyżynnych, z minimum wypadającym w Krasnymstawie.

W przypadku metody SPA w analizie średniej długości czasu trwania niżówki uzyskano najwyższy stopień korelacji z wielkością powierzchni zlewni, wynoszący 0,37. Długości czasów trwania uzyskane w tej metodzie charakteryzowały się również największą zmiennością, wynoszącą 0,48. Średnia długość niżówki dla całego obszaru wynosiła 119 dni i była największą uzyskaną długością spośród wszystkich stosowanych metod. Według metody SPA, najmniej niżówek wystąpiło w przekroju Krasnymstaw, jednocześnie były one najdłuższe i trwały średnio 317

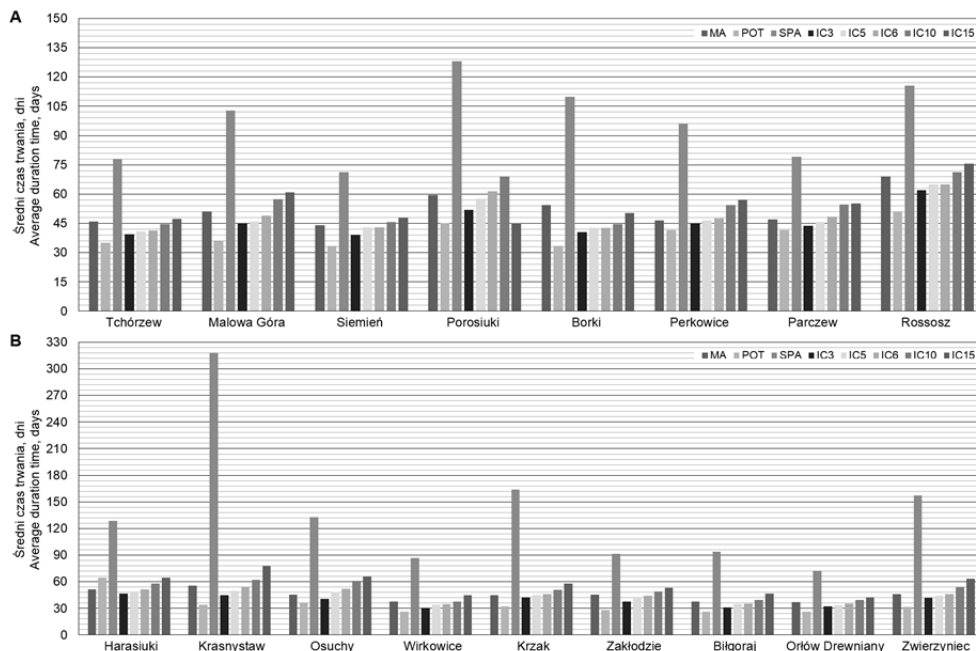


Rys. 3. Średnia liczba niszówek w zależności od metody separacji, współczynnik zmienności wartości C_v oraz współczynnik korelacji R liczby wystąpień z powierzchnią zlewni; 1 – średnia liczba niszówek, 2 – średnia liczba niszówek w zlewniach wyżynnych, 3 – średnia liczba niszówek w zlewniach nizinnych, 4 – współczynnik zmienności C_v , 5 – współczynnik korelacji R ; źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Average number of low flow episodes depending on the separation method, coefficient of variation C_v and coefficient of correlation R between the number of episodes and catchment area; 1 – average number of episodes; 2 – average number of episodes in upland catchments; 3 – average number of episodes in lowland catchments; 4 – coefficient of variation C_v ; 5 – correlation coefficient R ; source: own elaboration

dni. W przypadku pozostałych metod, najdłuższe czasy trwania niszówek występowały w przekroju Rossosz, a najkrótsze w przekroju Wirkowice i Orłów Drewniany (rys. 4).

Średnie czasy trwania niszówek występujących w obszarze wyżynnym były dłuższe od epizodów obszaru nizinnego według metod SPA oraz IC15. Średni czas trwania niszówki w obszarze wyżynnym, uzyskany metodą SPA, wynosił 138 dni, a w obszarze nizinnym 97 dni, natomiast po zastosowaniu kryterium IC15, epizody trwały średnio 57 dni w obszarze wyżynnym oraz 54 dni w obszarze nizinnym. Dla kryterium rozdziału 15-dniowego stopień korelacji średniej długości niszówki z powierzchnią zlewni wynosił 0,2, a współczynnik zmienności $C_v = 18\%$. W przypadku metod MA, POT oraz IC10, średnie długości niszówek w obszarach wyżynnych oraz nizinnych były zbliżone, a współczynnik korelacji z wielkością zlewni wynosił ok. 0,12. Najkrótszy średni czas trwania niszówek uzyskano według metody POT, co jest zgodne z założeniami definicyjnymi.

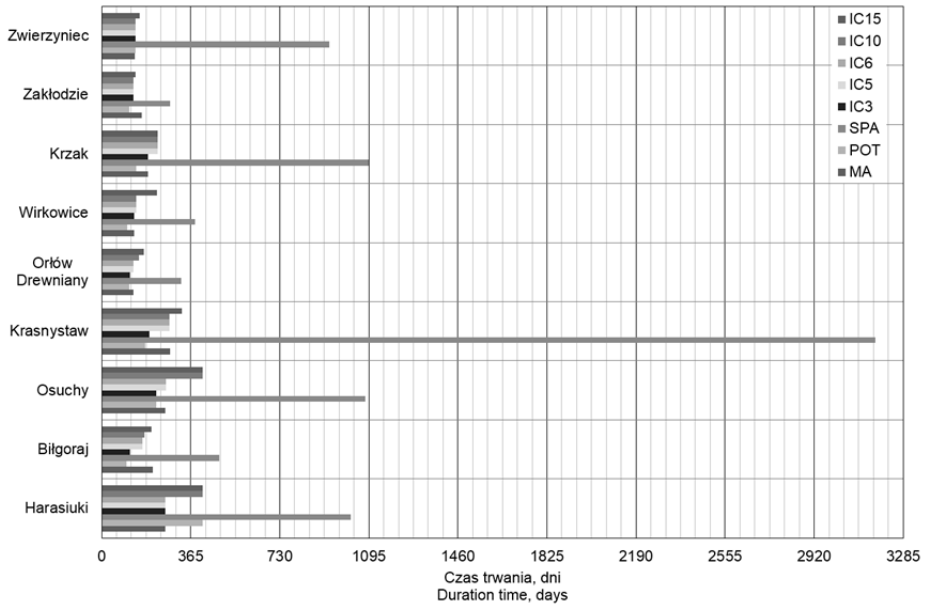


Rys. 4. Średni czas trwania niżówki (dni); A – zlewnie nizinne, B – zlewnie wyżynne;
źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Average duration of low flow episode (days); A – lowland catchments; B – upland catchments;
source: own elaboration

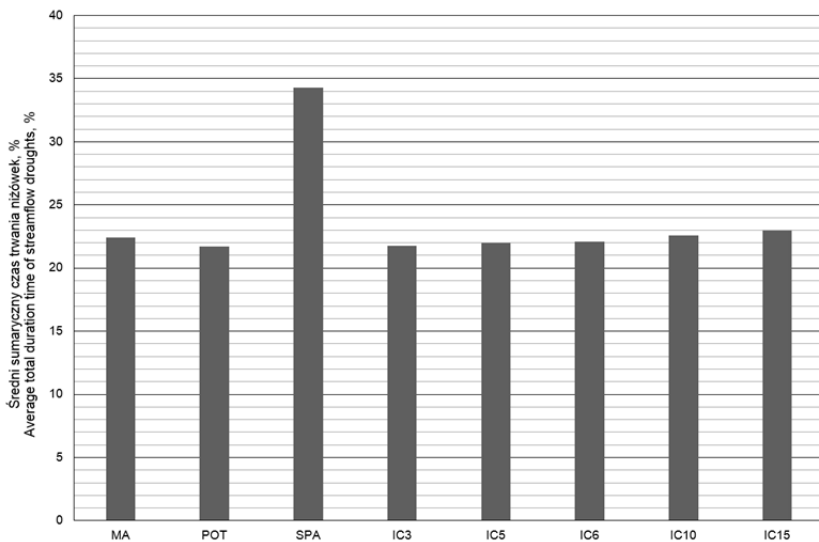
W obszarze nizinnym maksymalne czasy trwania niżówek uzyskane wszystkimi metodami opartymi na czasach trwania przepływów przewyższających Q_g , były od 1,3 do 2,5 razy krótsze od czasów uzyskanych metodą SPA. W obszarze wyżynnym, maksymalne czasy trwania niżówek uzyskane metodami IC10 oraz IC15 były od dwóch do czterech razy krótsze od czasów uzyskanych z zastosowaniem metody SPA, oraz od trzech do siedmiu razy krótsze z zastosowaniem pozostałych metod. Wieloletnie susze występowały tylko w obszarze wyżynnym, po zastosowaniu metod POT, IC10 oraz IC15, w przekroju Harasiuki (maksymalny czas trwania wynosił 414 dni) oraz w przekroju Osuchy w metodach IC10 oraz IC15. W przypadku metody SPA, wieloletnie susze nie wystąpiły tylko w przekrojach Orłów Drewniany oraz Zakłodzie, a w pięciu przekrojach występowały susze trwające ponad dwa lata, z maksimum w Krasnymstawie (rys. 5).

Sumaryczna długość czasów trwania niżówek według wszystkich metod, z wyjątkiem SPA, zawierała się w przedziale 21–23% długości całego okresu badawczego (rys. 6). W obszarze nizinnym niżówki trwały w sumie ok. 2990 dni, a w obszarze wyżynnym 3165 dni. W przypadku metody SPA sumaryczna długość trwania niżówek w obszarze wyżynnym wynosiła 4924 dni oraz 4565 dni w obszarze nizinnym. Niżówki uzyskane tą metodą trwały przez ponad 34% całego okresu



Rys. 5. Maksymalny czas trwania niżówki (dni) w zlewniach wyżynnych;
źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Maximum duration of low flow (days) in upland catchments;
source: own elaboration

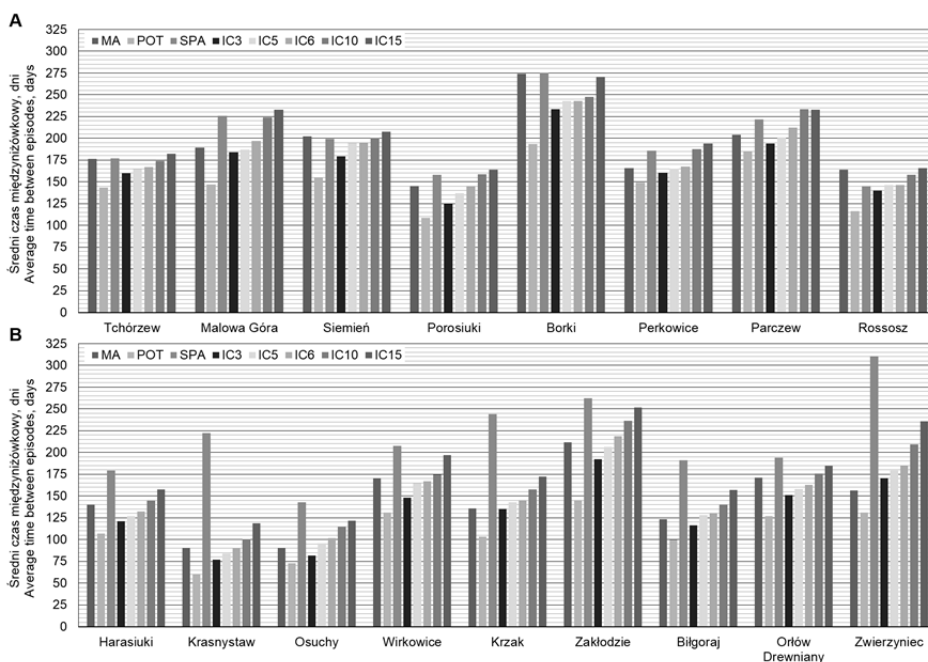


Rys. 6. Średni sumaryczny czas trwania niżówek w stosunku do długości całego okresu (%);
źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Average total duration of low flow related to the entire study period (%);
source: own elaboration

badawczego, jednocześnie sumaryczna długość niżówek uzyskanych tą metodą była przeciętnie skorelowana ($R = 0,33$) z wielkością powierzchni zlewni. Wszystkie metody wskazywały na występowanie najdłuższych sum czasów trwania w dużych zlewniach wyżynnych (do przekroju: Harasiuki, Krasnystaw oraz Osuchy), a także w małej zlewni nizinnej, w przekroju Rossosz, a najkrótszych w małych zlewniach wyżynnych (do przekrojów Biłgoraj oraz Orłów Drewniany).

Średnia długość okresów międzyniżówkowych była najkrótsza w metodzie POT i wynosiła 128 dni. Długość okresów międzyniżówkowych uzyskanych metodą MA, była w większości przypadków zbliżona do tych uzyskanych kryteriami IC5 oraz IC6. Najdłuższe okresy uzyskano w metodzie SPA, były one również dłuższe o ok. 19 dni w obszarze wyżynnym. Dla pozostałych metod okresy międzyniżówkowe obszaru nizinnego były dłuższe od ok. 45 dni dla metody MA do 28 dni w kryterium IC15. W przypadku kryteriów IC, wraz z wydłużaniem krytycznego czasu trwania przewyższenia rosła długość okresów międzyniżówkowych, a przyrost był odwrotnie proporcjonalny do powierzchni zlewni (rys. 7). Gęstość niżówek charakteryzowana za pomocą wskaźnika gęstości, opisanego przez TOMASZEWSKIEGO [2012] dla metody SPA, wskazywała na około dwukrotne wydłu-

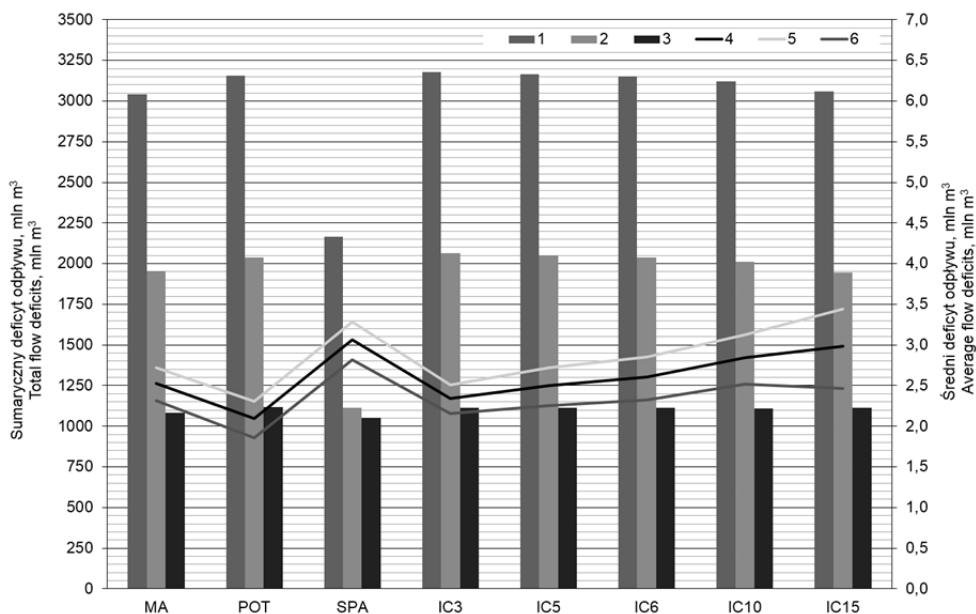


Rys. 7. Średnia długość okresów międzyniżówkowych (dni); A – zlewnie nizinne, B – zlewnie wyżynne; źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Average time between low flow episodes (days); A – lowland catchments; B – upland catchments; source: own elaboration

zenie okresów międzynieźwówkowych w stosunku do długości samych niżówek. Dla pozostałych metod wydłużenie to było zbliżone i wynosiło ok. 3,6.

Spośród zastosowanych metod rozdziału niżówek tylko metoda SPA bazuje w całości na wartościach deficytów odpływu. W metodzie tej uzyskano najmniejsze sumaryczne wielkości deficytu odpływu, z jednoczesną największą wartością współczynnika korelacji między tymi deficytami, a wielkością zlewni, wynoszącą 0,82. Dla pozostałych metod wartość współczynnika korelacji wynosiła ok. 0,79. Spośród wszystkich stosowanych metod, największą wartość sumy deficytów odpływu uzyskano metodami POT oraz IC3, a metodą średniej ruchomej oraz 15-dniowego t_{crit} wartości najbardziej środkowe. Sumy deficytów odpływu w obszarze wyżynnym są około dwukrotnie większe od deficytów odpływu obszaru nizinnego z zastosowaniem wszystkich metod opartych na kryteriach czasowych (rys. 8). Dla metody SPA sumy deficytów odpływu obu tych regionów są zbliżone. We wszystkich stosowanych metodach deficyty odpływu w obszarze nizinnym są zbliżone, natomiast w obszarze wyżynnym w metodzie SPA są znacznie niższe, co po-



Rys. 8. Sumaryczne oraz średnie deficyty odpływu (mln m³); 1 – suma deficytów odpływu, 2 – suma deficytów odpływu wlewni wyżynnych, 3 – suma deficytów odpływu wlewni nizinnych, 4 – średni deficyt odpływu, 5 – średni deficyt odpływu w wlewniach wyżynnych, 6 – średni deficyt odpływu w wlewniach nizinnych; źródło: opracowanie własne

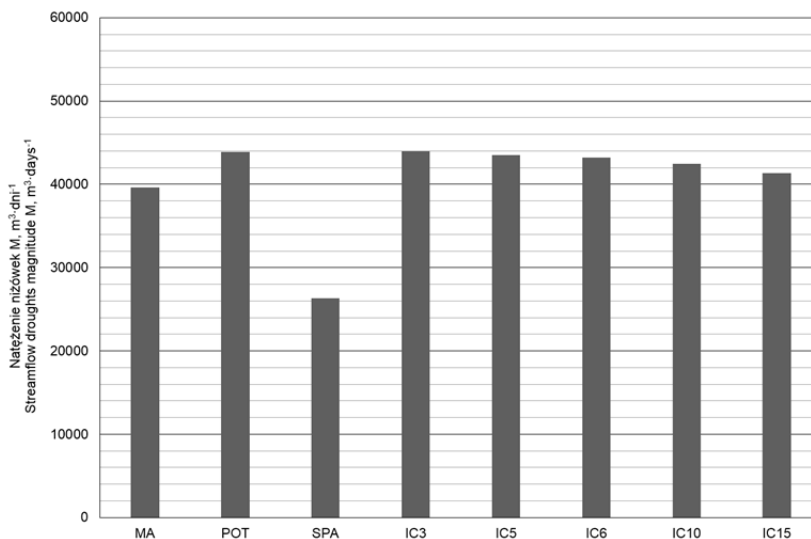
Fig. 8. Total and average flow deficits (million m³); 1 – total outflow deficit; 2 – total outflow deficit in upland catchments; 3 – total outflow deficit in lowland catchments; 4 – average flow deficit; 5 – average outflow deficit in upland catchments; 6 – average outflow deficit in lowland catchments; source: own elaboration

krywa się z występującymi w tej metodzie, w tym obszarze, suszami wieloletnimi, a więc długimi okresami bilansowania deficytów odpływu. Średnie wartości deficytów odpływu w zlewniach wyżynnych są większe od zlewni nizinnych w każdej stosowanej metodzie. W metodzie SPA oraz kryterium IC15 wartości średnich deficytów odpływu są zbliżone, podobnie jak wartości średnich deficytów odpływów w metodach MA, IC5 oraz IC6. Wskaźnik korelacji dla średnich deficytów odpływu oraz powierzchni zlewni jest najniższy w metodzie POT i wynosi 0,84, w metodzie SPA ok. 0,89, a w metodach IC3, MA oraz IC5 ponad 0,90. W odniesieniu do powierzchni zlewni największe wartości deficytów odpływu uzyskano metodą SPA oraz IC15. Wartości te odbiegały od wyników uzyskanych innymi metodami, zwłaszcza POT, której deficyty były najniższe.

DYSKUSJA WYNIKÓW

Największe zróżnicowanie liczby niżówek ze względu na charakter zlewni występuje z zastosowaniem metody separacji POT oraz 3-dniowym kryterium IC. W metodach tych występuje największa liczba niżówek, jednak nie jest ona zależna od wielkości zlewni. Niżówki rozdzielane metodami POT oraz IC3 mają najkrótszy średni czas trwania, a suma trwania wszystkich niżówek obejmowała ok. 21% długości całego okresu badawczego. Najdłuższe epizody trwały przeciętnie 170 dni w obszarze wyżynnym oraz 150 dni w obszarze nizinym. Również okresy międzynieżówkowe w metodach POT oraz IC3 były najkrótsze. W przypadku deficytów odpływu, zastosowanie do separacji niżówek metody POT oraz kryterium IC3 było związane z występowaniem największych wartości deficytów oraz silną korelacją z powierzchnią zlewni ($R = 0,8$). Niżówki separowane tymi metodami mają największe natężenie, opisywane wartością wskaźnika M ($\text{m}^3 \cdot \text{doba}^{-1}$) (rys. 9). Niżówki uzyskane przez separację algorytmem bazującym na objętościach przepływu (SPA) charakteryzowały się w większości przypadków zależnościami odwrotnymi, a parametry niżówek odstawały od tych obserwowanych dla kryteriów rozdziału opartych na czasach trwania przewyższenia przepływu. W metodzie tej, liczba niżówek była najmniejsza i nie zaobserwowano korelacji z powierzchnią zlewni. Czasy trwania niżówek były w metodzie SPA najdłuższe, gdyż metoda ta praktycznie eliminuje krótkie serie przewyższenia przepływu. Podobne wyniki z metodą SPA, w zestawieniu z metodą POT, uzyskała BARAN-GURGUL [2014]. Sumarycznie niżówki obejmowały ok. 34% całkowitej długości okresu badawczego i były o ok. 350 dni dłuższe w obszarze wyżynnym, gdzie występowała również mniejsza liczba epizodów. Sumaryczna wielkość deficytu odpływu w tej metodzie w całym obszarze badawczym była najmniejsza, chociaż średnie wielkości deficytu odpływu dla pojedynczej niżówki były najwyższe. Suma deficytów odpływu dla regionu nizinnego była zbliżona do wartości uzyskanych pozostałymi metodami. Zastosowanie metody SPA w obszarze wyżynnym prowadziło do obserwacji susz

wieloletnich, z czego najdłuższe, w połowie przekrojów w tym obszarze, trwały ponad 2 lata (absolutne maksimum w Krasnymstawie, ponad 8 lat). Była to jedyna metoda, w której, podobnie jak u TALLAKSEN i in. [1997], susze wieloletnie występowały obszarowo. Parametry niżówek uzyskane metodą SPA w najwyższym stopniu oddawały korelację z powierzchnią zlewni, jednak ich natężenie było najmniejsze (rys. 9).



Rys. 9. Natężenie niżówek – wskaźnik M ($m^3 \cdot dni^{-1}$); źródło: opracowanie własne

Fig. 9. Low flow intensity – index M ($m^3 \cdot days^{-1}$); source: own elaboration

Parametry niżówek uzyskanych metodą średniej ruchomej oraz kryteriami 5- i 6-dniowego rozdziału IC charakteryzowały się zbliżonymi wartościami. Również TALLAKSEN i in. [1997] uzyskali zbliżone wyniki metodami MA oraz IC5 w analizie dwóch duńskich zlewni, natomiast FLEIG i in. [2006] w analizie obejmującej 16 zlewni położonych w różnych strefach klimatycznych wskazali, że stosowanie metody MA skutkuje mniejszą liczbą epizodów o średnim czasie trwania krótszym od niżówek uzyskanych za pomocą kryterium IC5. Chociaż, po zastosowaniu metody MA uzyskano w badanym obszarze średnio kilka epizodów mniej niż w przypadku kryterium IC5, to ich czasy trwania były zazwyczaj o kilka dni dłuższe. Zmienność wartości uzyskanych metodą MA była mniejsza, a stopień korelacji z powierzchnią zlewni, w większości przypadków, wyższy od wartości w metodach IC5 oraz IC6. Dla metody średniej ruchomej różnica wartości parametrów dla rzek w zależności od ich charakteru była zauważalna, jednak nie tak duża, jak w przypadku niektórych kryteriów IC. Wydłużanie okresu przewyższenia przepływu t_{crit} w przypadku stosowania kryteriów IC skutkowało zmniejszaniem się liczby niżówek oraz wzro-

stem długości czasu trwania epizodu oraz okresów międzyniżówkowych. Średnie wielkości deficytów odpływu pojedynczych niżówek wraz z wydłużeniem długości okresu t_{crit} zwiększały się, jednak ze względu na mniejszą liczbę wystąpień sumaryczne deficyty zmalały o ok. 150 mln m³, w przypadku wydłużenia okresu o 12 dni. Wraz z wzrostem długości okresu przewyższenia dla kryterium IC, obserwowano również tendencję do zbliżania się parametrów niżówek do tych uzyskanych metodą SPA. Stosując kryteria IC, uzyskano zbliżone natężenia niżówek (M), tym mniejsze im dłuższy czas t_{crit} . W powyższych wynikach znajduje również potwierdzenie teza, że metodę separacji SPA należy stosować tylko w przypadku przyjmowania niskich poziomów granicznych Q_g , gdyż w przeciwnym razie może dojść do łączenia niżówek w bardzo długie ciągi, obejmujące okresy kilku lub nawet kilkunastu lat [FLEIG i in. 2006; VAN LANEN i in. 2008]. Ze względu na dużą rozbieżność wyników w metodach bazujących na czasach trwania przewyższenia przepływu i metody SPA, można stosować równoległe drugą metodę separacji, kontrolną, opartą na kryteriach czasowych, które obecnie są dobrze rozpoznane [PANU, SHARMA 2002]. Zapewni to jednoczesną porównywalność wyników oraz dobre odzwierciedlenie zależności lub zmienności przestrzennych. Z powyższej analizy wynika, że do tego celu odpowiednia jest metoda średniej ruchomej MA, która jest polecana zarówno przez FLEIG i in. [2006] dla zlewni dynamicznych oraz analiz rzek o różnych charakterach, jak i TALLAKSEN i in. [1997] spośród metod opartych na czasach trwania, albo kryterium czasowo-objętościowe z 6-dniowym czasem trwania przewyższenia IC6, zalecanym przez MADSEN i ROSBJERG [1995].

PODSUMOWANIE

Stosowanie krótkich okresów rozdziału niżówek na epizody niezależne, takich jak kryterium IC3 lub POT, prowadzi do zawyżenia liczby wystąpień krótkich oraz głębokich niżówek. Metody te mogą być przydatne w analizach związanych z zarządzaniem gospodarką wodną cieków oraz w analizach wrażliwości lub niezawodności systemów poboru wody z cieków.

Parametry niżówek, dla których do separacji stosowany jest algorytm bazujący na objętościach przepływu (SPA) odstają od parametrów niżówek rozdzielanych metodami opartymi na czasach trwania przewyższenia przepływu, a uzyskiwane w ten sposób zależności przestrzenne często są odwrotne.

Występowanie susz wieloletnich, w przypadku stosowania separacji metodą SPA, w porównaniu z kryteriami czasowymi, dla których susze takie nie są obserwowane, prowadzi do znaczącego zmniejszenia sum deficytów odpływu.

Stosowanie metody SPA jest uzasadnione w badaniach mających na celu identyfikację długofalowych czynników wywołujących susze w danym obszarze, obserwacji zależności przestrzennych lub określenia prawdopodobieństwa występowania susz o znaczącym czasie trwania.

Parametry niżówek uzyskanych metodami średniej ruchomej (MA) oraz 5- i 6-dniowym rozdziałem IC są do siebie zbliżone oraz najbardziej środkowe spośród wszystkich zastosowanych metod separacji.

Kryteria oparte na czasach trwania przewyższenia, takie jak MA lub IC6, dające krótsze, jednak częstsze oraz głębsze niżówki (o większym natężeniu), mogą być stosowane do analiz związanych z oceną krótkotrwałych zmian w reżimie przepływu, lub oceną sezonowości występowania niżówek.

Coraz szersze zastosowanie algorytmu SPA, opartego na bilansie zasobów wodnych cieków, pozwala na wskazanie tej metody jako kryterium uniwersalnego do analizy niżówek. Podczas obliczeń należy pamiętać o ograniczeniach tej metody, a przede wszystkim o konieczności stosowania małych wartości przepływów granicznych (np. Q_{90}). W celu weryfikacji związków czasowych i przestrzennych warto zastosować dodatkową metodę kontrolną opartą na kryterium czasowym (metodę MA lub IC6).

Praca zrealizowana w ramach zadania badawczego pt. „Niżówki wybranych rzek Lubelszczyzny” na Wydziale Nauk o Ziemi i Gospodarki Przestrzennej Uniwersytetu Marii Curie-Skłodowskiej w Lublinie.

LITERATURA

- BARAN-GURGUL K. 2014. Analiza niżówek w zlewni górskiej na przykładzie zlewni Małej Wisły. Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN. T. I. Z. XX. Pr. zbior. Red. K. Banasik, L. Hejduk, E. Kaznowska s. 187–199.
- FLEIG A., TALLAKSEN L., HISDAL H., DEMUTH S. 2006. A global evaluation of streamflow drought characteristics. *Hydrology and Earth System Sciences*. No 10 s. 535–552.
- HISDAL H., TALLAKSEN L., FRIGESSI A. 2002. Handling non-extreme events in extreme value modelling of streamflow drought. *FRIEND 2002: Regional Hydrology: Bridging the Gap Between Research and Practice*. No 274 s. 281–288.
- KAZNOWSKA E., BANASIK K. 2011. Streamflow droughts and probability of their occurrence in a small agricultural catchment. *Annals of Warsaw University of Life Sciences – SGGW, Land Reclamation*. No 43(1) s. 57–69.
- KJELSDEN T., LUNDORF A., ROSBJERG D. 2000. Use of a two-component exponential distribution in partial duration modelling of hydrological droughts in Zimbabwean rivers. *Hydrological Sciences Journal*. No 45(2) s. 285–298.
- MADSEN H., ROSBJERG D. 1995. On the modelling of extreme droughts. *IAHS Publications-Series of Proceedings and Reports – International Association of Hydrological Sciences*. No 231 s. 377–386.
- MADSEN H., ROSBJERG D. 1998. A regional Bayesian method for estimation of extreme streamflow droughts. *Statistical and Bayesian methods in hydrological sciences*. Paris. UNESCO s. 327–340.
- KO M.K., TARHULE A. 1994. Streamflow droughts of northern Nigerian rivers. *Hydrological Sciences Journal*. No 39. Iss. 1 s. 19–34.
- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J. 1997. *Hydrologia stosowana*. Wyd. II. Warszawa. Wydaw. Nauk. PWN. ISBN 83-01121-94-7 ss. 323.

- OZGA-ZIELIŃSKA M., BRZEZIŃSKI J., OZGA-ZIELIŃSKI B. 1999. Zasady obliczania największych przepływów rocznych o określonym prawdopodobieństwie przewyższenia przy projektowaniu obiektów budownictwa hydrotechnicznego: długie ciągi pomiarowe przepływów. Materiały Badawcze IMGW Hydrologia i Oceanologia. Warszawa. Wydaw. IMGW ss. 45.
- PANU U. S., SHARMA T. C. 2002. Challenges in drought research: some perspectives and future directions. *Hydrological Sciences Journal*. No 47(S1) s. S19–S30.
- SUNG J., CHUNG E. 2014. Development of streamflow drought severity-duration-frequency curves using the threshold level method. *Hydrology and Earth System Sciences*. No 18 s. 3341–3351.
- TALLAKSEN L., MADSEN H., CLAUSEN B. 1997. On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences Journal*. No 42(1) s. 15–33.
- TOKARCZYK T. 2010. Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej. Warszawa. IMGW. ISBN 978-83-61102-34-2 ss. 164.
- TOMASZEWSKI E. 2012. Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski. Wyd. 1. Łódź. Wydaw. Uniwersytetu Łódzkiego. ISBN 978-83-75257-71-7 ss. 265.
- VAN LANEN, H. A., KUNDZEWICZ, Z., TALLAKSEN, L. M., HISDAL, H., FENDEKOVÁ, M., PRUDHOMME, C. 2008. Indices for different types of droughts and floods at different scales [online]. *Water and Global Change, Technical Report No. 11*. [Dostęp 17.09.2015]. Dostępny w Internecie: <http://www.eu-watch.org/media/default.aspx/emma/org/10047744/WATCH+Technical+Report+Number+11+Indices+for+different+types+of+droughts+and+floods+at+different+scales.pdf>
- VOGEL R., STEDINGER J. 1987. Generalized storage-reliability-yield relationships. *Journal of Hydrology*. No 89 s. 303–327.
- WĘGLARCZYK S. 2014. Krzywe czasu przewyższenia przepływu w zlewni Małej Wisły. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich*. Nr II/1 s. 145–157.
- YAHIAOUI A., TOUAIBIA B., BOUVIER C. 2009. Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Revue Nature et Technologie*. No 1 s. 3–15.
- YANG T., ZHOU X., YU Z., KRYSANOVA V., WANG B. 2015. Drought projection based on a hybrid drought index using Artificial Neural Networks. *Hydrological Processes*. No 29(11) s. 2635–2648.
- YEVJEVICH V. 1967. An objective approach to definitions and investigations of Continental hydrologic droughts. *Hydrology Papers 23*. Fort Collins: Colorado State University.
- ZELENHASIC E., SALVAI A. 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*. No 23(1) s. 156–168.
- ZIELIŃSKA M. [OZGA-ZIELIŃSKA M.] 1963a. Niżówki letnie rzek polskich. *Gospodarka Wodna*. Nr 4(196) s. 133–136.
- ZIELIŃSKA M. [OZGA-ZIELIŃSKA M.] 1963b. Statystyczne metody opracowania niżówek. *Przegląd Geofizyczny*. Z. 1–2 s. 75–87.

Krzysztof RACZYŃSKI

METHODS OF SEPARATING LOW FLOWS INTO INDEPENDENT EPISODES APPLIED TO RIVERS OF EASTERN POLAND

Key words: *flow deficits, hydrological drought, low flows, Lublin region, separation of low flows*

S u m m a r y

This study presents variability of low flow parameters depending on the method of separation into independent episodes. The analysis was based on daily flow data for the period from 01.11.1976 to 31.10.2013 for 17 profiles located in eastern Poland. Threshold level method was applied to deter-

mine low flow episodes. Flow with 90% probability of exceedance (Q_{90}) taken from flow duration curve made for each river was adopted as the threshold level in this study. Low flow episodes were specified by using sequent peak algorithm (SPA), peak over threshold (POT) and 10-day moving average (MA) method as well as inter-event time and volume based criterion (IC) with t_c criterion length equal to 3-, 5-, 6-, 10- and 15-days. Parameters of episodes separated by SPA algorithm deviated from those obtained with other methods. The use of SPA algorithm resulted in multiyear droughts observations which led to the occurrence of lower number of episodes with significantly extended time of duration. Application of SPA method to long periods led to the reduction of total value of flow deficits. MA and IC6 methods gave the best adjustment for applied time-based criteria. Elongation of the time criterion for IC method resulted in the approximation of low flow parameters to those obtained with SPA algorithm. The greatest intensity of low flows was noted with POT and IC3 methods. Episodes determined by these methods were shorter and their deficits were greater than the episodes from any other used criterion. Differences of parameters between episodes observed in catchments of different character were lowest with POT and IC3 methods.

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