




ANALIZA WYBRANYCH CHARAKTERYSTYK HYDROLOGICZNYCH DWÓCH MAŁYCH ZLEWNI NIZINNYCH

Kazimierz Banasik^{1,2}  0000-0002-7328-461X, Ewa Kaznowska¹  0000-0003-3471-6819, Beata Letkiewicz², Michał Wasilewicz¹  0000-0002-3678-8595

¹ Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego w Warszawie, Katedra Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej, ul. Nowoursynowska 166, 02-776 Warszawa

² Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy, ul. Podleśna 61, 01-673 Warszawa

ABSTRAKT

Cel pracy

- Porównanie wybranych charakterystyk hydrologicznych odnoszących się do przepływu średniego i przepływów niższych od średniego dla dwóch okresów wieloletnich małej rzeki nizinnej na podstawie badań terenowych.
- Porównanie średnich i niskich spływów jednostkowych z dwóch małych zlewni o różnej powierzchni w wieloleciu 1991–2020.
- Ocena zastosowania pośrednich metod wyznaczania przepływu średniego i średniego niskiego w wieloleciu na bazie wyników badań terenowych z dwóch małych zlewni.

Materiały i metody

Badania hydrologiczne prowadzone w małej zlewni nizinnej rzeki Zagożdżonki, o użytkowaniu rolniczo-leśnym, położonej w południowej części Niziny Mazowieckiej, w sposób ciągły od lipca 1962 roku, na stacji hydrologicznej Płachty Stare są podstawą wyznaczenia wybranych przepływów dobowych oraz głównych pierwszego i drugiego stopnia dla okresów wieloletnich 1963–1990 i 1991–2020. Wielokrotne pomiary jednoczesne przepływów w profilu Płachty Stare (zamykającym zlewnię o powierzchni 82,4 km²) i profilu Wygodza (zamykającym zlewnię o powierzchni 9,3 km²), wykonywane od 1980 roku stanowią podstawę ustalenia zależności statystycznej przepływów. Zależność ta posłużyła do wyznaczenia zarówno przepływów dobowych, a następnie na ich podstawie przepływów charakterystycznych: średniego i niskich w Wygodzie dla drugiego z podanych okresów wieloletnich.

Dla określenia charakterystyk hydrologicznych metodami pośrednimi zastosowano:

- wzór Iszkowskiego ze współczynnikiem odpływu wg Byczkowskiego na wyznaczenie przepływu średniego z wielolecia oraz metodę izorei Sq,
- wzór Stachy na wyznaczenie przepływu średniego niskiego oraz metodę izorei SNq.

Wyniki i wnioski

Badania wykazały zmniejszanie się zasobów odnawialnych w rozpatrywanym okresie. Przepływ średni w rozpatrywanych wieloleciach na stacji wodowskazowej Płachty Stare uległ zmniejszeniu o 24%. Zmniejszeniu uległy także minimalne przepływy roczne, a średni niski przepływ z wielolecia 1963–1990 w wieloleciu 1991–2020 zmniejszył się o 43%. Wyznaczone w badaniach przepływy w profilu Wygodza dla wielolecia 1991–2020 wykazały znacząco niższą jednostkową zasobność wodną (odniesioną do jednostki powierzchni zlewni) w porównaniu z danymi ze zlewni po profil Płachty Stare. Średni odpływ jednostkowy ze zlewni po Wygodę wynosi 1,83 dm³ · s⁻¹ · km⁻² i jest o 36% niższy od odpowiedniej wielkości ze zlewni po Płachtę Stare (2,85 dm³ · s⁻¹ · km⁻²). Średni niski odpływ ze zlewni w Wygodzie

✉ e-mail: kazimierz_banasik@sggw.edu.pl

wyniósł $0,011 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, przy czym w 7 na 30 rozpatrywanych lat hydrologicznych występował całkowity zanik przepływu.

Zastosowanie metod pośrednich na wyznaczenie przepływu średniego i średniego niskiego z wielolecia dało zbieżne wyniki z wynikami pomiarów w zlewni większej i rozbieżne w zlewni mniejszej. Wyniki z zastosowania metod pośrednich dla zlewni po profil Płachty Stare były bliższe wynikom pomiarowym z pierwszego wielolecia.

Słowa kluczowe: przepływ średni, SNQ, odnawialne zasoby wodne, zmiany użytkowania

WSTĘP Z CELEM I HIPOTEZĄ BADAWCZĄ

Charakterystyki przepływu rzeczno-ego są ważnymi wskaźnikami stanu zasobów wodnych, stanowią także podstawę do projektowania obiektów gospodarki wodnej, takich jak: jazy, zbiorniki czy ujęcia. Informacje o charakterystykach hydrologicznych większych i dużych rzek Polski są zbierane i udostępniane przez Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (Stachy, 1986, 1987; Zieliński i in., 1996; Fal i in., 1997, IMGW-PIB, 2020a, 2020c). Wyniki badań tendencji zmian przepływów w tych rzekach (Stachy, 1968; Pniewski i in., 2018) są niezbędne w planach i programach gospodarowania dużymi obiektami wodnymi. Ustalenie wartości przepływów charakterystycznych w małych zlewniach, w większości przypadków nieobjętych państwową siecią monitoringu hydrologicznego, jest zwykle ograniczone do stosowania metod pośrednich, a więc mniej dokładnych, opracowanych na podstawie wyników badań w zlewniach obserwowanych. Zmienność przepływów w małych zlewniach czułych na zmiany użytkowania, zmiany klimatu, a także lokalne pobory wody do nawodnień, powoduje, że wyniki z zastosowania metod pośrednich cechują się nieznaną dokładnością. Niepewność w określaniu przepływów zwiększa się wraz z rozpatrywaniem coraz to mniejszych zlewni, z uwagi na możliwy występujący okresowy zanik zasilania cieku wodami gruntowymi, wynikający z fluktuacji tych ostatnich i obniżenia ich poziomu poniżej dna cieku. Nieliczne wieloletnie badania prowadzone w małych zlewniach pozwalają wyznaczyć pożądane charakterystyki hydrologiczne, a także zweryfikować metody pośrednie.

W niniejszej pracy przedstawiono wyniki wyznaczenia dwóch istotnych w praktyce inżynierskiej

charakterystyk hydrologicznych: średniego rocznego przepływu – SSQ i średniego niskiego przepływu – SNQ ustalonych na podstawie wieloletnich badań hydrologicznych przeprowadzonych w dwóch profilach wodowskazowych małej rzeki nizinnej spoza sieci IMGW-PIB, oraz odniesienie ich do wyników dwóch metod pośrednich. Celem pracy było zbadanie: czy w rozpatrywanym okresie 1963–2020 podzielonym na dwa wielolecia hydrologiczne 1963–1990 i 1991–2020 wymienione przepływy charakterystyczne SSQ i SNQ i odpowiadające im odpływy jednostkowe rzeki Zagożdżonki w Płachtach Starych uległy istotnej zmianie; czy odpływy jednostkowe odnoszące się do badanych przepływów charakterystycznych rzeki Zagożdżonki w wieloleciu 1991–2020 dla zlewni większej (po profil Płachty Stare) i mniejszej (po Wygodę) są równe?; czy zastosowanie metod pośrednich do wyznaczenia analizowanych charakterystyk daje wiarygodne wyniki? Podział 58-letniego okresu badań na dwa nierówne wielolecia i wyróżnienie okresu 1991–2020 przyjmowanego obecnie powszechnie przez służby hydrologiczne i meteorologiczne jako reprezentatywny, może ułatwić porównywanie wyników tych badań z innymi.

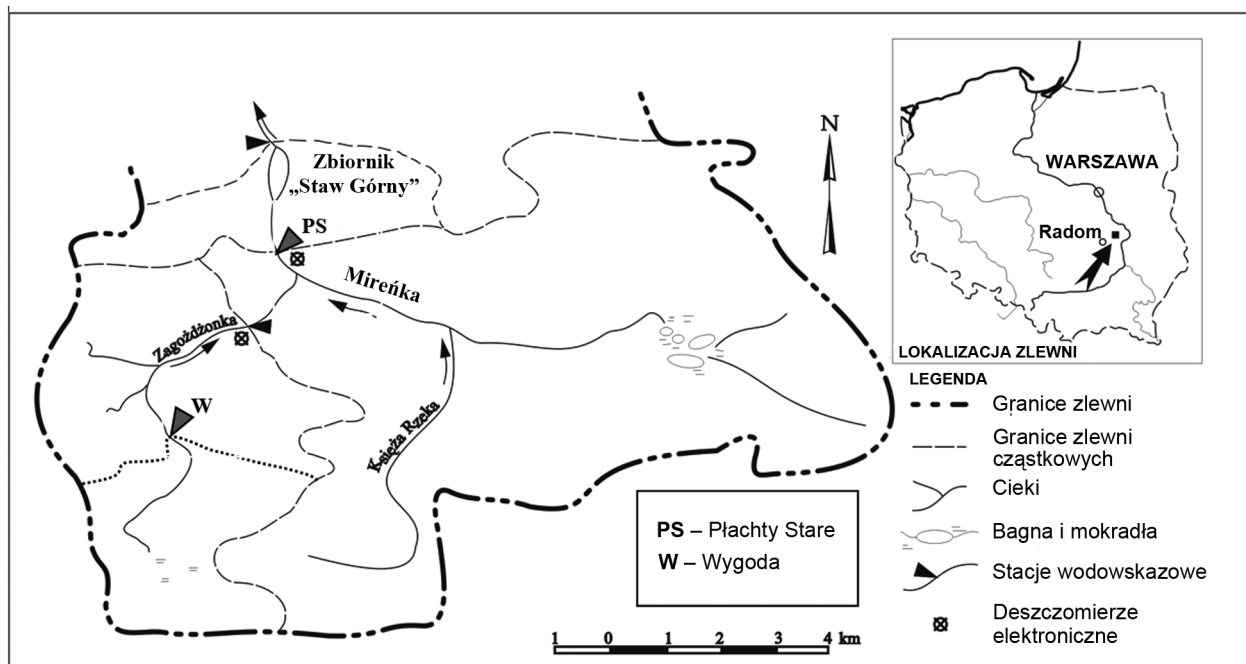
MATERIAŁY I METODY

Charakterystyka obiektu

Przedmiotem badań są przepływy na stacji hydrologicznej Płachty Stare i w profilu pomiarowym Wygoda rzeki Zagożdżonki, lewego dopływu Wisły, położonych ok. 100 km na południe od Warszawy, a wg podziału fizyczno-geograficznego na Równinie Radomskiej wchodzącej w skład makroregionu Wzniesienia Południowomazowieckiego. Lokalizację profili pomiarowych zamykających dwie małe zlewnie rzeki Zagożdżonki przedstawiono na ryc. 1. Pomiaru hydro-

metryczne stanów i przepływów rzeki Zagożdżonki na stacji Płachty Stare prowadzone są przez zespoły badawcze SGGW, obecnie z Katedry Inżynierii Wodnej i Geologii Stosowanej, nieprzerwanie od lipca 1962 roku (KBW 1963, Banasik 1983, 1994; Banasik i in. 2013, 2021). Powierzchnie zlewni do badanych profili pomiarowych Wygoda i Płachty Stare przedstawionych na ryc. 2, wynoszą odpowiednio 9,3 km² i 82,4 km². Zlewnia rzeki Zagożdżonki jest zlewnią niziną. Deniwelacja terenu zlewni do profilu Wygoda wynosi 18,5 m, a do profilu Płachty Stare 37 m (maksymalne i minimalne wzniesienia wynoszą odpowiednio 185 i 148 m n.p.m.). Średnie spadki głównych cieków wynoszą od 1,5 do 3,5‰. Lokalne depresje (tereny bezodpływowe), niemające wpływu na proces kształtowania się odpływu bezpośredniego, w tym bagna i mokradła, stanowią znaczącą część obszaru zlewni, tj. 19,6 km² do profilu Płachty Stare. Użytkowanie te-

renu ulegało zmianie – w początkowym okresie badań w zlewni przeważały użytki rolne, które zajmowały ok. 52% powierzchni, a na nich zboża i ziemniaki. Lasy zajmowały ok. 45% powierzchni rozpatrywanej zlewni powyżej profilu Płachty Stare. Obecnie udział użytków rolnych zmniejszył się do 36% (w tym grunty orne stanowią 25%, a użytki zielone 11%), natomiast udział lasów i terenów zalesionych wzrósł do 61% (Hejduk i in., 2021). Pozostałą część zlewni zajmują tereny zabudowane (2%) i akwenty (1%). Zmiany głównych rodzajów użytków w zlewni po rozpatrywane profile podano w tabeli 1. Gleby piaszczyste są dominującym rodzajem gleb na obszarze zlewni Zagożdżonki. Lokalizację profili pomiarowych, podstawowych parametrów fizjograficznych oraz hydrometeorologicznych niezbędnych do zastosowania metod pośrednich dla dwóch rozpatrywanych zlewni podano w tabeli 1.



Ryc. 1. Lokalizacja profili pomiarowych Wygoda i Płachty Stare w zlewni rzeki Zagożdżonki

Fig. 1. Locality map of the river gauging stations Wygoda and Płachty Stare in the Zagożdżonka catchment



Ryc. 2. Widok profili pomiarowych: Wygoda – z lewej strony i Płachty Stare – z prawej strony (fot. K. Banasik)

Fig. 2. Views of the gauging stations: Wygoda – on the left, and Płachty Stare – on the right (photo by: K. Banasik)

Tabela 1. Główne charakterystyki analizowanych zlewni rzeki Zagożdżonki

Table 1. Main characteristics of the Zagożdżonka catchment

Lp.	Charakterystyka	Do stacji wodowskazowej	
		Płachty Stare	Wygoda
1.	Współrzędne stacji wodowskazowej	51°26'43.6"N; 21°27'36.0"E	51°25'10.9"N; 21°25'49.5"E
2.	Powierzchnia zlewni – A (km ²)	82,4	9,3
3.	Maksymalna różnica wysokości w zlewni – ΔH (m)	37,0	18,5
4.	Stoczystość zlewni – Ψ (m/km)	4,1	6,1
5.	Udział głównych rodzajów użytków w zlewni w okresie badań*) (–)		
	a) lasów i terenów leśnych	0,45 => 0,61	0,52 => 0,72
	b) gruntów ornyczych	0,42 => 0,25	0,41 => 0,17
	c) użytków zielonych	0,10 => 0,11	0,04 => 0,08

*) – udziały użytków ustalone na podstawie map z lat 1970 i 2018

Pomiary i wyznaczenie przepływów Zagożdżonki na stacjach wodowskazowych Płachty Stare i Wygoda

Przepływy dobowe w profilu Płachty Stare, a następnie główne pierwszego i drugiego stopnia, odnoszące się do przepływów niskich i średnich wyznaczono zgodnie z zasadami stosowanym w IMGW-PIB (Paślawski, 1973; Byczkowski, 1999). Przepływy

dobowe ustalono na podstawie codziennych notowań stanów wody i krzywej natężenia przepływu (konsumcyjnej), weryfikowanej corocznie w oparciu o wielokrotne (8–12-krotne) pomiary hydrometryczne. Stany wody w okresie 1962–1980 odczytywane były przez obserwatora trzy razy dziennie zgodnie z zasadami stosowanymi w państwowej służbie hydrologicznej, a w okresach wezbrań nawet co godzi-

nę. Od roku 1980 stany rejestrowane były w sposób ciągły za pomocą limnigrafów mechanicznych, później natomiast – od 1995 roku, za pomocą czujników elektronicznych, a od 2008 roku także z możliwością podglądu wyników rejestracji przez Internet. Od wprowadzenia ciągłej – mechanicznej, a następnie elektronicznej rejestracji stanów wody, utrzymano kontrolne codzienne odczyty wodowskazowe przez obserwatora. Dla wielolecia hydrologicznego 1963–2020 wyznaczono także dobowe i okresowe, w tym roczne, sumy opadów, przy czym dane do roku 1981 pochodziły z pobliskiej stacji opadowej IMGW-PIB, a w późniejszym okresie z pomiarów SGGW, między innymi ze stacji w Płachtach Starych i Czarnej (Banasik i in., 2013).

Wielokrotne pomiary jednoczesne przepływów w profilu Płachty Stare i profilu Wygoda, wykonywane od 1980 do 2019 roku były podstawą ustalenia zależności statystycznej przepływów (Banasik i in., 2019; Sauquet i in., 2020). Zależność ta, przedstawiona na ryc. 3 wraz z wynikami równoczesnych pomiarów przepływu, posłużyła do wyznaczenia przepływów dobowych w profilu Wygoda dla okresu 1991–2020. Na ich podstawie wyznaczono przepły-

wy pierwszego i drugiego stopnia odnoszące się do przepływów średnich i niskich.

Do porównania analizowanych przepływów głównych drugiego stopnia (SNQ i SSQ) w profilu Płachty Stare w wieloleciach 1963–1990 i 1991–2020, a także dla porównania odpływów jednostkowych drugiego stopnia (SNq i SSq) w wieloleciu 1991–2020 ze zlewni po profil Wygoda i Płachty Stare, zastosowano test statystyczny istotności dwóch średnich.

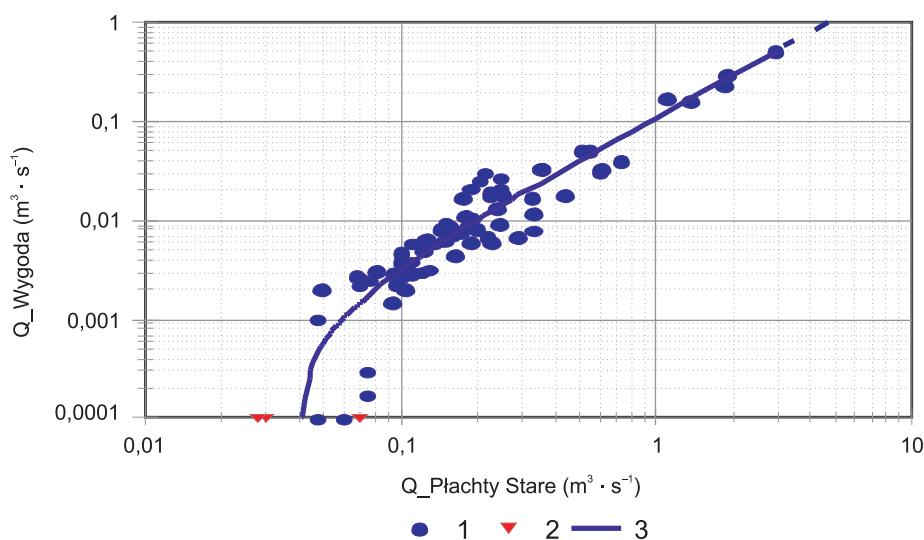
Zastosowane metody empiryczne wyznaczania przepływów SSQ i SNQ

Do wyznaczenia przepływów średnich z wielolecia – SSQ zastosowano dwie metody:

- Wzór Iszkowskiego ze współczynnikiem odpływu wg Byczkowskiego (1999)
- Metodę izorei S_q wg Atlasu Hydrologicznego Polski (Stachy, 1987)

Do wyznaczenia przepływów średnich niskich – SNQ zastosowano:

- Wzór Stachy (1990, za Byczkowskim 1999)
- Metodę izorei SN_q wg Atlasu Hydrologicznego Polski (Stachy, 1987)



Ryc. 3. Zależności przepływów jednoczesnych w Wygodzie i Płachtach Starych (1 – pomiary hydrometryczne w dwóch profilach, 2 – pomiary w Płachtach Starych i suche koryto w Wygodzie, 3 – zależność regresyjna)

Fig. 3. Relationship of simultaneous discharges in the gauging stations Wygoda and Płachty Stare (1 – hydrometry conducted in both river gauges, 2 – hydrometry conducted at the gauge Płachty Stare and dry bed observed at the gauge Wygoda, 3 – regression relationship)

Podane powyżej metody należą do jedynych do wyznaczania przepływów średnich i średnich niskich z wielolecia w zlewniach nieobserwowanych w tym rejonie kraju, stąd ich zastosowanie, mimo że opracowane zostały na podstawie danych pomiarowych państwowej służby hydrologicznej z początku drugiej połowy ubiegłego wieku.

Parametry do wzorów i metod izorei ustalone z Atlasu hydrologicznego Polski i mapy topograficznej w skali 1: 25000 zestawiono w tabeli 2.

WYNIKI I DYSKUSJA

Charakterystyki hydrologiczne w latach 1963–1990 i 1991–2020 na tle wysokości opadów

Roczne warstwy opadu i odpływu w zlewni Zagożdżonki po profil Płachty Stare oraz średnie wieloletnie tych wielkości w okresach 1963–1990 i 1991–2020 przedstawiano na ryc. 4. Średnia roczna warstwa opadu dla wskazanych wieloleci wynosi odpowiednio 617 i 615 mm, natomiast średnie roczne warstwy odpływu

Tabela 2. Parametry zalewni Zagożdżonki wykorzystane w metodach empirycznych wyznaczania przepływów średnich i średnich niskich z wielolecia

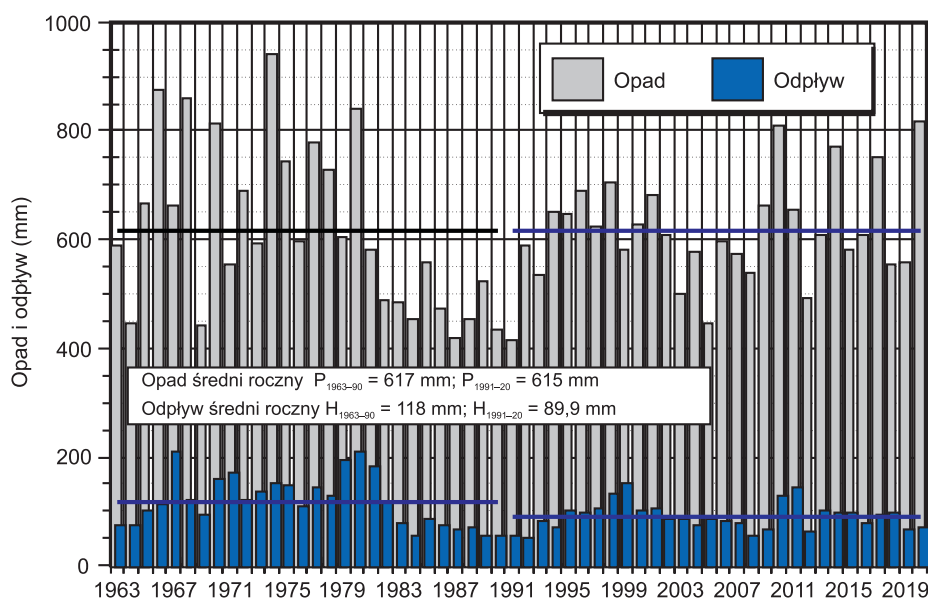
Table 2. Parameters used in the empirical methods for calculation of the mean discharge and mean of annual minima

Lp.	Parametr zlewni	Profil wodowskazowy	
		Płachty Stare	Wygoda
<u>Ustalone z mapy topograficznej (w skali 1:25 000):</u>			
1.	Różnica wysokości działu wodnego w punkcie przecięcia się z osią suchej doliny a wysokością przekroju obliczeniowego zamykającego zlewnię – ΔW (m) [Wg – Wd] (m n.p.m.)	27,3 [174.8 – 147.5]	13.0 [176.5 – 163.5]
2.	Długość cieków wraz suchą doliną – L+I (km)	12,7	5,79
3.	Spadek cieków – i_r (m/km)	2,15	2,25
4.	Wskaźnik jeziorności – J (–)	0.00	0.00
<u>Wg Atlasu hydrologicznego Polski (Stachy, 1987):</u>			
5.	Średnia roczna suma opadu – P (mm); [arkusz 10]		545
6.	Średni odpływ jednostkowy – S_q ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$); [arkusz 56]		3,8
7.	Średni niski odpływ jednostkowy – SN_q ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$); [arkusz 61]		0,87
8.	Średni jednostkowy odpływ pochodzenia podziemnego – SN_{qg} ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) [arkusz 65]	1, 6	1,5
<u>Wg tabeli Byczkowskiego (1999):</u>			
9.	Współczynnik odpływu – c (–) (wartość średnia rzek sąsiednich: Radomki i Hżanki)		0,225

118 i 89,9 mm. Statystyczną istotność występującej tu różnicy średnich wieloletnich warstw odpływu w rozpatrywanych okresach (28 mm, tj. 24% w odniesieniu do średniej z lat 1963–90) potwierdzono testem różnic wartości oczekiwanych dwóch populacji (Węglarczyk, 2010) wynoszącym $t_0 = 2,80$. Wcześniejsze analizy rocznych warstw opadu i odpływu wykazały występowanie także statystycznie istotnego trendu w odniesieniu do odpływu, na poziomie istotności $p = 0,05$, i brak trendu w odniesieniu do opadów (Banasik i in., 2013, Hejduk i in., 2021). Zakres zmienności warstwy rocznych opadów w pierwszym wieloleciu wynosił 524 mm (od 417 mm w 1987 r. do 941 mm w 1973 r.), natomiast w drugim 402 mm (od 414 mm w 1991 r. do 816 w 2020 r.). Zakres zmienności rocznej warstwy odpływu wynosił 153 mm w wieloleciu 1963–1990 (od 54 w 1990 r. do 207 mm w 1980 r.) i 93 mm w wieloleciu 1991–2020 (od 52 mm w 1992 r. do 145 mm w 2011 r.).

Odpowiadające powyższym warstwom odpływu średniego przepływu średnie – SSQ i średnie odpływy jednostkowe SSq w rozpatrywanych wieloleciach zestawiono w tabeli 3, w której podano także charaktery-

styki odnoszące się do przepływu i odpływu średniego niskiego (SNQ i SNq) oraz najniższych z niskich (NNQ i NNq). Te ostatnie charakterystyki mają duże znaczenie przy ustalaniu przepływów nienaruszalnych, a także są dobrym wskaźnikiem oddziaływania zmian klimatu i/lub użytkowania zlewni na zasoby wodne. Jak podano wyżej, ostatnie trzydziestolecie (1991–2020) było mniej zasobne w wodę od poprzedzającego go 28-lecia (1963–1990) o 24%, z przepływami SSQ wynoszącymi odpowiednio $0,235 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ i $0,308 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Zmniejszeniu uległy także przepływy średnie niskie SNQ = $0,090 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w wieloleciu 1963–1990 do SNQ = $0,051 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ w wieloleciu 1991–2020, tj. o 43%, natomiast najniższy z minimalnych rocznych NNQ uległ zmniejszeniu o 47% tj. z $0,030$ do $0,016 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ (dla dobowego kroku czasowego). Za przyczyny zmniejszających się przepływów uznaje się zwiększoną ewapotranspirację wynikającą zarówno z ocieplenia klimatu (Kundzewicz, 2017; IMGW-PIB, 2021b; Kuchar, 2021; Zhengrong i in., 2021), jak i zmiany użytkowania terenu (m.in. wzrost udziału lasów i terenów zalesionych w zlewni [tabela 1]) oraz stosowanie niemonitorowanego poboru wody w okre-



Rys. 4. Roczne warstwy opadu i odpływu w okresie 1963–2020 oraz odpowiednie średnie w wieloleciu 1963–1990 i 1991–2020 w zlewni Zagożdżonki po profil Płachty Stare

Fig. 4. Annual precipitation and runoff in the period 1963–2020 and long term mean values of the characteristics for 1963–1990 and 1991–2020 for Zagożdżonka catchment upstream of the Płachty Stare gauge

Tabela 3. Przepływy i odpływy jednostkowe, główne średnie i niskie drugiego stopnia rzeki Zagożdżonki w profilu Płachty Stare w okresie 1963–1990 i 1991–2020 oraz odpowiadające im odchylenia standardowe i współczynniki zmienności

Table 3. Mean, mean low and multiannual minimum discharges and respective specific discharges for the periods 1963–1990 and 1991–2020 for the Zagożdżonka catchment at the Płachty Stare gauge with statistical parameters

Charakterystyki hydrologiczne i statystyczne	Wielolecie	
	1963–1990	1991–2020
Przepływy główne drugiego stopnia ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$)		
średnie – SSQ	0,308	0,235
średnie niskie – SNQ	0,090	0,051
najniższy z niskich – NNQ	0,030	0,016
Odpływy jednostkowe ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$):		
średnie – SSq	3,74	2,85
średnie niskie – SNq	1,09	0,62
najniższy z niskich – NNq	0,36	0,19
Odchylenia standardowe przepływów ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$):		
średnich rocznych – δ_{SQ}	0,122	0,065
minimalnych rocznych – δ_{NQ}	0,047	0,021
Współczynnik zmienności przepływów:		
średnich rocznych – v_{SQ}	39%	27%
minimalnych rocznych – v_{NQ}	52%	41%

sach wegetacji, m.in. do nawodnień kroplowych (Krajewski i in., 2019, 2021; Hejduk i in., 2021).

Zmienność przepływów średnich i minimalnych rocznych charakteryzowana dwoma parametrami statystycznymi – odchyleniem standardowym i współczynnikiem zmienności – była większa w pierwszym z analizowanych wieloleci. Interpretując zmienność wg klasyfikacji podanej w tabeli 4 (EZ 2020), w przypadku przepływów minimalnych rocznych w pierwszym wieloleciu wystąpiła zmienność silna ($45\% < v < 100\%$), w pozostałych przypadkach wystąpiła zmienność przeciętna ($25\% < v < 45\%$).

Przepływy średnie i średnie niskie oraz odpowiednie odpływy jednostkowe w dwóch zlewniach rzeki Zagożdżonki w okresie 1991–2020

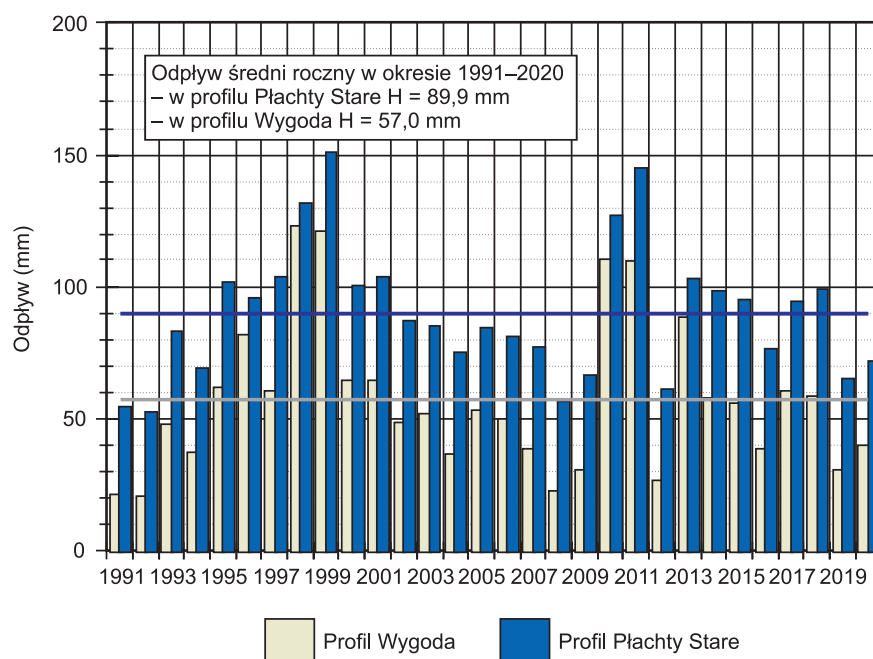
Przepływy dobowe w profilach wodowskazowych Płachty Stare i Wygoda były podstawą wyznaczenia rocznych warstw odpływu (ryc. 5) i przepływów śred-

Tabela 4. Opis zmienności charakterystyk rocznych przepływów na podstawie współczynnika zmienności

Table 4. Variability of the annual discharge characteristics based on the variation coefficient

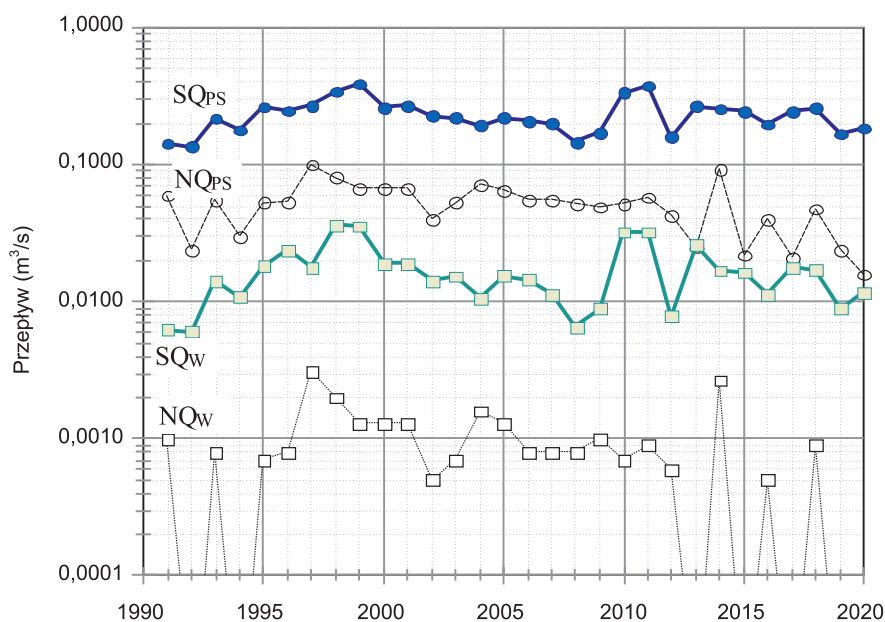
Współczynnik zmienności	Opis zmienności
< 25%	mała zmienność
(25%–45%)	przeciętna zmienność
(45%–100%)	silna zmienność
> 100%	bardzo silna zmienność

nich rocznych – SQ oraz minimalnych rocznych – NQ (ryc. 6), a także średnich wieloletnich i minimalnych przepływów (SSQ, SNQ, NNQ) i odpowiednich odpływów jednostkowych (SSq, SNq, NNq) ze zlewni zamykanych tymi profilami w 30-leciu 1991–2020



Ryc. 5. Roczne oraz średnie wieloletnie warstwy odpływu w okresie 1991–2020 ze zlewni Zagożdżonka w profilu Wygoda i Płachty Stare

Fig. 5. Annual and long term average runoff in the period 1991–2020 of the Zagożdżonka in the gauge Wygoda and Płachty Stare



Ryc. 6. Przepływy średnie roczne (SQ) i minima roczne (NQ) w profilu Płachty Stare (SQ_{PS} , NQ_{PS}) i Wygoda (SQ_W i NQ_W) w wieloleciu 1991–2020

Fig. 6. Mean and minimal annual discharges (SQ and NQ respectively) for the gauge Płachty Stare (SQ_{PS} , NQ_{PS}) and Wygoda (SQ_W i NQ_W) for the period 1991–2020

(tabela 5). Średnia jednostkowa zasobność wodna wyrażona warstwą odpływu H i odpływem jednostkowym SSq po profil Wygoda (zlewni mniejszej o $A = 9,3 \text{ km}^2$; $H = 57,0 \text{ mm}$, $SSq = 1,83 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) była niższa o 36% od tej po profil Płachty Stare ($A = 82,4 \text{ km}^2$; $H = 89,9 \text{ mm}$, $SSq = 1,83 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Średni niski odpływ jednostkowy ze zlewni mniejszej ($SNq = 0,011 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$) był niższy o 83% od tego po profil Płachty Stare ($SNq = 0,062 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Wiąże się to prawdopodobnie z niższym położeniem zwierciadła wody gruntowej względem dna cieków w zlewniach mniejszych, w których w dłuższych okresach posusznych zwierciadło może obniżyć się poniżej dna cieków, powodując zanik zasilania gruntowego. Potwierdzeniem takiej hipotezy może być okresowy zanik przepływu w profilu zamykającym zlewnię mniejszą, tj. Wygoda, odnotowany w siedmiu latach hydrologicznych (1992, 1994, 2013, 2015, 2017, 2019 i 2020) spośród trzydziestu rozpatrywanych (ryc. 6 i 7). Wpływ na niższe wartości analizowanych charakterystyk hydrologicznych odniesionych do jednostki powierzchni zlewni po profil Wygoda, szczególnie minimum rocznych, w tym zaniku odpływu, może mieć także wyższy udział lasów w strukturze tej zlewni. Wyższe współczynniki zmienności przepływów średnich rocznych i minimum rocznych w profilu Wygoda, w porównaniu z Płachtami Starymi (tabela 5), wskazują także na mniej stabilny proces zasilania rzeki.

Porównanie odpływów jednostkowych wyznaczonych z pomiarów z wynikami zastosowania metod pośrednich

Odpływy jednostkowe wyrażające ilość odpływającej wody z jednostki powierzchni zlewni w jednostce czasu, ustalone z pomiarów oraz z zastosowania dwóch rodzajów metod pośrednich, tj. wzorów empirycznych – Iszkowskiego ze współczynnikami odpływu Byczkowskiego na wyznaczenie przepływu SSQ i Stachy na wyznaczenie SNQ oraz Atlasu hydrologicznego Polski do wyznaczenia średniego odpływu jednostkowego Sq i średniego niskiego odpływu jednostkowego SNq , zestawiono w tabeli 6. Zastosowanie metod pośrednich dało we wszystkich przypadkach wyższe wartości aniżeli z pomiarów, z tym że w przypadku większej zlewni błąd względny zawierał się w przedziale od 33% do 40%, natomiast w mniejszej wyniósł ponad 100%.

Przyjmując granice dla błędów względnych takie jak podano dla współczynników zmienności w tabeli 4 i interpretując je odpowiednio jako małe, przeciętne, duże i bardzo duże, wyniki z zastosowanych tu metod pośrednich do wyznaczania odpływu średniego i średniego niskiego dla zlewni większej – po profil Płachty Stare uznać można za akceptowalne. W przypadku mniejszej z rozpatrywanych zlewni stwierdzono zdecydowanie brak zgodności wyników zastosowania metod pośrednich z wynikami pomiarów zarówno w odniesieniu do Sq , jak i SNq .



Ryc. 7. Widok suchego koryta Zagożdżonki w profilu Wygoda (fotografia z lewej strony) i niżówki na stacji wodowskazowej Płachty Stare (z prawej strony) w dniu 12.08.2019 (fot. K. Banasik)

Fig. 7. Views of dry bed of the Zagożdżonka River at the gauging stations Wygoda (photo on the left) and low flow at Płachty Stare (photo on the right) on August 12, 2019 (photo by K. Banasik)

Tabela 5. Przepływy i odpływy jednostkowe główne średnie i niskie drugiego stopnia rzeki Zagożdżonki w profilu Płachty Stare i Wygoda w okresie 1991–2020

Table 5. Mean and minimal second degree discharges and respective specific discharges for the period 1991–2020 for the Zagożdżonka river at the Płachty Stare and Wygoda gauging stations

Miary odpływu i charakterystyki statystyczne	Profil	
	Płachty Stare	Wygoda
Przepływy główne drugiego stopnia ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$):		
średnie – SSQ	0,235	0,017
średnie niskie – SNQ	0,051	0,001
najniższy z niskich – NNQ	0,016	0,000
Odpływy jednostkowe ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$):		
średnie – SSq	2,85	1,83
średnie niskie – SNq	0,62	0,11
najniższy z niskich – NNq	0,19	0,000
Odchylenia standardowe przepływów ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$):		
średnich rocznych – δ_{SQ}	0,065	0,008
minimalnych rocznych – δ_{NQ}	0,021	0,001
Współczynnik zmienności przepływów:		
średnich rocznych – v_{SQ}	27%	50%
minimalnych rocznych – v_{NQ}	41%	86%

Biorąc pod uwagę, iż mapy izorei opracowane zostały na podstawie danych pomiarowych z okresu 1951–1970 (Stachy, 1986), podobnie jak wzór Stachy (1990) i współczynniki odpływu wg Byczkowskiego (1999), warto zwrócić uwagę, iż porównując wyniki z zastosowania metod pośrednich z wynikami pomiarów w Płachtach Starych z pierwszego wielolecia (1963–1990) uzyskuje się bardzo dobrą zgodność w ocenie średniego odpływu jednostkowego (błędy w zakresie 2–4%) i dobrą zgodność w ocenie średniego niskiego odpływu jednostkowego (błędy ze znakiem ujemnym w zakresie 20–22%).

W części tabelaryczno-opisowej Atlasu hydrologicznego Polski podano, iż „brak jest podstaw do stwierdzenia, jaka jest najmniejsza powierzchnia

zlewni, w której przepływy minimalne mogą być określone na podstawie odpływów jednostkowych odczytanych z map Izorei” (Stachy, 1986). Przedstawione badania mogą być również przyczynkiem wskazującym, iż w badanym regionie granica ta znajduje się pomiędzy dwiema wielkościami powierzchni badanych zlewni, i jest bliższa tej większej o $A = 82,4 \text{ km}^2$. Uwzględniając dodatkowo obserwacje i pomiary na stacji wodowskazowej Czarna na Zagożdżonce (Banasik, 1994; Hejduk i in., 2018) położonej między Wygodą i Płachtami Starymi, i zaznaczonej na ryc. 1, można stwierdzić, iż graniczna wielkość zlewni, w której koryto w okresach letnich może wysychać (tj. $\text{NNq} = 0,0 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$), zawiera się pomiędzy powierzchniami 10 km^2 a 20 km^2 .

Tabela 6. Odpływy jednostkowe wyznaczone z pomiarów dla okresu 1991–2020 oraz metodami pośrednimi rzeki Zagożdżonki w profilu Płachty Stare i Wygoda

Table 6. Respective specific discharges determined from measurements for the period 1991–2020 and using indirect methods of the Zagożdżonka river in the Płachty Stare and Wygoda profile

Charakterystyka hydrologiczna – metoda oceny	Profil	
	Płachty Stare	Wygoda
Średni odpływ jednostkowy – Sq ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$):		
z pomiarów	2,85	1,83
wg wzoru I-B ^{*)}	3,89	3,89
wg AhP ^{**)}	3,8	3,8
Średni niski odpływ jednostkowy – SNq ($\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$):		
z pomiarów	0,62	0,11
wg wzoru Stachý	0,85	0,72
wg AhP ^{**)}	0,87	0,87
Błędy metod pośrednich – δ (%), oceny średniego odpływu jednostkowego – Sq:		
wg wzoru I-B ^{*)}	36	113
wg AhP ^{**)}	33	108
Błędy metod pośrednich – δ (%), oceny średniego niskiego odpływu jednostkowego – SNq:		
wg wzoru Stachý	37	560
wg AhP ^{**)}	40	690

^{*)} – wzór Iszkowskiego ze współczynnikiem odpływu wg Byczkowskiego (1999), ^{**)} – Atlas hydrologiczny Polski

PODSUMOWANIE

- Badania hydrologiczne rzeki Zagożdżonki, lewego dopływu Wisły, położonej w makroregionie Wzniesienia Południowomazowieckiego, wykazały zmniejszanie się odnawialnych zasobów wodnych, przy równych sumach opadów w dwóch wieloletniach. Przepływ średni z wielolecia 1963–1990 na stacji wodowskazowej Płachty Stare wynoszący SSQ = 0,308 m³/s, uległ zmniejszeniu w wieloleciu 1991–2020 do 0,235 m³/s, tj. o 24%. Odpowiadające tym okresom średnie odpływy jednostkowe wynoszą odpowiednio SSq = 3,74 i 2,85 dm³ · s⁻¹ · km⁻², a średnie roczne warstwy odpływu H = 118 i 89,9 mm. Zmniejszeniu uległy także minimalne przepływy roczne, a średni niski przepływ wynoszący w pierwszym wieloleciu SNQ = 0,090 m³/s uległ zmniejszeniu w drugim do 0,051 m³/s, to jest o 43%.
- Analiza przepływów z lat 1991–2020 w dwóch profilach wodowskazowych zamykających zlewnie o różnej powierzchni, wykazała znacząco niższą jednostkową zasobność wodną (odniesioną do jednostki powierzchni) zlewni mniejszej (po profil Wygoda o A = 9,3 km²) w porównaniu ze zlewnią większą (po profil Płachty Stare o A = 82,4 km²). Przepływ średni z wielolecia w Wygodzie SSQ = 0,017 m³/s odpowiada średniemu odpływowi jednostkowemu SSq = 1,83 dm³ · s⁻¹ · km⁻². Wartość ta jest o 36% niższa od odpowiedniej wartości ze zlewni po Płachty Stare (SSq = 2,85 dm³ · s⁻¹ · km⁻²). Średni niski odpływ jednostkowy w Wygodzie SNq = 0,11 dm³ · s⁻¹ · km⁻² jest o 82% niższy od odpowiedniej wielkości ze zlewni po Płachty Stare. W mniejszej z rozpatrywanych zlewni stwierdzono okresowy zanik przepływów w miesiącach letnich w siedmiu latach hydrologicznych z wielolecia 1991–2020.

- Zastosowanie metod pośrednich do wyznaczenia przepływu średniego i średniego niskiego z wieloletnia dało zbieżne wyniki z wynikami pomiarów w zlewni większej, o powierzchni $A = 82,4 \text{ km}^2$, i rozbieżne w zlewni mniejszej, o powierzchni $A = 9,3 \text{ km}^2$, co potwierdza pogląd o ograniczonej stosowności metod pośrednich do zlewni bardzo małych.
- Wyniki z zastosowania metod pośrednich dla zlewni większej, po profil Płachty Stare, były bliższe wynikom pomiarowym z pierwszego, starszego wieloletnia (1963–1990), co potwierdza pogląd o potrzebie uaktualnienia metod pośrednich wyznaczania przepływów charakterystycznych, opracowanych przed kilkoma dekadami.

LITERATURA

- Banasik, K. (1983). Rozmieszczenie użytków w zlewni jako czynnik minimalizujący natężenie transportu rumowiska w korycie rzeczonym. *Maszynopis*. Warszawa: SGGW, Katedra Inżynierii Wodnej.
- Banasik, K. (1994). Model sedymentogramu wezbrania opadowego w małej zlewni rolniczej. *Rozprawy naukowe i monografie*. T. 191. Warszawa: Wydaw. SGGW.
- Banasik, K., Hejduk, L., Hejduk, A., Kaznowska, E., Banasik, J., Byczkowski, A. (2013). Wieloletnia zmienność odpływu z małej zlewni rzecznej w regionie Puszczy Kozienickiej. *Sylwan*, 157(8), 578–586.
- Banasik, K., Hejduk, L., Krajewski, A., Wasilewicz, M. (2021). The intensity of siltation of a small reservoir in Poland and its relationship to environmental changes. *Catena* 204
- Banasik, K., Kaznowska, E., Wasilewicz, M., Więzik, B. (2019). Intermittence of Streamflow from a Small Lowland Watershed in Poland, *American Geophysical Union, Fall Meeting 2019*, abstract #NH23B-1011, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2019AGUFMNH23B1011B/abstract>. (dostęp: 8.02.2022).
- Byczkowski, A. (1999). *Hydrologia*, T. 1 i 2. Warszawa: Wydawnictwo SGGW.
- Hejduk, A., Kaznowska, E., Hejduk, L., Gładecki, J. (2018). Reżim opadów i przepływów w zlewni rzeki Zagożdżonki po profile Płachty Stare i Czarna. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 18, 1(61), 37–55.
- Hejduk, L., Kaznowska, E., Wasilewicz, M., Hejduk, A. (2021) Dynamics of the Natural Afforestation Process of a Small Lowland Catchment and Its Possible Impact on Runoff Changes. *Sustainability*, 13.
- EZ – Encyklopedia Zarządzania (2020). Współczynnik zmienności https://mfiles.pl/pl/index.php/Wsp%C3%B3lczynnik_zmienno%C5%82czynnik_zmienn%C5%9Bci (dostęp: 8.02.2022).
- Fal, B., Bogdanowicz, E., Czernuszenko, W., Dobrzyńska, I., Koczyńska, A. (1997). Przepływy charakterystyczne głównych rzek polskich w latach 1951–1990. *Materiały Badawcze IMGW 21*, Warszawa.
- IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (2021a). *Biuletyn Państwowej Służby Hydrologiczno-Meteorologicznej 2020*. 13(228), https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Biuletyn_PSHM/Biuletyn_PSHM_2020_ROCZNY.pdf (dostęp: 8.02.2022).
- IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (2021b). *Klimat Polski 2020*. <https://www.imgw.pl/sites/default/files/2021-04/imgw-pib-klimat-polski-2020-opracowanie-final-rozkladowki-min.pdf> (dostęp: 8.02.2022).
- IMGW-PIB – Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy (2021c). *Rocznik hydrologiczny 2020*. https://danepubliczne.imgw.pl/data/dane_pomiarowo_obserwacyjne/Roczniki/Rocznik%20hydrologiczny/Rocznik%20Hydrologiczny%202020.pdf (dostęp: 8.02.2022)
- KBW – Katedra Budownictwa Wodnego SGGW (1963). *Studia hydrologiczne w dorzeczu rzeki Zagożdżonki*, Warszawa.
- Krajewski, A., Sikorska-Senoner, A., Hejduk, L., Banasik, K. (2021). An attempt to decompose the impact of land use and climate change on annual runoff in a small agricultural catchment. *Water Resources Management*, 35, 881–896.
- Krajewski, A., Sikorska-Senoner, A., Ranzi, R., Banasik, K. (2019). Long-term changes of hydrological variables in a small lowland watershed in Central Poland, *Water*, 11(3).
- Kuchar, L., Szwejkowski, Z., Rychcik, B., Dragańska, E., Cymes, I. (2021). Regional climate changes in north-eastern Poland and their impact on maize crops. *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 20(1), 3–18.
- Kundzewicz, Z.W. (2017). Wielkoskalowa zmiana klimatu (obserwacje, interpretacja, projekcje). W: *Zmiany klimatu i ich wpływ na wybrane sektory w Polsce*, pod red. Kundzewicz, Z.W., Hov, Ø., Okruszko T., 14–30. <http://serwer1557491.home.pl/autoinstalator/wordpress/wp-content/uploads/2017/06/Zmiany-klimatu-i-ich-wp%C5%82yw-na-wybrane-sektory-w-Polsce.pdf> (dostęp: 8.02.2022).
- Piniewski, M., Marcinkowski, P., Kundzewicz Z.W. (2018). Trend detection in river flow indices in Poland. *Acta Geophysica*, 66, 347–360. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0116-3>.

- Pasławski, Z. (1973). *Metody hydrometrii rzecznej*. Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa.
- Sauquet, E., van Meerveld, I., Gallart, F., Sefton, C., Parry, S., Gauster, T., Laaha, G., Alves, M.H., Arnaud, P., Banasik, K., Beaufort, A., Bezdan, A., Datry, T., De Girolamo, A.M., Dörflinger, G., Elçi, A., Engeland, K., Estrany, J., Fialho, A., Fortesa, J., Hakoun, V., Karagiozova, T., Kohnova, S., Kriauciuniene, J., Morais, M., Ninov, P., Osuch, M., Reis, E., Rutkowska, A., Stubbington, R., Tzoraki, O., Żelazny M. (2020). A catalogue of European intermittent rivers and ephemeral streams, https://www.researchgate.net/publication/341150979_A_catalogue_of_European_intermittent_rivers_and_ephemeral_streams#fullTextFileContent (dostęp: 8.02.2022).
- Stachý, J. (1968). Zmniejszanie się odpływu rzek polskich w bieżącym stuleciu. *Prace PIHM*, 95.
- Stachý, J. (red.) 1986. *Atlas hydrologiczny Polski, II, 2: Metody opracowania i zestawienia liczbowe*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Stachý, J. (red.) (1987). *Atlas hydrologiczny Polski, I*. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej. Warszawa: Wydawnictwa Geologiczne.
- Stachý, J. (1990). Przepływy średnie niskie SNQ, jako miarodajna charakterystyka projektowa. *Przegląd Geofizyczny*, XXXV, 1–2.
- Węglarczyk, S. (2010). *Statystyka w Inżynierii środowiska*. Politechnika Krakowska.
- Zhengrong, D., Mingxia, N., Ya, T., Sobota, M., Jianxin, X. (2021). Impact of climate change and human activities on the sustainable development of Xinjiang Aksu Oasis (China). *Acta Sci. Pol., Formatio Circumiectus*, 20(2), 3–18.
- Zieliński, J., Słota, H., Madeja, P., Korol, R., Koniczny, R., Grela, J. (1996). *Stan i wykorzystanie zasobów wód powierzchniowych Polski*. Kraków: Materiały Badawcze IMGW.

ANALYSIS OF SELECTED HYDROLOGICAL CHARACTERISTICS OF TWO SMALL LOWLAND CATCHMENTS

ABSTRACT

Aim of the study

- Comparison of characteristic discharges (mean and mean of annual minimum, i.e. mean low discharge) of small lowland river between two periods (1963–1990 and 1991–2020) estimated on the base of field measurements.
- Comparison of specific discharges of two small catchments of various size in the period 1991–2020.
- Evaluation of local indirect methods for estimation of mean and mean low discharge applied for the two small catchments.

Material and methods

Since 1962, hydrological investigations have been conducted in a small lowland catchment of the Zagożdżonka River. The catchment area is characterized by agro-forested land use, and is located in the south part of the Masovia region, Poland. Continued monitoring of water stages and discharge measurement at the river gauge Płachty Stare were conducted for estimating daily and characteristic discharges for two periods: 1963–1990 and 1991–2020. Multiple semi-simultaneous discharges at the Płachty Stare gauge (with the catchment area of 82,4 km²) and Wygoda gauge (with the area of 9,3 km²), conducted since 1980, were a base for establishing the relationship of discharges between the river gauges. This relationship allowed to estimate daily discharges, as well as characteristic discharges and specific discharges also for the Wygoda river gauge. As indirect methods, a formulae of Iszkowski with runoff coefficient of Byczkowski were used for mean discharge estimation, and formulae of Stachý – for mean low flow estimation. Other methods were also used for both of the hydrological characteristics. They were based on maps of specific discharges from the Hydrological Atlas of Poland.

Results and conclusions

Mean discharge of the Zagożdżonka River at the gauge Płachty Stare between the two periods decreased by 24%. Mean low flow decreased by 43%. Higher evapotranspiration, caused by climate change, i.e.

temperature increase and higher ratio of forested area in the catchment, is indicated as the main reason of the changes.

Mean specific discharge from the smaller catchment (at Wygoda gauge) was $1,83 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$, i.e. 36% less than from the larger catchment ($2,85 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$). Specific mean low discharge at Wygoda gauge was only $0,011 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ (i.e. 82% less than from the larger catchment), and during seven years of the 1991–2020, few-day-dry bed periods were observed.

The application of the indirect methods for estimation of mean and mean low discharges for the larger catchment seems to give satisfactory results.

Keywords: mean discharge, mean low flow, renewable water resources, land use changes