

Wpłynęło 26.03.2018 r.
Zrecenzowano 5.06.2018 r.
Zaakceptowano 10.06.2018 r.
A – koncepcja
B – zestawienie danych
C – analizy statystyczne
D – interpretacja wyników
E – przygotowanie maszynopisu
F – przegląd literatury

WIELOLETNIA I SEZONOWA DYNAMIKA NIŻÓWEK W WARCIE W SIERADZU

Malwina KOZEK^{ABCDEF}, **Edmund TOMASZEWSKI**^{ABCDEF}

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Pracownia Hydrologii i Gospodarki Wodnej

Streszczenie

Badaniami dynamiki niżówek w Warcie w Sieradzu objęto okres 1971–2000. Analizy dokonano na podstawie serii przepływów dobowych, udostępnionych przez IMGW-PIB. Niżówki zidentyfikowano na podstawie stałego przepływu granicznego, przyjmując za poziom odcięcia rzędną $Q_{70\%}$ z krzywej czasów trwania przepływów wraz z wyższymi. Analizie poddano wieloletnią i sezonową dynamikę objętości niedoboru odpływu, czasu trwania niżówki oraz estymatora częstości pojawiania się badanych zjawisk ekstremalnych w postaci odstępu międzyniżówkowego.

W oparciu o uzyskane wyniki dokonano oceny struktury kształtowania się niżówek w zakresie ich zmienności i cech rozkładu statystycznego. Zbadano tendencje wieloletnie, w których zaobserwowano liniowe trendy zmian badanych charakterystyk. Za pomocą współczynnika korelacji dokonano oceny stabilności niżówek w kolejnych miesiącach roku hydrologicznego. Ponadto zbadano jednorodność genetyczną niżówek w Warcie za pomocą krzywej podwójnie kumulowanej oraz oszacowano długość maksymalnej niżówki o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 95% i 99%.

Słowa kluczowe: niedobory odpływu niżówkowego, reżim przepływów niżówkowych, susza hydrologiczna

WSTĘP

Tereny nizinne w Polsce narażone są na występowanie suszy hydrologicznej o znacznym stopniu surowości. Podkreślono to m.in. w strategii przestrzennego zagospodarowania kraju, gdzie pas nizin postrzegany jest jako szczególnie podatny na negatywne skutki zmian klimatycznych, a tym samym wymagający wdrażania zaawansowanych strategii łagodzących skutki suszy [STARKEL, KUNDZEWICZ

2008]. Niekorzystna struktura bilansu wodnego i obserwowane zmiany hydroklimatyczne skutkują poważnym zagrożeniem suszą rolniczą [BARTCZAK i in. 2014; KAZNOWSKA i in 2015]. Odnotowuje się bowiem systematyczny wzrost długości i częstotliwości pojawiania się okresów suchych w sezonie wegetacyjnym, które w połączeniu z niekorzystnymi warunkami ewapotranspiracyjnymi mogą prowadzić do suszy o charakterze klęski narodowej [ŁABĘDZKI 2004; ŁABĘDZKI, BĄK 2004].

W wielu opracowaniach dotyczących poprawy stosunków wodnych w zlewniach nizinnych użytkowanych rolniczo wskazuje się na konieczność podejmowania zabiegów melioracyjnych (z silnie zaakcentowaną dwukierunkowością działania) oraz powiększania małej retencji. Warto jednak zauważyć, że relatywnie ubogie zasoby wodne nie stanowią na tych terenach jedyne poważnego problemu. Równie istotne zagrożenie niesie specyficzny rozwój zjawiska suszy, na skalę nie spotykaną w innych częściach kraju, istotnie potęgowany zabiegami agrotechnicznymi. Już bowiem w fazie suszy atmosferycznej zachodzi konieczność uzupełniania niedoboru opadów w celu zapewnienia optymalnego wzrostu roślin. Uruchamiane zostają wtedy lokalne zasoby wód podziemnych i powierzchniowych, co inicjuje początek suszy hydrologicznej na długo przed jej naturalnym czasem pojawienia się [TOMASZEWSKI 2012].

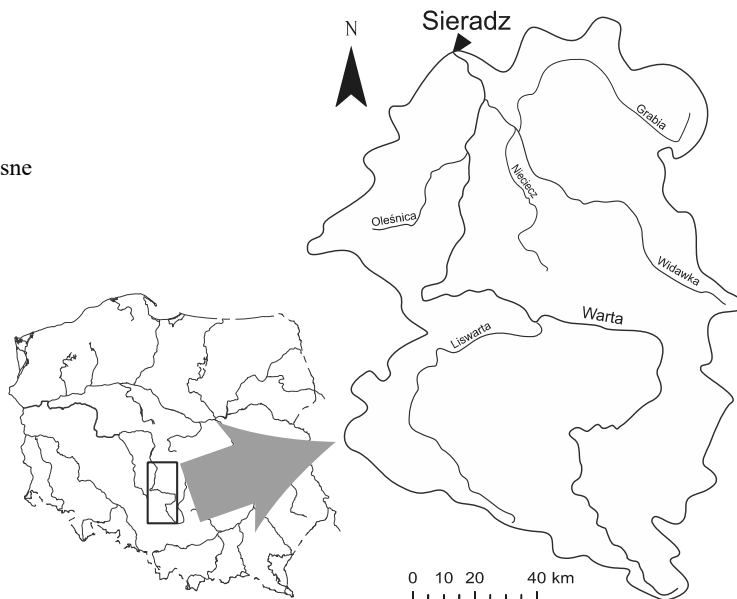
Niżówka rzeczna, będąca ostatnim ogniwem łańcucha reakcji na niedobory zasilania, postrzegana jest jako dobry wskaźnik rozwoju suszy hydrologicznej [STRZEBOŃSKA-RATOMSKA 1994; TOKARCZYK 2010]. Ogólnie definiuje się ją jako okres niskich przepływów (stanów wody) w rzece lub przepływów utrzymujących się w suchych warunkach pogodowych [DĘBSKI 1970; SMAKHTIN 2001]. Można zatem przyjąć, że charakterystyki tempa rozwoju i zaniku niżówki rzecznej są bezpośrednio uwarunkowane cechami rozwijającej się suszy hydrologicznej, która z kolei zdeterminowana jest właściwościami poprzedzającej ją suszy atmosferycznej i glebowej.

MATERIAŁ BADAWCZY I METODA OPRAWOWANIA

Opracowaniem objęto zlewnię Warty po wodowskaz w Sieradzu (rys. 1). Górny bieg rzeki odwadnia tereny wyżynne, zbudowane z dobrze uszczelinionych i zasobnych w wodę skał krasowiejących. Północna część zlewni ma charakter nizinny, a w zasilaniu podziemnym rzek dominują wody osadów czwartorzędowych. Wschodnia część zlewni objęta jest częściowo lejem depresyjnym, związanym z wydobyciem węgla brunatnego w KWB „Bełchatów”, oraz zrzutami wód kopalnianych do systemu Widawki. Reżim badanego odcinka Warty został określony przez DYNOWSKĄ [1971] jako niwalny średnio wykształcony. Jednak zmiany w cyklu hydrologicznym, obserwowane od początku lat 80. XX w., wskazują na systematyczne zmiany struktury odpływu, związane ze zmniejszaniem się wiosennego zasilania roztopowego oraz skróceniem czasu retencji śnieżnej na rzecz inten-

Rys. 1. Obszar badań;
źródło: opracowanie własne

Fig. 1. Study area;
source: own elaboration



sywnego zasilania deszczowego podczas bezśnieżnych i ciepłych zim [BARTNIK, TOMASZEWSKI 2006; JOKIEL 2004; TOMASZEWSKI 2007]. Charakterystyczne wartości odpływu, obliczone dla badanej zlewni, są typowe dla środkowej Polski i mają nieco większe wartości od przeciętnych w całym kraju – tabela 1.

Podstawowy materiał hydrometryczny, wykorzystywany w opracowaniu, stanowiły serie średnich dobowych przepływów, pochodzących z przekroju kontrolnego na posterunku wodowskazowym w Sieradzu, udostępnione przez IMGW-PIB. Przyjęty okres badawczy, obejmujący lata 1971–2000, charakteryzował się dużą dynamiką warunków hydrometeorologicznych. Występowały w nim bowiem długotrwałe i głębokie niszówki na początku lat 90. XX w., jak również znaczące okresy wezbraniowe, które pojawiły się na początku i pod koniec badanego wielolecia.

Tabela 1. Wybrane charakterystyki odpływu ze zlewni Warty po Sieradz (1971–2000)

Table 1. Selected characteristics of flow in Warta River catchment, water-gauge Sieradz (1971–2000)

A km ²	WWq	SSq	SNq	NNq	q_{PD}^*	WZ_{PD}^* %
	dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²					
8185	46,18	5,88	2,89	1,83	3,3	55

Objaśnienia: A = powierzchnia zlewni; WWq = wielki wysoki odpływ; SSq = średni średni odpływ; SNq = średni niski odpływ; NNq = najniższy niski odpływ; q_{PD} = odpływ pochodzenia podziemnego; WZ_{PD} = współczynnik zasilania podziemnego.

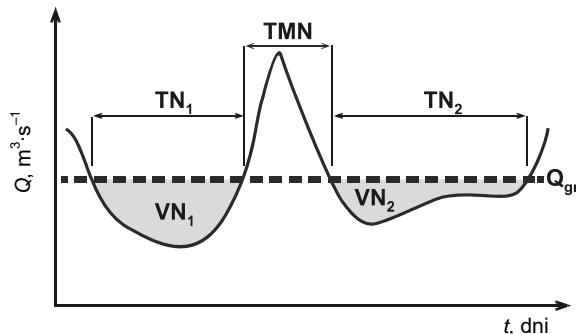
Explanations: A = catchment area; WWq = the highest of the maximum flows; SSq = mean of the average flows; SNq = average of the minimal flows; NNq = the lowest of the minimal flows; q_{PD} = groundwater flow; WZ_{PD} = base flow index.

Źródło: opracowanie własne oraz JOKIEL [2004] – oznaczone gwiazdką.

Source: own elaboration and JOKIEL [2004] – marked with asterisk.

Identyfikację niżówek przeprowadzono na podstawie kryterium statystycznego, przyjmując za niżówkę okres, w którym przepływy układały się poniżej wartości granicznej, wyznaczonej w oparciu o przepływ charakterystyczny [OZGA-ZIELIŃSKA 1990]. Graniczną wartość odcięcia stanowił przepływ odpowiadający 70. percentylowi z krzywej czasów trwania przepływów wraz z wyższymi, wyznaczony na bazie wartości dobowych dla całego wielolecia [HISDAL i in. 2004]. Podejście bazujące na wyznaczaniu przepływów granicznych na podstawie krzywej czasów trwania przepływu znajduje coraz większą popularność w wielu krajach. W porównaniu z przepływami głównymi II stopnia przepływy okresowe zapewniają większą elastyczność w doborze kryterium niżówki i umożliwiają wykorzystywanie pełnej informacji hydrologicznej płynącej z kształtu krzywej czasu trwania przepływu. Ponadto charakterystyki te wykazują dużą stabilność, gdy wydłuża się serię obserwacyjną, tzn. współczynnik zmienności obliczony dla percentyli rozkładu w warunkach różnej długości ciągu pomiarowego, pochodzącego z jednego przekroju pomiarowego, będzie mniejszy niż w przypadku przepływów głównych II stopnia. Wyniki badań symulacyjnych, aplikacyjnych i regionalnych wskazują, że najlepsze rezultaty uzyskuje się, stosując percentyle rozkładu przepływu z przedziału 70–95%. Można dostosowywać je do określonych potrzeb gospodarki wodnej lub waloryzować stopień natężenia suszy hydrologicznej [FLEIG i in. 2011; HANNAFORD i in. 2011; TABRIZI i in. 2010; TALLAKSEN i in. 1997; TOMASZEWSKI 2011; 2012; 2016; ZELENHASIC, SALVAI 1987].

W zakresie kryterium czasowego przyjęto, że niżówka to okres z przepływem niższym od progowego, trwający co najmniej 7 dni. Jeśli sąsiadujące niżówki rozdzielał okres z przepływem większym od wartości progowej, lecz nie dłuższym niż 3 dni, to niżówki te traktowano jako zdarzenia zależne (ta sama niżówka), sumując objętości niedoboru odpływu i czasy ich trwania. W efekcie wyznaczono dwa podstawowe parametry niżówek – objętość niedoboru odpływu i czas trwania (rys. 2).

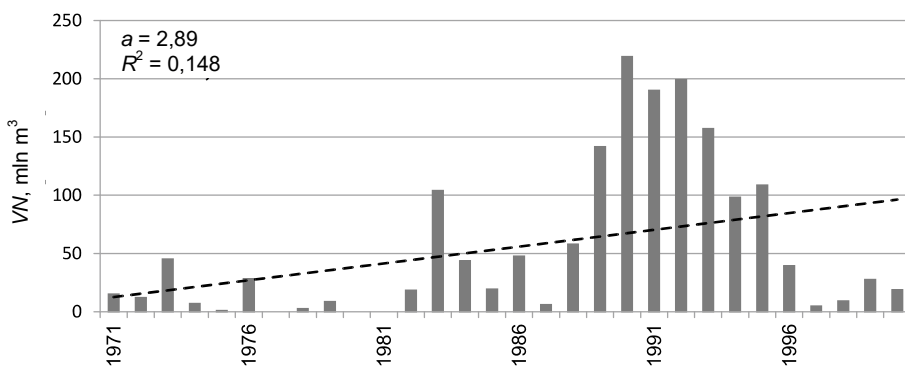


Rys. 2. Podstawowe parametry niżówki rzecznej; VN = objętość niedoboru odpływu; TN = czas trwania niżówki; TMN = odstęp międzynieźówkowy; Q_{gr} = przepływ graniczny; źródło: TOMASZEWSKI [2012], zmienione

Fig. 2. Basic parameters of low-flow; VN = streamflow deficit volume; TN = low-flow duration; TMN = inter-low-flow spacing; Q_{gr} = threshold level; source: TOMASZEWSKI [2012], modified

NIEDOBORY ODPLYWU NIZÓWKOWEGO

W wieloletnim przebiegu rocznych niedoborów odpływu niszówkowego można zaobserwować wyraźne grupowanie lat suchych i wilgotnych (rys. 3). Szczególnie głębokie i długotrwałe niszówki objęły pierwszą połowę lat 90., zaś przełom lat 70. i 80. XX w. można uznać za pozbawiony istotnych niedoborów odpływu niszówkowego. Największe niedobory zaobserwowano w 1990 roku, kiedy przekroczyły granicę $200 \text{ mln m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$. Większymi wartościami tej charakterystyki odznaczał się także rok 1983 ($>100 \text{ mln m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{rok}^{-1}$), który zapoczątkował ponad 10-letni okres posuszny. Grupowanie się lat z dużymi niedoborami odpływu niszówkowego świadczy o dużej inercji tego zjawiska, do której – poza warunkami hydrometeorologicznymi – istotnie przyczyniają się cechy hydrogeologiczne strefy aktywnej wymiany zlewni, wyrażone przede wszystkim tempem szczyrpywania i odnawiania zasobów wód podziemnych.



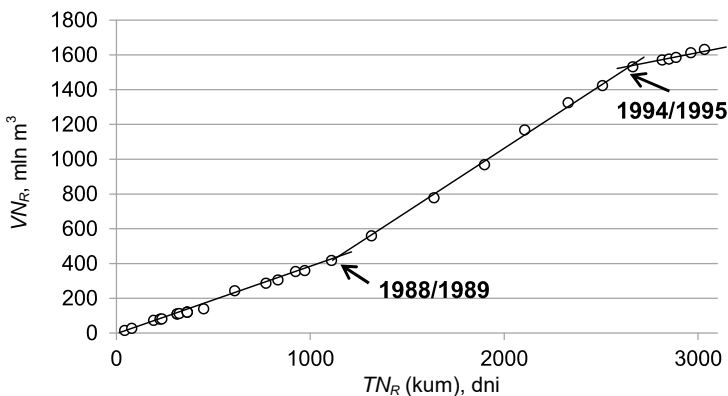
Rys. 3. Wieloletni przebieg rocznych objętości niedoboru odpływu niszówkowego Warty w Sieradzu (1971–2000); VN = objętość rocznego niedoboru odpływu niszówkowego; linią przerywaną wykreślono zidentyfikowaną funkcję trendu liniowego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$, gdzie: a = współczynnik kierunkowy, R^2 = współczynnik determinacji; źródło: opracowanie własne

Fig. 3. Multiannual course of annual drought streamflow deficit volume of Warta River in Sieradz (1971–2000); VN = drought streamflow deficit volume, dashed line draws the identified function of the linear trend at the level of significance $\alpha = 0.01$, where: a = slope coefficient, R^2 = determination coefficient; source: own elaboration

Analiza składowej systematycznej w wieloletnim przebiegu rocznych niedoborów odpływu niszówkowego doprowadziła do identyfikacji trendu liniowego istotnego statystycznie na poziomie $\alpha = 0,01$. Parametry wyznaczonego równania wskazują, iż 15% obserwowanej zmienności wieloletniej można przypisać istnieniu składowej systematycznej. Warto jednak zwrócić uwagę, że – mimo obserwowanej tendencji liniowej – w końcowej części badanego okresu obserwuje się systematyczny spadek niedoborów odpływu (rys. 3). Badania prowadzone przez TOMASZEWSKIEGO [2012] dowiodły, że w przypadku większości rzek środkowej Pol-

ski w okresie 1951–2000 przebieg systematycznej składowej niedoborów odpływu niżówkowego najlepiej estymowany jest wielomianem 3. stopnia, a nie funkcją liniową. W cytowanym opracowaniu wykazano, że w większości przypadków okresy występowania surowej suszy hydrologicznej towarzyszyły pierwszej połowie lat 50. i początkowi lat 90. XX wieku. Zatem obserwowany wieloletni przebieg niedoborów odpływu niżówkowego Warty w Sieradzu wydaje się być fragmentem opisanego przebiegu fluktuacyjnego, a nie tendencji liniowej wskazującej na systematyczny wzrost badanych niedoborów.

W ocenie zmienności wieloletniej dość ważna jest ocena jednorodności genetycznej czynników determinujących proces powstawania niedoborów odpływu niżówkowego oraz określenie, w jakich okresach dochodziło do zmiany relacji między nimi. Do analizy tego zagadnienia można posłużyć się krzywą podwójnie kumulowaną (tzw. krzywą podwójnej masy) [SEARCY, HARDISON 1960]. Obrazuje ona zależność między skumulowanym szeregiem rocznej liczby dni z niedoborem odpływu oraz skumulowanym szeregiem rocznej objętości niedoboru odpływu niżówkowego w badanym wieloleciu (rys. 4). Załamania pojawiające się na krzywej wskazują na zmiany w relacjach między czynnikami determinującymi przepływy niżówkowe [TOMASZEWSKI 2012]. Istotność zerwań zweryfikowano testem *t*-Studenta dla prób niezależnych, testem Browna i Forsytha oraz testem U Manna–Whitneya [DOMAŃSKI 1990], przyjmując za poziom istotności $\alpha = 0,05$. W badanym 30-leciu zaobserwowano dwukrotne zerwanie relacji między roczną objęto-



Rys. 4. Krzywa podwójnie kumulowana rocznych niedoborów odpływu niżówkowego i rocznych czasów trwania przepływów niżówkowych w Warcie w Sieradzu w okresie 1971–2000;

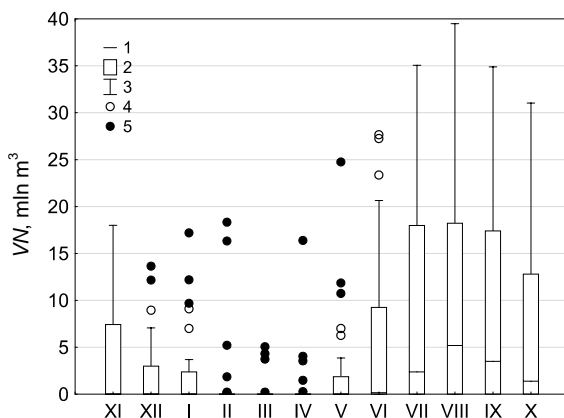
VN_R (kum) = kumulowana objętość rocznych niedoborów odpływu niżówkowego;

TN_R (kum) = kumulowana roczna liczba dni z niżówką; strzałka oznacza moment istotnego zerwania jednorodności genetycznej; źródło: opracowanie własne

Fig. 4. Double-mass curve of cumulated annual drought streamflow deficit volume and cumulated annual low-flow duration of Warta river in Sieradz in the period 1971–2000; VN_R (kum) = cumulated annual drought streamflow deficit volume; TN_R (kum) = cumulated annual number of days with low-flow; the arrow indicates significant break time of genetic homogeneity; source: own elaboration

ścią niedoboru odpływu niszówkowego a liczbą dni z przepływem niszówkowym w Warcie w Sieradzu. Pierwsze z nich miało miejsce między 1988 a 1989 rokiem i wskazuje na względny wzrost VN_R w stosunku do TN_R po terminie zerwania. Świadczy to o istotnym wpływie warunków hydroklimatycznych lat 90. XX w. na zmiany reżimu przepływów niszówkowych, skutkujących niszówkami o znacznej głębokości, będącymi efektem rozwoju surowych susz hydrologicznych w tym czasie. Drugie zerwanie wystąpiło między latami 1994 a 1995. Odnotowano względne (powrotne) zmniejszenie VN_R w stosunku do TN_R po terminie zerwania. Relacje między zmiennymi w okresie przed 1989 r. i po 1995 r. wykazują statystyczną jednorodność, co oznacza, że początek lat 90. można uznać za okres pojawiania się ekstremalnych susz hydrologicznych w skali wielolecia.

W sezonowym rozkładzie niedoborów odpływu niszówkowego największą rolę odgrywają determinanty występujące w miesiącach letnich i jesiennych (rys. 5). Niewielkie niedobory mogą wystąpić już w maju i zwiększają się do sierpnia, kiedy osiągają największą przeciętną wartość (5 mln m³). W warunkach silnie rozwiniętej suszy hydrologicznej niedobory w sierpniu mogą sięgać prawie 40 mln m³. Od września następuje systematyczne zmniejszenie niedoborów odpływu niszówkowego, aż do ich prawie całkowitego zaniku w lutym. Zimą niszówki pojawiają się sporadycznie, ze względu na coraz łagodniejsze zimy, skutkujące nieznaczną re-

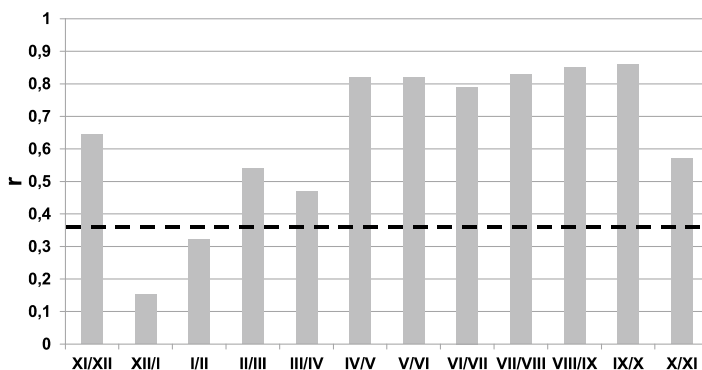


Rys. 5. Rozkład niedoborów odpływu niszówkowego Warty w Sieradzu w poszczególnych miesiącach roku hydrologicznego w okresie 1971–2000; VN = objętość niedoboru odpływu niszówkowego; 1 = mediana; 2 = zakres zmienności ograniczony pierwszym i trzecim kwartylem; 3 = zakres wartości nieodstających w obrębie 1 odchylenia międzykwartylowego; 4 = wartości odstające od 1,5 odchylenia międzykwartylowego; 5 = wartości ekstremalne powyżej 1,5 odchylenia międzykwartylowego; źródło: opracowanie własne

Fig. 5. Distribution of drought streamflow deficit volume of Warta River in Sieradz in particular months of a hydrological year in the period 1971–2000; VN = drought streamflow deficit volume; 1 = median; 2 = range between first and third quartile; 3 = range limited by 1 quartile deviation; 4 = outliers under 1.5 quartile deviation; 5 = extremes over 1.5 quartile deviation; source: own elaboration

tencją w pokrywie śnieżnej oraz brakiem przemarzania koryt rzecznych. Odstające elementy rozkładu w grudniu, styczniu i lutym świadczą o rzadkim pojawianiu się głębokich niżówek zimowych w badanym okresie lub o przedłużających się niżówkach letnio-jesiennych. Od lutego do kwietnia niedobory odpływu pojawiają się bardzo rzadko. W lutym niżówka wystąpiła tylko 7 razy w ciągu badanego 30-letnia, w marcu – 4 razy, a w kwietniu – 5 razy. Od czerwca do października niedobory odpływu niżówkowego pojawiają się dość często w całym przedziale zmienności, natomiast w pozostałych miesiącach ich rozkłady statystyczne są bardziej leptokurtyczne (występuje wiele elementów odstających), co dowodzi większej niestabilności warunków formowania się niedoborów odpływu. Ponadto, w wielu przypadkach wartość przeciętna (wyrażona medianą) jest równa zeru, co wskazuje na niezbyt częste (rzadziej niż raz na 2 lata) pojawianie się epizodów niżówkowych w miesiącach późnojesiennych, zimowych i wiosennych.

Sezonowe podobieństwo formowania się niedoborów odpływu niżówkowego zbadano na podstawie współczynników korelacji w szeregach miesięcznych wartości V/N w parach sąsiadujących miesięcy (rys. 6). W oparciu o statystykę t -Studenta oszacowano, że współczynniki korelacji istotne statystycznie na poziomie $\alpha = 0,05$, w warunkach danej liczebności próbek ($N = 29$) muszą być równe lub większe od wartości 0,35. Okres od kwietnia do października charakteryzuje się wysokimi współczynnikami korelacji niedoborów odpływu między sąsiadującymi miesiącami (0,79–0,86). Świadczy to o stabilnych i względnie jednorodnych warunkach determinujących powstawanie niżówek, związanych z rozkładem opadów, warunkami ewapotranspiracyjnymi oraz kolejnym fazami rozwoju wegetacyjnego. W parach



Rys. 6. Współczynnik korelacji (r) w szeregach miesięcznych niedoborów odpływu niżówkowego w parach sąsiadujących miesięcy w okresie 1971–2000; r = współczynnik korelacji; linią przerywaną zaznaczono granicę istotności statystycznej współczynnika korelacji na poziomie $\alpha = 0,05$; źródło: opracowanie własne

Fig. 6. Correlation coefficient (r) in series of monthly drought streamflow deficit volumes in pairs of subsequent months in the period 1971–2000; r = correlation coefficient; dashed line marks the limit of statistical significance of correlation coefficient at the level $\alpha = 0.05$; source: own elaboration

miesiący zimowych (XII/I i I/II) współczynniki korelacji okazały się nieistotne statystycznie. Obserwowany brak podobieństwa wskazuje na dużą niestabilność reżimu przepływów niżówkowych, związanych z dużą zmiennością warunków zimowych (zimy surowe i łagodne) i coraz częstszym pojawianiem się odwilży śród-zimowych. Okresy X–XII oraz II–IV stanowią swoistą porę przejściową między stabilną i niestabilną fazą reżimu przepływów niżówkowych, w której dochodzi do zanikania lub wzmacniania czynników stabilizujących powstawanie niedoborów odpływu niżówkowego. Warto zwrócić uwagę, że wszystkie zidentyfikowane współczynniki korelacji mają znak dodatni, co wskazuje na jednokierunkowość obserwowanych zależności; wzrostom niedoborów odpływu niżówkowego w kolejnych miesiącach zawsze odpowiadają wzrosty, zaś spadkom – spadki.

W badaniu sezonowej zmienności niedoborów odpływu niżówkowego sprawdzono istnienie trendów na poziomie istotności $\alpha = 0,05$ i $\alpha = 0,01$ w szeregach miesięcy jednoimiennych (tab. 2). Statystycznie istotne trendy wystąpiły w miesiącach letnich, jesiennych i zimowych. We wszystkich miesiącach letnich i jesiennych zidentyfikowano trendy dodatnie, trend ujemny zaobserwowano tylko w styczniu. Wieloletni, systematyczny spadek niedoborów w okresie zimowym może się wiązać z systematycznym wzrostem średniej temperatury w tej porze roku w badanym 30-leciu [LORENC (red.) 2005]. Jednak dopasowanie linii trendu na poziomie 7% wskazuje, że udział składowej systematycznej w obserwowanej zmienności jest bardzo niewielki i powinien być traktowany jako mało istotny. Zwraca uwagę zwarta grupa miesięcy od VI do XI, w odniesieniu do której odnotowano trendy istotne statystycznie na poziomie $\alpha = 0,01$, z dopasowaniem z przedziału 9–19%. Wskazuje to na wyraźną dominację czynników półroczja ciepłego, determinujących wieloletnią zmienność niedoborów odpływu niżówkowego. Należy jednak pamiętać o specyficznym rozkładzie niedoborów, które pojawiły się w latach 90. XX w. i wskazują na oscylacyjny charakter zmienności wieloletniej (por. rys. 3).

Tabela 2. Parametry istotnych statystycznie trendów liniowych w szeregach miesięcznych niedoborów odpływu niżówkowego Warty w Sieradzu w okresie 1971–2000

Table 2. Parameters of statistically significant linear trends in series of monthly drought streamflow deficit volume of Warta River in Sieradz in the period 1971–2000

α	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
0,05	0,3	0,12	-0,04 0,07				0,16 0,07	0,43	0,4	0,59	0,41	0,38
0,01	0,16	0,07						0,19	0,09	0,16	0,11	0,12



1



2

Objaśnienia: α = poziom istotności; 1 = brak istotnego statystycznie trendu; 2 = trend istotny statystycznie; a = współczynnik kierunkowy, R^2 = współczynnik determinacji.

Explanations: α = statistical significance level; 1 = lack of statistically significant trend; 2 = statistically significant trend; a = slope coefficient, R^2 = determination coefficient.

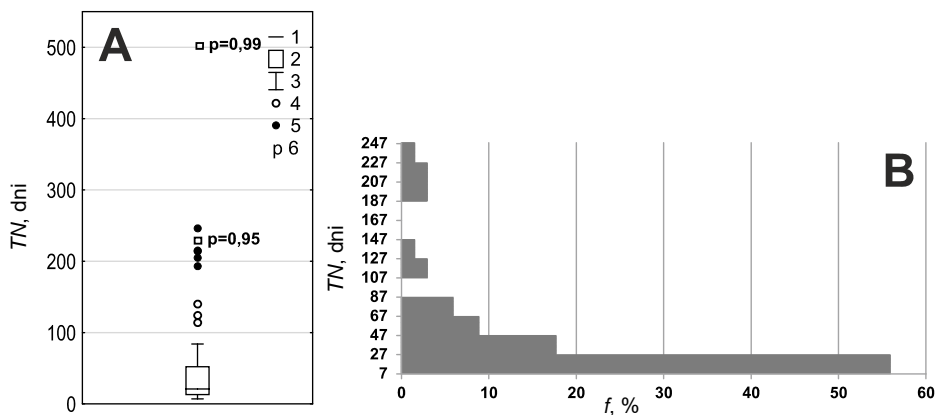
Źródło: opracowanie własne. Source: own elaboration.

CZAS TRWANIA NIŻÓWEK

Przeciętny czas trwania niżówki w Warcie w Sieradzu wyniósł 21 dni (rys. 7A). Rozkład omawianej charakterystyki jest asymetryczny i dodatni, co zdeterminowane jest długimi suszami hydrologicznymi z lat 90. ubiegłego wieku. Przedział międzykwartylowy jest stosunkowo wąski, gdyż połowa niżówek skupiona wokół mediany mieściła się w przedziale od 13 do 51 dni. W badanym rozkładzie można zauważyć kilka elementów odstających i ekstremalnych. Te pierwsze sięgają 140 dni, natomiast maksymalna, zaobserwowana niżówka trwała 246 dni. Najkrótsze niżówki trwały 7 dni, co wiąże się z przyjętym kryterium identyfikacji tego zjawiska.

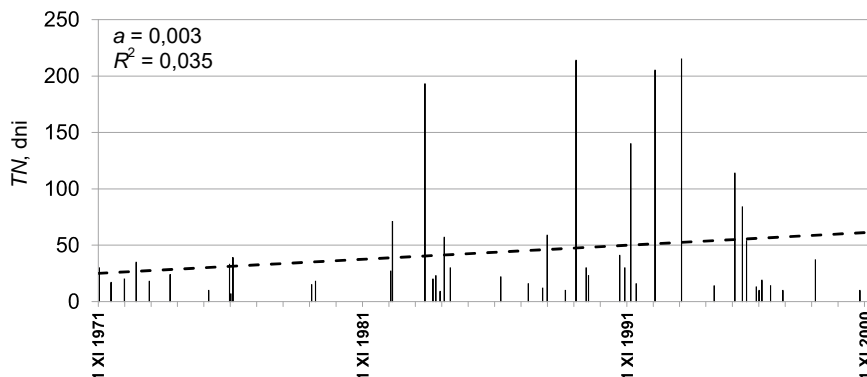
W strukturze czasów trwania niżówek dominowały epizody krótkie, trwające od 7 do 26 dni (rys. 7B). Znaczną grupę stanowiły również niżówki trwające ok. 1 miesiąca (18%). W dłuższych przedziałach czasowych badane zdarzenia występowały bardzo rzadko. W badanej grupie zabrakło niżówek z przedziału 3,0–3,5 miesiąca oraz 5–6 miesięcy. Zaprezentowany rozkład częstotliwości wskazuje, że epizody trwające powyżej 100 dni na Warcie w Sieradzu można traktować jako zdarzenia ekstremalne.

W wieloletnim przebiegu czasu trwania niżówek w Warcie w Sieradzu udokumentowano istnienie statystycznie istotnego dodatniego trendu liniowego na poziomie $\alpha = 0,01$ (rys. 8). Wykres przygotowano w taki sposób, aby czasowi trwania niżówki odpowiadała rzeczywista data wystąpienia przepływu minimalnego niżówki na osi odciętych. Wyznaczony współczynnik kierunkowy prostej (0,0034), po przeliczeniu na wartość bezwzględną, wskazuje na średni roczny przyrost dłu-



Rys. 7. Czasy trwania niżówek w Warcie w Sieradzu w okresie 1971–2000: A: rozkład czasów trwania, B: częstotliwość występowania; TN = czas trwania niżówki; f = częstotliwość; 1–5 = oznaczenia, jak na rys. 5; 6 = prawdopodobieństwo nieprzekroczenia maksymalnego czasu trwania niżówki; źródło: opracowanie własne

Fig. 7. Low-flows duration in Warta River in Sieradz in the period 1971–2000: A: distribution of duration, B: frequency of occurrence; TN = low-flow duration; f = frequency; 1–5 = see Fig. 5; 6 = probability of non-exceedance of maximum low-flow duration; source: own elaboration



Rys. 8. Wieloletni przebieg czasów trwania niszówek w Warcie w Sieradzu w okresie 1971–2000; TN = czas trwania niszówki; linią przerywaną wykreślono zidentyfikowaną funkcję trendu liniowego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$, gdzie: a = współczynnik kierunkowy, R^2 = współczynnik determinacji; źródło: opracowanie własne

Fig. 8. Multiannual course of low-flow duration of Warta River in Sieradz in the period 1971–2000; TN = low-flow duration; dashed line draws the identified function of the linear trend at the level of significance $\alpha = 0.01$, where: a = slope coefficient, R^2 = determination coefficient; source: own elaboration

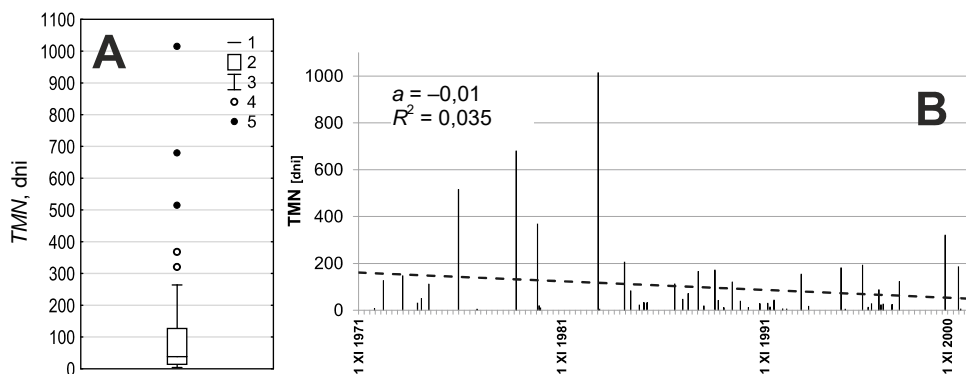
gości niszówek o 1 dzień i 6 godzin. Słabe dopasowanie linii trendu ($R^2 = 4\%$) świadczy o niewielkim znaczeniu tej składowej systematycznej w wieloletniej zmienności czasu trwania niszówki. Generalnie obserwuje się wzrost długości niszówek do lat 90. XX w., maksimum osiągnęły one w 1990 r. (246 dni). Bardzo długie niszówki w końcu lat 80. i pierwszej połowie lat 90. pojawiały się niemal w każdym roku i trwały ponad 200 dni. Między niszówkami bardzo długimi występowały też epizody krótsze. Lata 70., 80. i druga połowa 90. należą do okresów, w których przeważały niszówki krótkie, trwające 7–70 dni.

Ocenie poddano także maksymalny, prawdopodobny czas trwania niszówki. Poziom prawdopodobieństwa 95% uznany został przez TOKARCZYK [2010] za estymator wiarygodnej, ekstremalnej suszy hydrologicznej. Do obliczeń wykorzystano program komputerowy „Niszówka 2003” [JAKUBOWSKI, RADZUK 2004]. Zmienna dyskretna (zdarzenia wystąpienia niszówki) opisana została funkcją Poissona, natomiast zmienna ciągła (czas trwania niszówek) – rozkładem logarytmiczno-normalnym. Do testowania zgodności rozkładu rzeczywistego z teoretycznym wykorzystano test χ^2 oraz kryterium Akaike. Maksymalny czas trwania niszówki w Warcie w Sieradzu o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 95% wyniósł 234,7 dni i został on w badanym wieloleciu jednokrotnie przekroczony w 1990 r. (rys. 7A). Po zastosowaniu surowszego kryterium, czyli wystąpienia niszówki o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 99%, otrzymano wartość znacznie odstającą od zdarzeń empirycznych – 503,6 dni.

Niezwykle ważnym zagadnieniem, zarówno w kontekście gospodarki wodnej, jak i funkcjonowania ekosystemów, jest częstotliwość występowania niszówek

rzecznych oraz ich zmienność w skali wielolecia. Badanie tej cechy reżimu przepływów niżówkowych przeprowadzono na podstawie odstępu międzyniżówkowego, który obrazuje czas upływający między kolejnymi okresami niżówkowymi i wyrażany jest w dobach [TOMASZEWSKI 2012]. Przeciętna wartość tej charakterystyki wyniosła 38 dni. Rozkład analizowanej charakterystyki jest asymetrycznie dodatni (rys. 9A), co jest zdeterminowane długimi okresami pozbawionymi niżówek na początku analizowanego 30-lecia. Rozstęp międzykwartylowy *TMN* przekracza 100 dni, a połowa wartości skupiona wokół mediany zawiera się w przedziale 14–126 dni. W badanej grupie odstępów międzyniżówkowych występuje kilka elementów odstających i ekstremalnych. Wartości odstające zawierają się w przedziale 300–400 dni, lecz w badanym wieloleciu zdarzało się, że niżówki nie pojawiały się prawie przez 3 lata. Daje to podstawy do wniosku, że odstęp między niżówkami dłuższy niż 1 rok jest w Warcie w Sieradzu zjawiskiem bardzo rzadkim.

W wieloletnim przebiegu odstępu międzyniżówkowego w Warcie w Sieradzu udokumentowano istnienie statystycznie istotnego trendu liniowego na poziomie $\alpha = 0,01$ (rys. 9B). Wykres obrazujący to zjawisko przygotowano w analogiczny sposób do wykresu prezentującego wieloletni przebieg długości niżówek (por. rys. 8). Wyznaczony współczynnik kierunkowy prostej ($-0,01$), po przeliczeniu na wartość bezwzględną, wskazuje, że corocznie odstęp pomiędzy kolejnymi epizodami niżówkowymi skracany jest przeciętnie o 3 dni i 16 godzin. Jednak po raz kolejny stopień dopasowania linii trendu jest niewielki, gdyż wyjaśnia jedynie 3,5% obserwowanej zmienności. Wynika to m.in. z istnienia bardzo długich przerw międzyniżówkowych w drugiej połowie lat 70. i na początku lat 80. ubiegłego wieku.



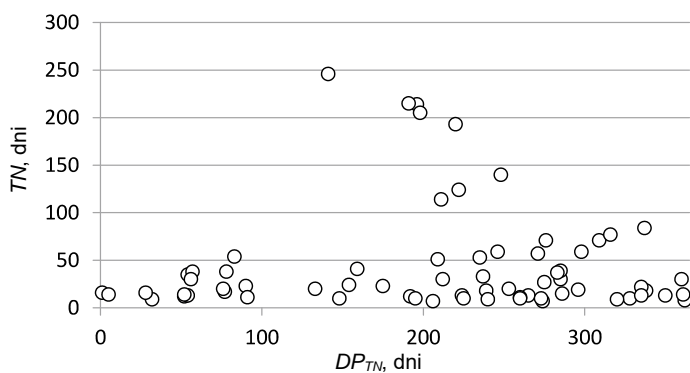
Rys. 9. Odstępy międzyniżówkowe w Warcie w Sieradzu w okresie 1971–2000: A: rozkład, B: wieloletni przebieg; *TMN* = odstęp międzyniżówkowy, 1–5 = oznaczenia jak na rys. 5; linią przerywaną wykreślono zidentyfikowaną funkcję trendu liniowego na poziomie istotności $\alpha = 0,01$, gdzie a = współczynnik kierunkowy, R^2 = współczynnik determinacji; źródło: opracowanie własne

Fig. 9. Inter-low-flow spacing of Warta River in Sieradz in the period 1971–2000: A: distribution, B: multiannual course; *TMN* = inter-low-flow spacing, 1–5 = see Fig. 5; dashed line draws the identified function of the linear trend at the level of significance $\alpha = 0.01$, where: a = slope coefficient, R^2 = determination coefficient; source: own elaboration

Obserwowany jest wyraźny wzrost TMN w latach 1975–1983. Najkrótsze odstępy zaobserwowano pod koniec lat 80. i na początku 90., kiedy występowały najdłuższe niżówki o największych niedoborach odpływu w skali badanego wielolecia. W pozostałych latach TMN sięga 200 dni.

Na podstawie odstępu międzyniżówkowego obliczono wskaźnik gęstości niżówek (WGN), czyli względną miarę częstości występowania tych zdarzeń. Charakterystyka ta wskazuje, o ile przeciętnie przerwy między niżówkami są dłuższe lub krótsze od samych epizodów. Wskaźnik gęstości niżówek oblicza się, dzieląc średnią wartość odstępu międzyniżówkowego przez średnią liczbę dni z niżówką [TOMASZEWSKI 2012]. Wartość wskaźnika oszacowanego dla Warty w Sieradzu w badanym wieloleciu wyniosła 2,28, co oznacza, że odstępy międzyniżówkowe były nieco ponad 2 razy dłuższe od samych epizodów. Obliczony dla Warty WGN jest bardzo zbliżony do przeciętnej wartości tego wskaźnika, wyznaczonego dla środkowej Polski, która wynosi 2,5 [TOMASZEWSKI 2012].

W toku prowadzonych analiz sprawdzono, czy czas trwania niżówki wykazuje sezonowe uwarunkowania. Ocenie poddano zależność długości niżówki od daty jej początku, końca oraz daty wystąpienia przepływu minimalnego. W żadnym z omawianych przypadków nie stwierdzono istotnej statystycznie zależności – przykład graficznej ilustracji tego zagadnienia przedstawiono na rysunku 10. Jak łatwo zauważyć, niżówki o różnych długościach występują w każdej porze roku. Nieznaczna tendencja wzrostowa może wskazywać, że niżówki jesienne mogą być nieco dłuższe od letnich, mimo że rzadziej występują. Widoczna na wykresie grupa zdarzeń odstających i trwających ponad 100 dni ma charakter epizodyczny i wiąże się z okresem surowej suszy hydrologicznej początku lat 90. (por. rys. 3) oraz



Rys. 10. Zależność czasu trwania niżówki od daty jej początku (okres 1971–2000); TN = czas trwania niżówki; DP_{TN} = data początku niżówki wyrażona liczbą dni od początku roku hydrologicznego; źródło: opracowanie własne

Fig. 10. Relationship between low-flow duration and the date of its beginning (period 1971–2000) TN = low-flow duration; DP_{TN} = the start date of low flow, expressed as the number of days from the beginnings of a hydrological year; source: own elaboration

okresowym zerwaniem genetycznej jednorodności reżimu przepływów niżówkowych między latami 1988 i 1995 (por. rys. 4). Nie ma zatem podstaw do twierdzenia, że w zlewni występują sezonowe czynniki determinujące jednoznacznie długość epizodów niżówkowych, co oznacza, iż proces ten można uznać za stochastyczny. Należy jednak pamiętać, że w miesiącach letnich i wczesnojesiennych niedobory odpływu niżówkowego będą większe niż w innych miesiącach, mimo że pojawiają się ze swoistą nieregularnością (por. rys. 5).

PODSUMOWANIE

Wieloletnia i sezonowa zmienność niżówek w Warcie w Sieradzu wykazuje dużą dynamikę. Badana rzeka charakteryzuje się zmiennym reżimem przepływów niżówkowych. W rozpatrywanym wielolecu zidentyfikowano liniowe trendy zmian niedoborów odpływu niżówkowego, czasów ich trwania oraz odstępów między kolejnymi epizodami. W ocenie jednorodności genetycznej dwukrotnie doszło do zmian w relacjach między czynnikami determinującymi przepływy niżówkowe (1989, 1995).

Zlewnia Warty, podobnie jak cała środkowa Polska, narażona jest na występowanie surowych susz hydrologicznych. W badanym 30-leciu zaobserwowano grupy lat suchych i wilgotnych. Szczególnie głębokie i długotrwałe niżówki, będące efektem rozwoju surowych susz hydrologicznych, wystąpiły w pierwszej połowie lat 90. XX wieku. W kształtowaniu niedoborów odpływu niżówkowego duże znaczenie odgrywają czynniki charakterystyczne dla miesięcy letnich i jesiennych, z maksymalnymi wartościami deficytów odpływu w sierpniu. Niżówki zimowe występują tutaj rzadko i są zazwyczaj przedłużeniem letnio-jesiennych. Z badania sezonowego podobieństwa niedoborów odpływu wynika, że stabilne i jednorodne warunki determinujące niżówki występują w okresie od kwietnia do października i związane są z rozkładem opadów, ewapotranspiracją oraz fazami wegetacji. Jednak zarówno krótkie, jak i długie niżówki mogą wystąpić w każdej porze roku, ponieważ nie zidentyfikowano istotnych zależności opisujących relacje między czasem trwania niżówki a sezonem (datą) jej pojawiania się. Niżówki w Warcie w Sieradzu pojawiają się stosunkowo często, lecz są to przeważnie epizody krótkie, trwające zazwyczaj do 26 dni. Niżówkę, której czas trwania przekracza 100, należy zaliczyć do zdarzeń rzadkich o charakterze ekstremalnym, a maksymalną wiarygodną niżówkę o prawdopodobieństwie nieprzekroczenia 95% oszacowano na 235 dni.

BIBLIOGRAFIA

- BARTCZAK A., GLAZIK R., TYSZKOWSKI S. 2014. The application of Box–Cox transformation to determine the Standardised Precipitation Index (SPI), the Standardised Discharge Index (SDI) and to identify drought events: Case study in Eastern Kujawy (Central Poland). *Journal of Water and Land Development*. No. 22 s. 3–15. DOI 10.2478/jwld-2014-0017.

- BARTNIK A., TOMASZEWSKI E. 2006. Zastosowanie indeksu pory koncentracji do oceny podatności reżimu rzecznego na formowanie przepływów ekstremalnych w zlewniach nizinnych. W: Przemiany środowiska geograficznego Polski północno-zachodniej [Application of seasonal time concentration index to assessment of river regime determination by extreme flows in lowland catchments. In: Changes of geographical environment of north-western Poland]. Pr. zbior. Red. A. Kostrzewski, J. Czerniawska. Poznań. Bogucki Wydaw. Nauk. s. 137–144.
- DĘBSKI K. 1970. Hydrologia [Hydrology]. Warszawa. Arkady ss. 368.
- DOMAŃSKI C. 1990. Testy statystyczne [Statistical tests]. Warszawa. PWE. ISBN 9788379697632 ss. 336.
- DYNOWSKA I. 1971. Typy reżimów rzecznych w Polsce [Types of river regimes in Poland]. Zeszyty Naukowe Uniwersytetu Jagiellońskiego. Prace Geograficzne. T. 28. ISSN 0083-4343 ss. 155.
- FLEIG A.K., TALLAKSEN L.M., HISDAL H., HANNAH D.M. 2011. Regional hydrological drought in north-western Europe: linking a new Regional Drought Area Index with weather types. Hydrological Processes. No. 25 s. 1163–1179.
- HANNAFORD J., LLOYD-HUGHES B., KEEF C., PARRY S., PRUDHOMME C. 2011. Examining the large-scale spatial coherence of European drought using regional indicators of precipitation and streamflow deficit. Hydrological Processes. No. 25 s. 1146–1162.
- HISDAL H., TALLAKSEN L.M., CLAUSEN B., PETERS E., GUSTARD A. 2004. Hydrological drought characteristics. W: Hydrological drought. Processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Pr. zbior. Red. L.M. Tallaksen, H.A.J. van Lanen. Developments in Water Science. No. 48. Amsterdam. Elsevier s. 139–198.
- JAKUBOWSKI W., RADZUK L. 2004. NIZOWKA 2003 software. W: Hydrological drought. processes and estimation methods for streamflow and groundwater. Pr. zbior. Red. L.M. Tallaksen, H.J. van Lanen. Developments in Water Science. No. 48. Amsterdam. Elsevier.
- JOKIEL P. 2004. Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku [Water resources in Central Poland on the verge of XXI century]. Łódź. Wydaw. UŁ. ISBN 83-7171-825-X ss. 114.
- KAZNOWSKA E., HEJDUK A., HEJDUK L. 2015. Charakterystyka występowania wezbrań i niszówek w małej zlewni Niziny Mazowieckiej [Characteristic of occurrence of floods and streamflow droughts in a small Mazovian lowland catchment]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 15. Z. 3 (51) s. 45–59.
- LORENC H. (red.) 2005. Atlas klimatu Polski [Atlas of climate in Poland]. Warszawa. IMGW. ISBN 83-88897-43-8 ss. 116.
- ŁABĘDZKI L. 2004. Problematyka susz w Polsce [Drought problems in Poland]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 4. Z. 1 (10) s. 47–66.
- ŁABĘDZKI L., BĄK B. 2004. Zróżnicowanie wskaźnika suszy atmosferycznej SPI w sezonie wegetacyjnym w Polsce [Differentiation of the atmospheric drought index SPI in the vegetation period in Poland]. Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie. T. 4. Z. 2a (11) s. 111–122.
- OZGA-ZIELIŃSKA M. 1990. Niszówki i wezbrania – ich definiowanie i modelowanie [Droughts and floods – Their definition and modelling]. Przegląd Geofizyczny. Z. 1–2 s. 33–44.
- SEARCY J.K., HARDISON C.H. 1960. Double-mass curves. Manual of hydrology. P. General surface-water techniques. Geological Survey Water-Supply Paper. No. 1541-B. Washington D.C ss. 66.
- SMAKHTIN V.U. 2001. Low flow hydrology: A review. Journal of Hydrology. No. 240 s. 147–186.
- STARKEŁ L., KUNDZEWICZ Z.W. 2008. Konsekwencje zmian klimatu dla zagospodarowania przestrzennego kraju [Consequences of climate change for spatial organization of Poland]. Nauka. Z. 1 s. 85–101.
- STRZEBOŃSKA-RATOMSKA B. 1994. Metodyka oceny intensywności i zasięgu suszy hydrologicznej. Cz. I. Susza hydrologiczna na Podkarpaciu w latach 1961–1990 [Methodology of the evaluation of intensity and range of hydrological drought. P. Hydrological drought in the Carpathian Region during 1961–1990]. Wiadomości IMGW. Z. 4 s. 15–42.

- TABRIZI A.A., KHALILI D., KAMGAR-HAGHIGHI A.A., ZAND-PARSA S. 2010. Utilization of time-based meteorological droughts to investigate occurrence of streamflow droughts. *Water Resources Management*. No. 24 s. 4287–4306.
- TALLAKSEN L.M., MADSEN H., CLAUSEN B. 1997. On the definition and modelling of streamflow drought duration and deficit volume. *Hydrological Sciences – Journal – des Sciences Hydrologiques*. No. 42. 1 s. 15–33.
- TOKARCZYK T. 2010. Niżówka jako wskaźnik suszy hydrologicznej [Low flow as an indicator of hydrological drought]. *Monografie. IMGW. Warszawa. Wydaw. IMGW. ISBN 978-83-61102-34-2 ss. 164.*
- TOMASZEWSKI E. 2007. Pora koncentracji odpływu podziemnego w środkowej Polsce. W: *Obieg wody w środowisku naturalnym i przekształconym [Time concentration of the groundwater runoff in central Poland. In: Water circulation in natural and transformed environment]*. Pr. zbior. Red. Z. Michalczyk. Lublin. Wydaw. UMCS s. 537–547.
- TOMASZEWSKI E. 2011. Defining the threshold level of hydrological drought in lake catchments. *Limnological Review*. Vol. 11. 2 s. 81–89.
- TOMASZEWSKI E. 2012. Wieloletnia i sezonowa dynamika niżówek w rzekach środkowej Polski [Multiannual and seasonal dynamics of low-flows in rivers of central Poland]. Łódź. Wydaw. UŁ. ISBN 978-83-7525-771-7 ss. 265.
- TOMASZEWSKI E. 2016. Impact of Lake Gołpo on low-flow regime of the upper Noteć River. *Limnological Review*. Vol. 16. 2 s. 95–103.
- ZELENHASIC E., SALVAI A. 1987. A method of streamflow drought analysis. *Water Resources Research*. Vol. 23. Iss. 1 s. 156–168.

Malwina KOZEK, Edmund TOMASZEWSKI

MULTIANNUAL AND SEASONAL DYNAMICS OF LOW-FLOWS IN THE WARTA RIVER IN SIERADZ

Key words: *drought streamflow deficits, hydrological drought, low-flow regime*

S u m m a r y

Investigations of low-flow dynamics in the Warta River in Sieradz were conducted for the period 1971–2000. Analyses were based on daily discharge series, made available by Polish Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. Low-flows were identified on the base of threshold level method where 70th percentile of the flow duration curve was established as truncation level. Studies included multiannual and seasonal dynamics of drought streamflow deficit volume, low-flow duration as well as inter-low-flow spacing which was taken as a frequency estimator of hydrological extremes occurrence.

On the base of results the structure of low-flow forming was assessed, especially in the field of its variability and statistical distribution. There were investigated multiannual tendencies where linear trends of changes of studied characteristics were observed. On the base of correlation coefficient low-flows stability on the consecutive months of the hydrological year was analysed. Moreover, low-flow genetic homogeneity of the Warta River was investigated on the base of double-mass curve. There also was estimated non-exceedance probability of maximum low-flow duration at significance level of 95% and 99%.

Adres do korespondencji: dr hab. Edmund Tomaszewski, prof. nadzw. UŁ, Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Pracownia Hydrologii i Gospodarki Wodnej, 90-139 Łódź, ul. Narutowicza 88; e-mail: edtom@uni.lodz.pl