

ZMIANY WYBRANYCH CECH REŻIMU RZEK W POLSCE W WARUNKACH OCIEPLENIA KLIMATU

Changes in selected characteristics of river regime in Poland under climate warming conditions

DARIUSZ WRZESIŃSKI¹ 

Zarys treści. Celem pracy jest przedstawienie przestrzennego i czasowego zróżnicowania stabilności i niepewności reżimu odpływu rzek w Polsce w latach 1951–2020. Na podstawie współczynnika stabilności i entropii informacji Shannona ustalono stopień regularności pojawiania się i niepewności w cyklu rocznym maksymalnych i minimalnych odpływów miesięcznych. Badania wykazały, że zmiany tych cech reżimu rzecznego w okresie ocieplenia po roku 1988 są przestrzennie zróżnicowane. Stabilność odpływu maksymalnego maleje w przypadku rzek położonych w pasie środkowej Polski oraz w rzekach we wschodniej części kraju, a wzrasta w większości rzek przybrzeżnych i pojeziernych oraz w sudeckich dopływach środkowej Odry i karpaccich dopływach Wisły po Dunajec. Termin pojawiania się odpływu maksymalnego uległ zarówno przyspieszeniu z miesięcy wiosennych na zimowo-wiosenne, jak i opóźnieniu z miesięcy zimowo-wiosennych na wiosenne oraz wiosennych na wiosenno-letnie. Stabilność odpływu minimalnego w wielu rzekach (37% przekrojów) wyraźnie wzrosła jednak bez istotnej zmiany terminu jego wystąpienia. Do zmniejszenia stabilności odpływu minimalnego i przyspieszenia terminu jego pojawiania doszło w przypadku rzek górskich oraz Odry i Wisły po Dęblin.

Słowa kluczowe: zmiana klimatu, odpływ rzeczny, współczynnik stabilność, niepewność

Abstract. The aim of this paper is to present the spatial and temporal differentiation of the stability and uncertainty of the river runoff regime in Poland in the years 1951–2020. Based on the stability coefficient and measures resulting from Shannon's information entropy theory, the degree of regularity and uncertainty in the annual cycle of maximum and minimum monthly runoff in the multi-annual period 1951–2020 was determined. The study revealed that changes in stability and uncertainty as well as the timing of the maximum and minimum runoff during the warming period after 1988 were spatially differentiated. The stability of the maximum runoff decreased in rivers in central Poland and rivers in the eastern part of the country and increased in most coastal and lake district rivers as well as the Sudeten tributaries of the middle Oder and the Carpathian tributaries of the Vistula up to the Dunajec River. The timing of the maximum runoff was both accelerated from spring to winter-spring, and delayed from winter-spring to spring and spring to spring-summer. The stability of the minimum runoff in many rivers (37% of profiles) increased significantly, but without a significant change in the date of its occurrence. The stability of the minimum runoff decreased, and the timing of its appearance was accelerated in the case of mountain rivers and the Odra and Vistula up to Dęblin.

Key words: climate change, river runoff, stability coefficient, uncertainty

Wstęp

Zmiana klimatu i zmienność warunków klimatycznych oraz działalności człowieka to istotne przyczyny transformacji warunków obiegu wody. Szczególnym zagadnieniem jest ustalenie relacji między zmiennymi hydro-meteorologicznymi w zakresie zarówno wieloletniej i sezonowej dy-

namiki odpływu rzecznego, jak i niepewności lub stabilności jego reżimu (Wrzesiński 2010, 2021). Woda i jej obieg w środowisku przyrodniczym funkcjonują w warunkach niepewności, a ustalenie jego stopnia przyczynia się do lepszego poznania i modelowania procesów hydrologicznych. Miarą stopnia niepewności jest entropia, która znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, w tym hydrologii, a ich przegląd przedstawili

¹ Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych, Instytut Geografii Fizycznej i Kształtowania Środowiska Przyrodniczego, Zakład Hydrologii i Gospodarki Wodnej; ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań; e-mail: darwrze@amu.edu.pl, ORCID: 0000-0001-5025-1447

Singh (1997) i Wrzeński (2010, 2013a). Entropię stosowano między innymi w procesie estymacji parametrów hydrologicznych (Singh 1998), analizie współczynnika odpływu (Chou 2012), optymalizacji położenia wodowskazów (Joo i in. 2019ab) i gęstości sieci pluwiometrycznej (Lee i in. 2013). Propozycję zastosowania entropii opadów atmosferycznych do ustalania potencjalnych zasobów wodnych przedstawili Kawachi i in. (2001) oraz Maruyama i in. (2005). Natomiast Barberis i in. (2003) wskazali na możliwość wykorzystania entropii do konstrukcji wskaźnika klasyfikacji reżimu rzeczno. Te propozycje metodyczne znalazły wykorzystanie w ocenie niepewności cech reżimu odpływu rzek (Wrzeński 2013b, 2016; Faiz i in. 2019). Ciekawą propozycją ustalania stabilności reżimu odpływu rzek jako stopnia regularności występowania określonej fazy reżimu odpływu (wezbrania i niżówki) w roku wyrażonej przez wybraną zmienną opisującą zaproponowali Corbus i Stanescu (1999, 2004). Takie ujęcie metodyczne zostało zastosowane we wcześniejszych analizach stabilności elementów hydro-meteorologicznych w Europie i w Polsce (Wrzeński 2010, 2013a).

Zmiana warunków klimatycznych w Polsce polega przede wszystkim na wzroście temperatury powietrza od końca lat 80. XX wieku (Fortuniak i in. 2001; Kożuchowski, Żmudzka 2001, 2002; Kożuchowski 2004a; Marsz, Styszyńska 2022) przy jednoczesnym braku istotnych zmian wysokości opadów (Żmudzka 2002; Kożuchowski 2004b). Wśród przyczyn ocieplenia wymieniane są czynniki solarne oraz cyrkulacyjne, związane z nasileniem strefowej, zachodniej cyrkulacji atmosferycznej i rozwojem nad Polską południowej składowej cyrkulacji. Za umowny termin początku tych zmian wskazuje się rok 1988 (Marsz, Styszyńska 2022; Marsz i in. 2022). Wzrost temperatury powietrza i zwiększenie parowania powoduje odmienne czasowo-przestrzennie zmiany w bilansie wodnym i w odpływie rzek w Polsce (Marsz, Styszyńska 2021; Marsz i in. 2022; Marsz i in. 2023; Wrzeński i in. 2022; Brzezińska i in. 2023; Wrzeński, Brzezińska 2023).

Celem pracy jest przedstawienie przestrzennego zróżnicowania stabilności i niepewności cech reżimu odpływu rzek w Polsce na podstawie miar wynikających z teorii entropii informacji Shannona (1948) oraz współczynnika stabilności reżimu w warunkach ocieplenia klimatu. Za moment, po którym nastąpił istotny statystycznie wzrost temperatury powietrza przyjęto rok 1988. W efekcie ustalono stopień stabilności i niepewności pojawiających się maksymalnych i minimal-

nych odpływów miesięcznych w całym wieloleciu 1951–2020, jak i w okresie przed (1951–1988) i podczas silnego wzrostu temperatury powietrza (1988–2020).

Material i metody

W pracy uwzględniono cały dostępny materiał hydrometryczny dla rzek o quasi-naturalnych warunkach odpływu. Wykorzystano dane hydrometryczne Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB, obejmujące dobowe wartości przepływów ze 145 przekrojów zlokalizowanych na 97 rzekach Polski (rys. 1; zał. 1).

Rozwiązanie postawionego problemu badawczego było możliwe dzięki zastosowaniu metod identyfikacji stabilności i niepewności odpływu zaproponowanych we wcześniejszych opracowaniach (Wrzeński 2010, 2013a, 2016). W niniejszej pracy dokonano analizy serii miesięcznych odpływów w latach 1951–2020. Stopień stabilności i niepewności reżimu odpływu określono za pomocą miar, których metodykę obliczania przedstawiono poniżej.

Współczynnik stabilności odpływu

Stabilność reżimu odpływu rzek zdefiniowano jako stopień regularności występowania określonej fazy reżimu względem maksymalnych i minimalnych odpływów w roku hydrologicznym, wyrażonej przez wybraną zmienną opisującą (Corbus, Stanescu 2004). Do charakterystyki reżimu odpływu wybrano dwie zmienne opisujące, którymi były: pierwsza maksymalna (QM_{maks} dla fazy wezbrań) i pierwsza minimalna (QM_{min} dla fazy niżówek) wartość odpływu miesięcznego w roku hydrologicznym. Stabilność określa częstość zmiennej opisującej w możliwie krótkim okresie, a współczynnik stabilności można wyrazić jako:

$$W_S = F_A \cdot C_R \quad (1)$$

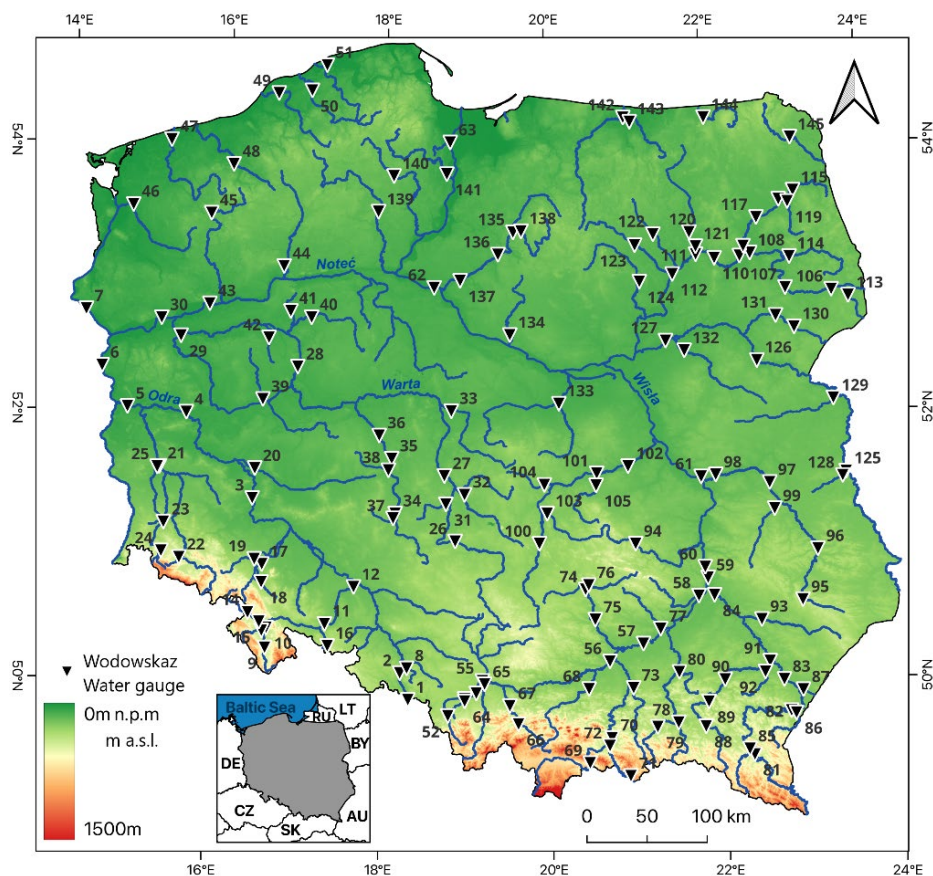
gdzie:

F_A – częstość wystąpienia wartości zmiennej opisującej (liczba wystąpień w m – kolejnych miesiącach; $m = 1, \dots, 12$ w wieloleciu);

C_R – współczynnik rozkładu w okresie wyrażonym przez:

$$C_R = \left[\frac{13-m}{12} \right] \quad (2)$$

Stąd, im częstotliwość wystąpienia danej zmiennej opisującej jest większa, a długości okresu, w którym dana wartość wystąpiła jest krótsza,



Rys. 1. Położenie przekrojów wodowskazowych na badanych rzekach w Polsce
Numeracja zgodna z Załącznikiem 1

Location of water gauges on the studied rivers in Poland
Numbering in accordance with Appendix 1

Tabela 1

Stabilność reżimu odpływu w zależności od współczynnika stabilności według Corbusa i Stanescu (2004)

Runoff regime stability depending on the stability coefficient, after Corbus and Stanescu (2004)

F_A	C_R		W_S	Charakter reżimu/ <i>Regime character</i>
	m	$C_R = f(m)$		
0,9–1,0	1–2	0,69–1,00	0,62–1,00	silnie stabilny/ <i>very stable</i>
0,8–0,9	2–3	0,56–0,69	0,45–0,62	stabilny/ <i>stable</i>
0,7–0,8	3–4	0,44–0,56	0,31–0,45	względnie stabilny/ <i>relatively stable</i>
0,6–0,7	4–5	0,34–0,44	0,20–0,31	względnie niestabilny/ <i>relatively unstable</i>
0,0–0,6	6–12	0,00–0,34	0,00–0,20	niestabilny/ <i>unstable</i>

tym reżim jest bardziej stabilny. Stopień stabilności reżimu odpływu w zależności od zakresu współczynnika stabilności przedstawia Tabela 1.

Z uwagi na fakt, iż większa liczba miesięcy (wydłużenie okresu) powoduje zmniejszenie współczynnika rozkładu C_R i wzrost częstotliwości wystąpienia zmiennej opisującej, współczynnik stabilności W_S osiąga maksymalną wartość w pewnym optymalnym układzie. Stąd okresy, które

charakteryzują określoną fazę reżimu odpływu zostały wybrane na podstawie maksymalizowania wartości współczynnika W_S . W celu maksymalizacji współczynnika stabilności każdej zmiennej opisującej dokonano analizy okresów ich występowania o długościach od jedno- (XI, XII, ..., X) do sześciomiesięcznych (XI–IV, XII–V, ..., V–X), a zatem łącznie przeanalizowano 72 warianty czasów trwania okresów.

Entropia odpływu

Entropię informacji zastosowano do ustalenia niepewności występowania maksymalnego i minimalnego miesięcznego odpływu w roku hydrologicznym. Entropię maksymalnych (E_{\max}) i minimalnych (E_{\min}) odpływów zidentyfikowano, wybierając miesiąc, w którym wystąpił maksymalny lub minimalny odpływ w każdym roku analizowanego wielolecia, a następnie obliczono prawdopodobieństwo ich wystąpienia w określonym miesiącu ze wzoru:

$$p_{\max_i} \text{ lub } p_{\min_i} = \frac{s_i}{N} \quad i=1, 2, \dots, 12 \quad (3)$$

gdzie:

s_i – liczba wystąpień maksymalnego lub minimalnego odpływu w i -tym miesiącu;

N – liczba lat obserwacji.

Niepewność maksymalnego lub minimalnego miesięcznego odpływu obliczono przy pomocy entropii informacji ze wzorów:

$$E_{\max} = - \sum_{i=1}^{12} p_{\max_i} \log_2 p_{\max_i} \quad (4)$$

$$E_{\min} = - \sum_{i=1}^{12} p_{\min_i} \log_2 p_{\min_i} \quad (5)$$

Entropia wyrażająca stopień niepewności danej cechy reżimu, to jest maksymalnego lub minimalnego miesięcznego odpływu, może przyjmować wartości od 0% do 100%. Jeśli analizowane zmienne występują tylko w jednym i tym samym miesiącu w całym wieloleciu, entropia osiąga najniższą wartość równą zero. Niska entropia oznacza dużą stabilność terminu występowania danej cechy reżimu. Do wzrostu entropii i niestabilności terminu maksymalnego lub minimalnego odpływu dochodzi wraz z wyrównywaniem częstości występowania ekstremalnych odpływów w poszczególnych miesiącach roku. Najwyższa entropia (E_{\max} lub E_{\min}) osiągana jest, gdy odpowiednio maksymalne lub minimalne miesięczne odpływy występują w kolejnych miesiącach roku z jednakowym prawdopodobieństwem. Entropia może być traktowana jako estymator niepewności i niestabilności cech reżimu odpływu i wyrażona miesiącem, w którym występuje maksymalny lub minimalny miesięczny odpływ.

Współczynniki stabilności i miary niepewności badanych zmiennych obliczono dla wielolecia 1951–2020 oraz dla dwóch podokresów obejmujących lata bez istotnych zmian temperatury po-

wietrza (1951–1988) i lata z jej istotnym trendem rosnącym (1988–2020). Zgodnie z sugestią Marsza i in. (2022), rok 1988 arbitralnie przyjęto za moment oddzielający oba podokresy, przy czym przyjęto go jako ostatni rok pierwszego podokresu i pierwszy rok drugiego podokresu. Pozwoliło to na ocenę zmian wielkości oraz terminu występowania zmiennych opisujących reżim odpływu, a także na analizę ich przestrzennego zróżnicowania w warunkach przeciętnych, jak i w latach przed i po rozpoczęciu ocieplenia klimatu.

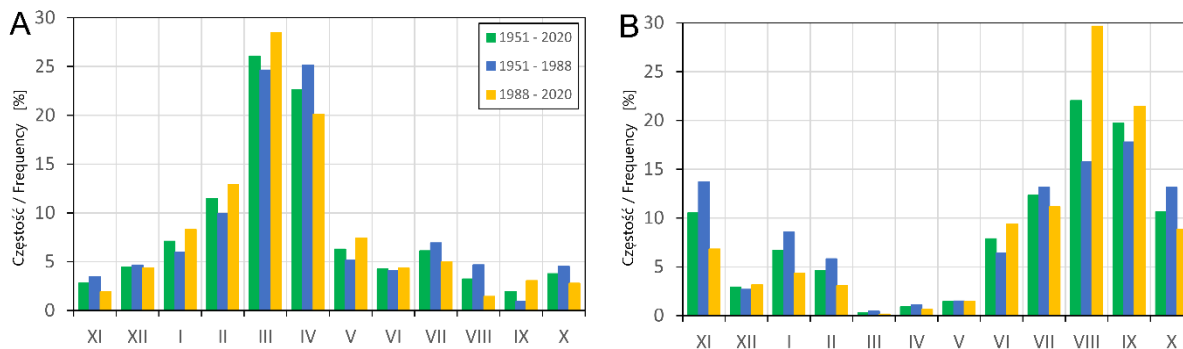
W matematyczno-statystycznym opracowaniu danych źródłowych wykorzystano procedury zawarte w programie Excel firmy Microsoft. Natomiast przy realizacji strony graficznej skorzystano z programów: Surfer 13 i CorelDRAW 12. Przy konstrukcji map izolinowych zastosowano procedurę krigingu z wykorzystaniem wartości interpolowanych zmiennych z badanych przekrojów wodowskazowych.

Wyniki

Po roku 1988 wyraźnie zmieniła się częstość pojawiania się w poszczególnych miesiącach zarówno maksymalnych, jak i minimalnych odpływów (rys. 2). Maksymalne odpływy występowały częściej w miesiącach zimowych (I, II), a ich największa frekwencja przesunęła się z kwietnia na marzec. Do jeszcze większych zmian doszło w okresie ocieplenia w zakresie frekwencji minimalnych odpływów (rys. 2B). Wyraźnie zmniejszyła się częstość pojawiania tej fazy reżimu w półroczu chłodnym (X–II), a wzrosła w miesiącach letnio-jesiennych (VIII–IX). Czy i w jakim stopniu stwierdzone zmiany modyfikują cechy reżimu odpływu rzek w Polsce ustalono poprzez czasowo-przestrzenną analizę miar stabilności i niepewności badanych charakterystyk hydrologicznych.

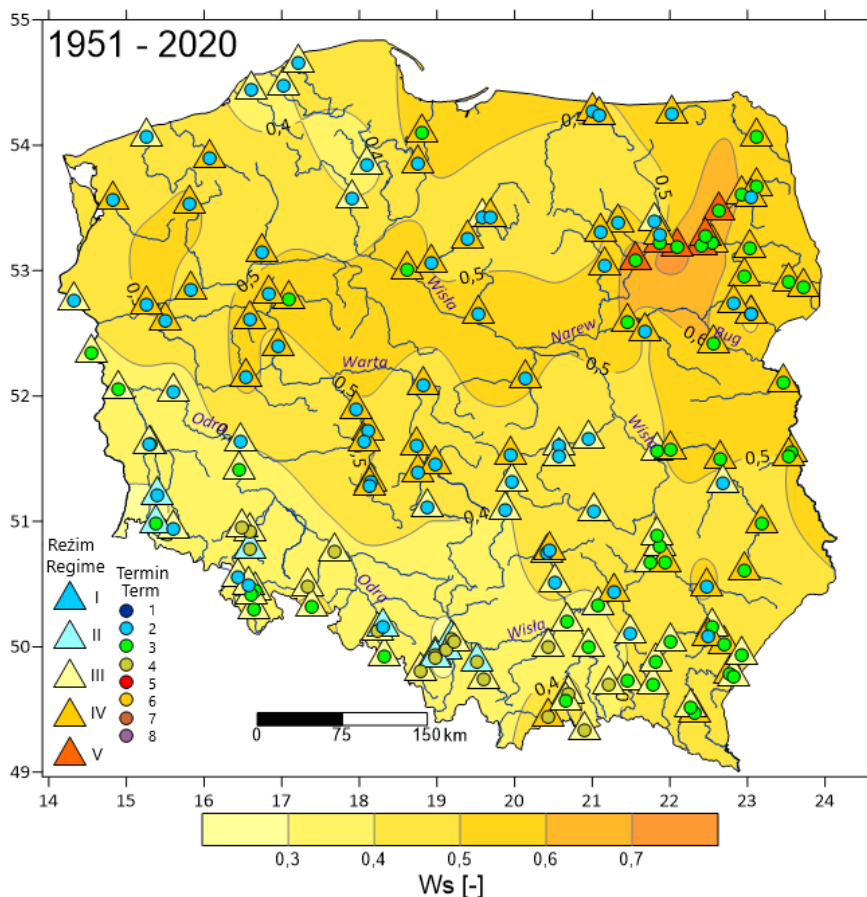
Stabilność odpływu

Współczynnik stabilności pojawiania się fazy wezbrań, wyrażonej pierwszym maksymalnym miesięcznym odpływem w roku, waha się znacznie od 0,27 do 0,71 i wykazuje dość charakterystyczne przestrzenne zróżnicowanie, uwarunkowane zarówno cechami klimatycznymi, jak i hydrologicznymi. Stabilny termin fazy wezbrań (QM_{\max}), przypadający na okres zimowo-wiosenny (II–IV) lub wiosenny (III–IV) obserwowany jest w większości rzek środkowej, północno-wschodniej i wschodniej części kraju. Po-



Rys. 2. Częstość występowania maksymalnego (A) i minimalnego (B) odpływu miesięcznego w badanych wieloletniach

Frequency of occurrence of the maximum (A) and minimum (B) monthly runoff in the studied multi-annual periods



Rys. 3. Stabilność maksymalnych odpływów miesięcznych w latach 1951–2020

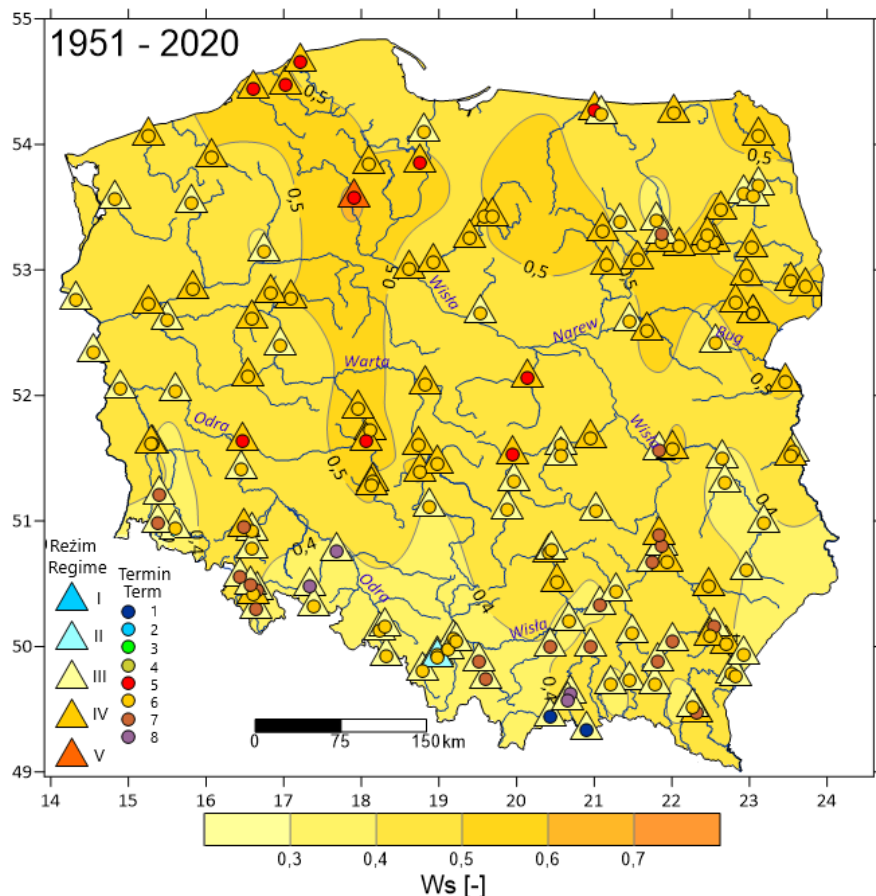
Ws – współczynnik stabilności; charakter reżimu: I – niestabilny, II – względnie niestabilny, III – względnie stabilny, IV – stabilny, V – silnie stabilny; termin wystąpienia: 1 – zima, 2 – zima-wiosna, 3 – wiosna, 4 – wiosna-lato, 5 – lato, 6 – lato-jesień, 7 – jesień, 8 – jesień-zima

Stability of the maximum monthly runoff in 1951–2020

Ws – stability coefficient; regime character: I – unstable, II – relatively unstable, III – relatively stable, IV – stable, V – very stable; term of occurrence: 1 – winter, 2 – winter-spring, 3 – spring, 4 – spring-summer, 5 – summer, 6 – summer-autumn, 7 – autumn, 8 – autumn-winter

łożone są one w zlewni Warty oraz w dorzeczu środkowej Wisły (rys. 3). Najbardziej regularnym występowaniem QM_{maks} w okresie wiosennym (III–IV) i silnie stabilnym charakterem reżimu wyróżnia się środkowa Biebrza i Narew. Wzrost stabilności pojawiania się fazy wezbrań na Wiśle w Tczewie w okresie III–IV związany jest z wcześniejszym przyjęciem wód Narwi z Biebrzą i Bugiem, charakteryzujących się silnie stabilnym i stabilnym charakterem tej fazy reżimu odpływu.

Rzeki pozostałych regionów kraju wyróżniają zazwyczaj względnie stabilny charakter reżimu odpływu maksymalnego. W półroczu zimowym QM_{maks} obserwowany jest w rzekach Przymorza (XII–III) i w rzekach pojeziernych: Brdzie (I–III), Wdzie (XII–III) oraz Drwęcy i Pisie (II–IV). Taki charakter reżimu posiada także większość rzek w górnej i środkowej części dorzecza Odry, górnej Wisły oraz Wyżyny Śląsko-Krakowskiej i Małopolskiej. Termin pojawiania QM_{maks} w tych rze-

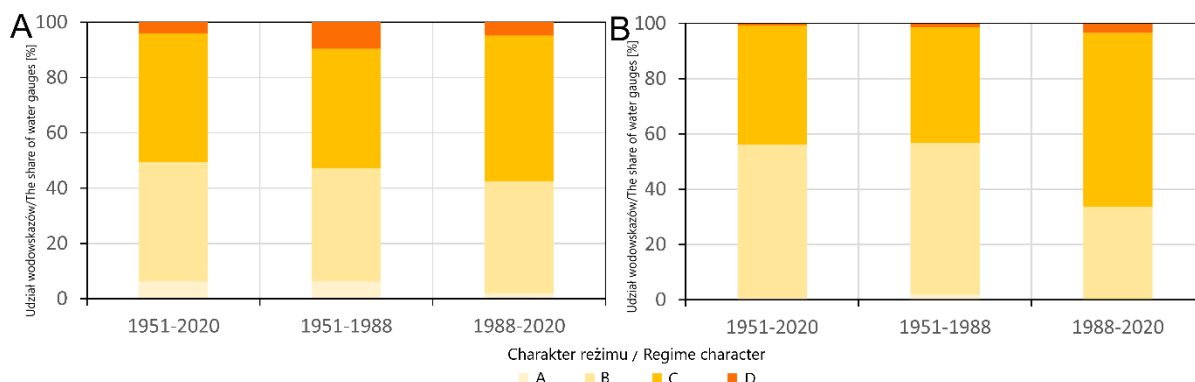


Rys. 4. Stabilność minimalnych odpływów miesięcznych w latach 1951–2020
Objaśnienia jak na Rysunku 3

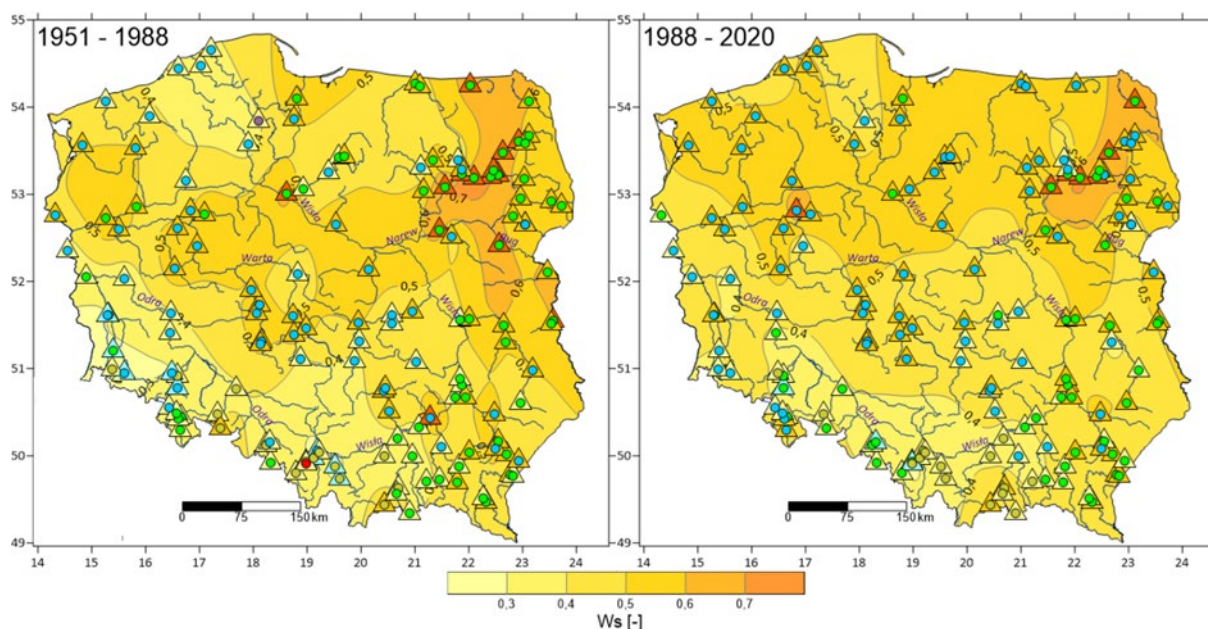
Stability of the minimum monthly runoff in 1951–2020
Explanations as in Figure 3

kach jest silnie zróżnicowany od zimowo-wiosennego przez wiosenny po wiosenno-letni, spotykany najczęściej w rzekach górskich (IV–VII). Najmniej regularny termin QM_{maks} (typ względnie niestabilny) może świadczyć o ingerencji człowieka w obieg wody. Obserwowany jest on w rzekach dorzecza Wisły, na przykład w Wiśle między Goczałkowicami i Nowym Bieruniem (III–VII), w rzekach Pogórza Śląskiego i w Skawie (III–VII), a w dorzeczu Odry w Piławie, Czarnym Potoku (III–VI) i Kwisie (I–III).

Regularność pojawiania się fazy niżówek w polskich rzekach wyrażona pierwszym minimalnym odpływem miesięcznym (QM_{min}) jest znacznie mniejsza niż wezbrań i waha się od 0,30 do 0,63. W większości rzek termin pojawiania się QM_{min} ma charakter względnie stabilny (54% wódowskazów) lub stabilny (44%). Rzeki pierwszej kategorii stabilności reżimu dominują w południowej części kraju, a termin wystąpienia w nich QM_{min} jest bardzo zróżnicowany (rys. 4). Najczęściej przypada na okres letnio-jesienny (VIII–



Rys. 5. Udział wodowskazów zlokalizowanych na rzekach reprezentujących analizowane kategorie stabilności reżimu odpływu maksymalnego (A) i minimalnego (B) w badanych wieloletniach
 Charakter reżimu: A – względnie niestabilny, B – względnie stabilny, C – stabilny, D – silnie stabilny
 Share of water gauges located on rivers representing the analysed categories of stability of the maximum (A) and minimum (B) runoff regime in the studied multi-annual periods
 Regime character: A – relatively unstable, B – relatively stable, C – stable, D – very stable



Rys. 6. Stabilność maksymalnych odpływów miesięcznych w badanych wieloletniach
 Legenda i objaśnienia jak na Rysunku 3
 Stability of maximum monthly runoff in the studied multi-annual periods
 Explanations as in Figure 3

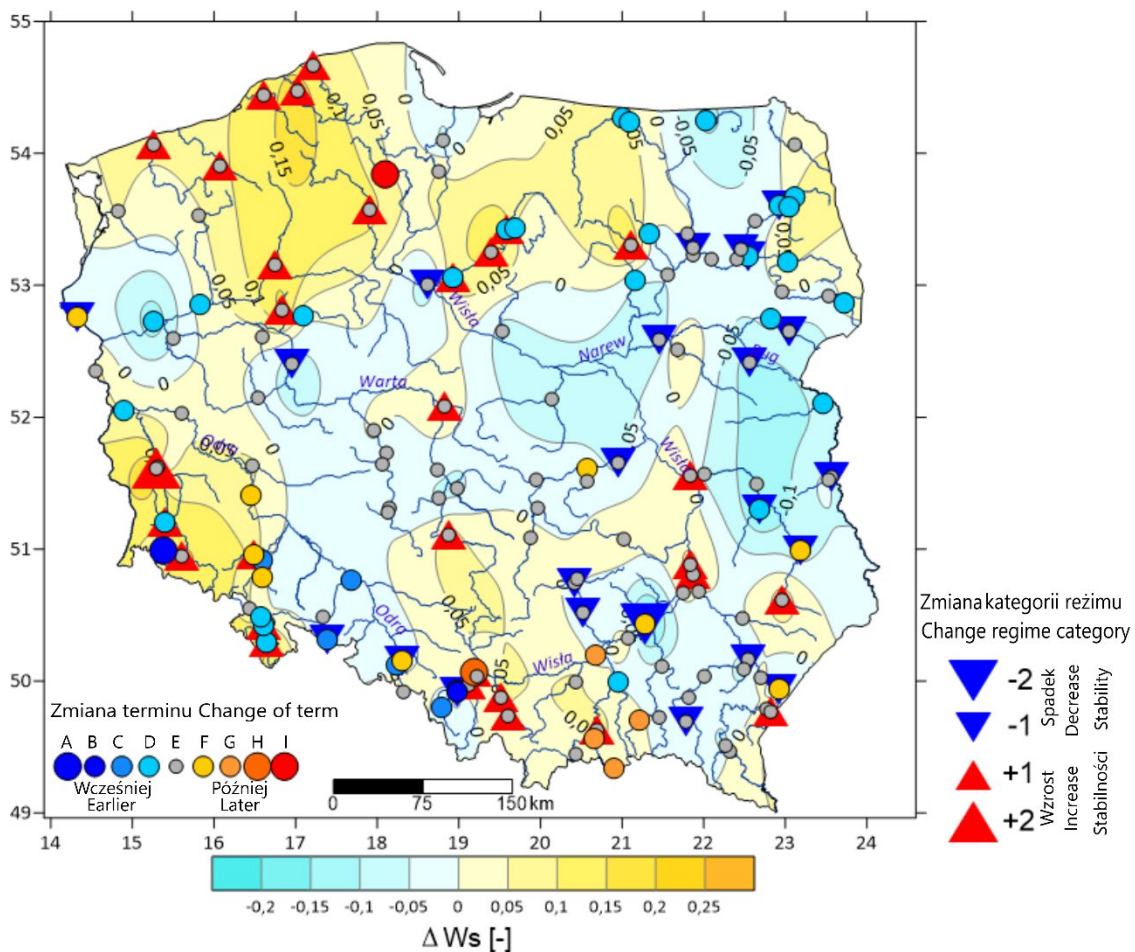
–X) i jesienny (IX–XI). W nielicznych przypadkach, na przykład w dolnym biegu Nysy Kłodzkiej i w środkowym biegu Dunajca z Popradem, pojawia się w okresie jesienno-zimowym (X–I) lub zimowym (XII–II), jak to ma miejsce w górnym biegu Dunajca.

Stabilność fazy niżówek rzek środkowej i północnej Polski jest większa. Wyjątek stanowią rzeki tranzytowe – środkowa i dolna Odra, Wisła i Warta oraz niektóre rzeki wyżynne i pojezierne. Stabilny termin QM_{min} przypada zazwyczaj na

okres letnio-jesienny (VII–IX). Natomiast letnim terminem (VI–VIII) wyróżniają się pojedyncze rzeki środkowej Polski, jak Barycz, Ołobok, Rawka i Wolbórka oraz rzeki przymorskie (Wieprza, Słupia i Łupawa), a także Wierzyca i Łyna. Silnie stabilny termin pojawiania się QM_{min} charakterystyczny jest tylko dla Brdy (VI–VIII). Względnie niestabilne minima występują zazwyczaj w rzekach o zaburzonym rytmie odpływu, jak Iłownicy, na której termin QM_{min} przypada na okres letnio-jesienny (VI–IX).

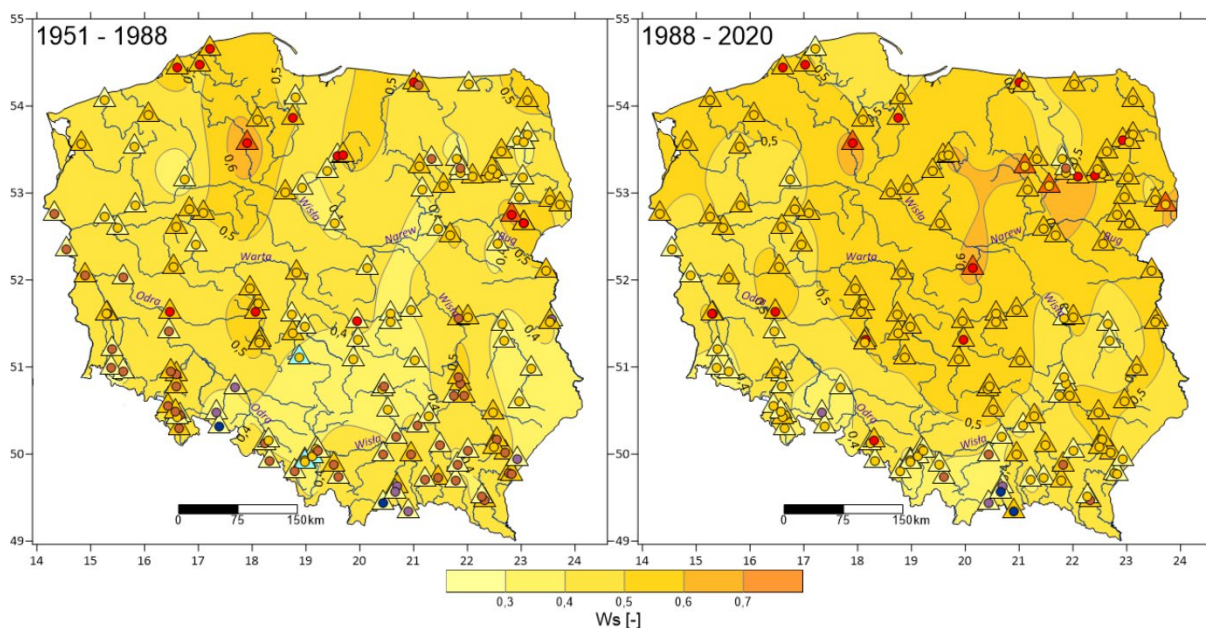
W okresie ocieplenia (po 1988 roku) przeciętna wartość współczynnika stabilności odpływów maksymalnych wszystkich badanych rzek nieznacznie wzrosła. Nie zmieniła się też istotnie liczba rzek reprezentujących poszczególne kategorie stabilności reżimu, przy czym zmniejszyła się liczba rzek o reżimie silnie stabilnym, a wzrosła o reżimie stabilnym (rys. 5A). Większe zmiany dotyczą stabilności odpływów minimalnych. Wyraźnie wzrosła przeciętna wartość współczynnika stabilności, a udział wodowskazów zlokalizowanych na rzekach reprezentujących silnie stabilny i stabilny charakter reżimu zwiększyła się o ponad 20% (rys. 5B).

Zmiany współczynnika stabilności oraz terminu pojawiania się odpływu maksymalnego i minimalnego w okresie ocieplenia są jednak silnie zróżnicowane przestrzennie (rys. 6–9). W latach 1988–2020 stabilność odpływu maksymalnego zmalała głównie w rzekach położonych w pasie środkowej Polski oraz rzekach wschodniej części kraju (rys. 6–7). Największy spadek stabilności QM_{maks} zaobserwowano w środkowym i dolnym biegu Warty oraz w zlewni Narwi, zwłaszcza Biebrzy i Bugu. Natomiast wzrost stabilności QM_{maks} stwierdzono w przypadku większości rzek przy morskich i pojeziernych oraz sudeckich dopływów środkowej Odry i karpaccich dopływów Wi-



Rys. 7. Zmiana stabilności maksymalnych przepływów miesięcznych (ΔW_s) w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 względem okresu 1951–1988 wraz ze zmianą kategorii reżimu i terminu wystąpienia QM_{maks}
 A – wiosna-lato → zima/wiosna, B – lato → wiosna-lato, C – wiosna-lato → wiosna, D – wiosna → zima-wiosna, E – bez zmian, F – zima-wiosna → wiosna, G – wiosna → wiosna-lato, H – zima-wiosna → wiosna-lato, I – jesień-zima → zima-wiosna

Change in stability of maximum monthly runoff (ΔW_s) during the warming period in 1988–2020 compared to the period 1951–1988 with a change in the regime category and the date of occurrence of QM_{maks}
 A – spring-summer → winter-spring, B – summer → spring-summer, C – spring-summer → spring, D – spring → winter-spring, E – no changes, F – winter-spring → spring, G – spring → spring-summer, H – winter-spring → spring-summer, I – autumn-winter → winter-spring



Rys. 8. Stabilność minimalnych odpływów miesięcznych w badanych wieloletniach

Legenda i objaśnienia jak na Rysunku 3

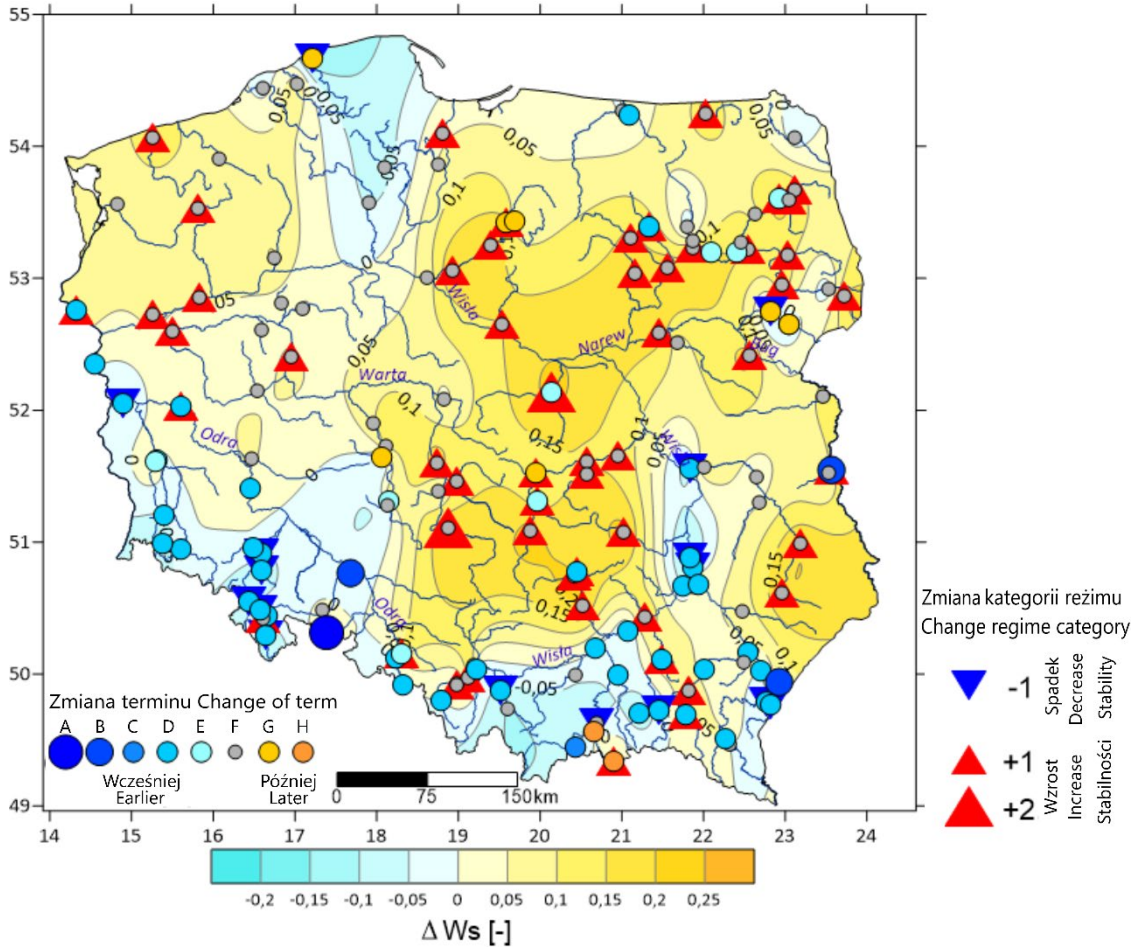
Stability of minimum monthly runoff in the studied multi-annual periods

Explanations as in Figure 3

sły po Dunajec. Relatywnie niewielkie zmiany współczynnika stabilności są na tyle istotne, że w 17% wodowskazów kategoria stabilności reżimu (QM_{maks}) obniżyła się, a w 21% wodowskazów wzrosła. Stwierdzono także zmianę terminu pojawiania się maksymalnego odpływu miesięcznego. W prawie 25% wodowskazów uległ on przyspieszeniu, zazwyczaj z miesięcy wiosennych na zimowo-wiosenne. Taką prawidłowość wykazała dolna Warta i Noteć oraz rzeki w północno-wschodniej części kraju, na przykład: Drwęca, Łyna, Guber, Gołdapa, Bystrzyca, niektóre dopływy Narwi i Bugu (Biebrza, Supraśl, Nurzec i Krzna) oraz górna Nysa Kłodzka i Kwisa. Z kolei w dolnej Nysie Kłodzkiej, Białej Głuchołaskiej i Wiśle po Goczałkowice termin pojawiania się QM_{maks} uległ przesunięciu z miesięcy wiosenno-letnich na wiosenne. Natomiast w przypadku 11% wodowskazów termin QM_{maks} wystąpił później i przesunął się z miesięcy zimowo-wiosennych na wiosenne (na przykład Strzegomka i Piława w zlewni Bystrzycy oraz Pilica – Nowe Miasto i Wieprz – Krasnystaw) i wiosennych na wiosenno-letnie (Wisła po Jagodniki, Poprad i Ropa).

Stabilność odpływu minimalnego w polskich rzekach jest mniejsza niż odpływu maksy-

malnego, jednak w okresie ocieplenia w wielu rzekach (37% wodowskazów) doszło do jego wyraźnego wzrostu, co skutkowało zmianą kategorii typu reżimu na bardziej stabilny. Wyjątek stanowią rzeki górskie, w których stabilność odpływu minimalnego zmniejszyła się, a w 11% przekrojów badanych rzek doszło do zmiany kategorii reżimu na mniej stabilny. Dotyczy to Odry po Połęczko, Bystrzycy, rzek w zlewni górnej Nysy Kłodzkiej (Bystrzyca Dusznicka, Ścinawka) oraz Wisły po Dęblin i niektórych jej karpacczych dopływów – Skawy, Dunajca, Wisłoki i górnego Sanu. Co ciekawe, wzrost stabilności odpływu minimalnego rzek środkowej i północnej części kraju nie wywołał istotnych zmian terminu jego wystąpienia. Natomiast spadek stabilności rzek na południu wiąże się z istotną zmianą terminu pojawiania się odpływu minimalnego. Uległ on zazwyczaj (29% przekrojów) przyspieszeniu z okresu jesienno-letniego na letnio-jesienno, co zaobserwowano w całym biegu Odry i w jej sudeckich dopływach oraz w Wiśle po Dęblin i większości jej karpacczych dopływów. Wyjątkiem jest Poprad, w którym stabilność minimalnego odpływu wzrosła, a termin jego pojawiania opóźnił z jesienno-zimowego na zimowy.



Rys. 9. Zmiana stabilności minimalnych odpływów miesięcznych (ΔWs) w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 względem okresu 1951–1988 wraz ze zmianą kategorii reżimu i terminu wystąpienia QM_{min}
 A – zima → lato-jesień, B – jesień-zima → lato-jesień, C – zima → jesień-zima, D – jesień → lato-jesień,
 E – lato-jesień → lato, F – bez zmian, G – lato → lato-jesień, H – jesień-zima → zima

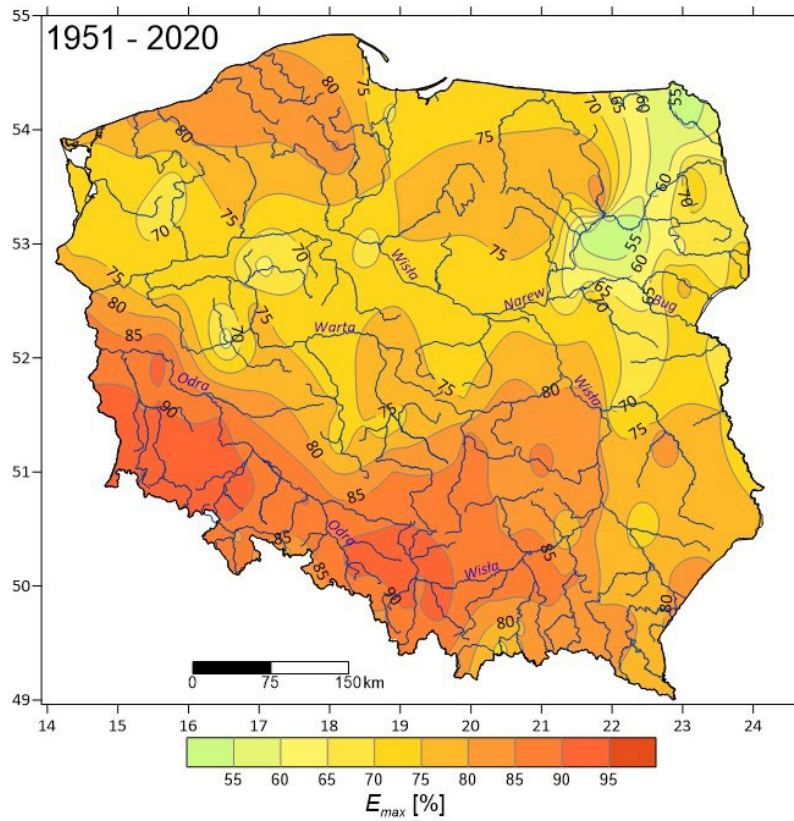
Change in stability of minimum monthly runoff (ΔWs) during the warming period in 1988–2020 compared to the period 1951–1988 with a change in the regime category and the date of occurrence of QM_{min}
 A – winter → summer-autumn, B – autumn-winter → summer-autumn, C – winter → autumn-winter,
 D – autumn → summer-autumn, E – summer-autumn → summer, F – no changes, G – summer → summer-autumn,
 H – autumn-winter → winter

Niepewność odpływu

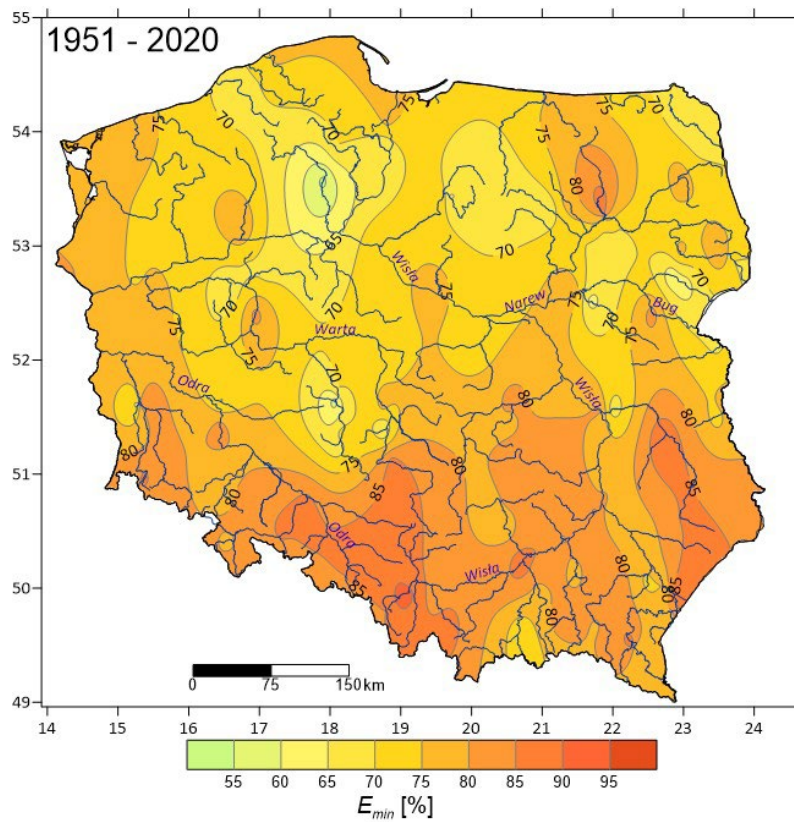
Przestrzenne zróżnicowanie entropii maksymalnego odpływu miesięcznego wyraźnie nawiązuje do rozkładu współczynnika stabilności, przy czym zależności między tymi miarami są odwrotnie proporcjonalne (por. rys. 3 i 10). Niską entropią i niepewnością, a zatem największą stabilnością odpływu maksymalnego wyróżniają się rzeki w pasie niżu Polskiego ($60\% < E_{max} \leq 75\%$), zwłaszcza te położone w jego części północno-wschodniej ($50\% < E_{max} \leq 70\%$), gdzie najbardziej stabilny, $E_{max} < 60\%$, jest odpływ maksymalny środkowej Biebrzy i Narwi oraz Czarnej Hańczy. Regularność wystąpienia maksymalnego odpływu mie-

sięcnego jest wyraźnie mniejsza ($E_{max} > 80\%$) w rzekach Przymorza, górnej i środkowej Odry, górnej Wisły, Warty i Pilicy. Najmniejszą stabilnością tej cechy reżimu odpływu ($E_{max} > 90\%$) charakteryzują się rzeki sudeckie w zlewni Bystrzycy i Bobru oraz górna Wisła między Goczałkowicami i ujściem Skawy oraz sama Skawa. Może to być związane z przeobrażeniem naturalnych cech reżimu odpływu wywołanym działalnością człowieka.

Entropia minimalnych odpływów miesięcznych osiąga wartości od 53,7% do 91,7% i wykazuje również silne zróżnicowanie przestrzenne, jak entropia odpływów maksymalnych. Średnie wartości E_{min} i E_{max} także są podobne (odpowiednio



Rys. 10. Entropia maksymalnych odpływów miesięcznych w latach 1951–2020
Entropy of maximum monthly runoff in 1951–2020

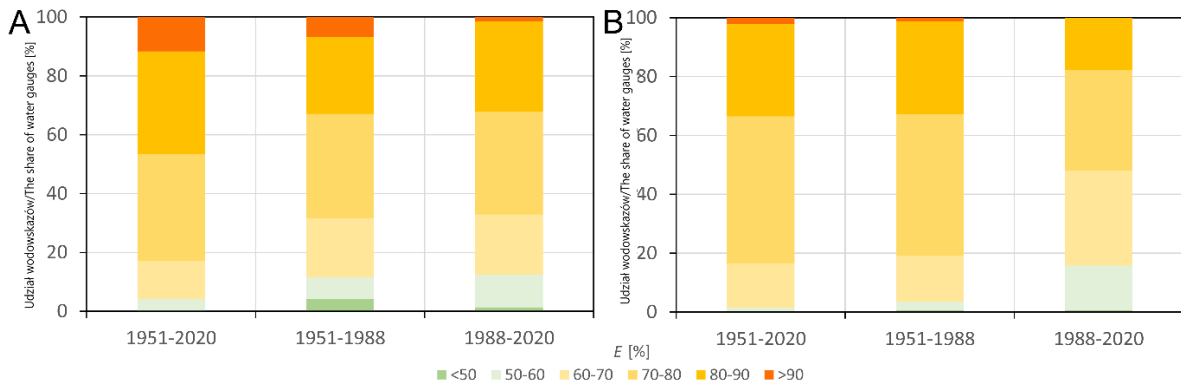


Rys. 11. Entropia minimalnych odpływów miesięcznych w latach 1951–2020
Entropy of minimum monthly runoff in 1951–2020

77,0% i 78,2%), co wskazuje na niewielką stabilność obu cech reżimu odpływu rzek w Polsce. Najbardziej regularnym terminem występowania minimalnego miesięcznego odpływu charakteryzuje się Brda, dla której obliczona entropia jest najniższa ($E_{\min} < 55\%$) (rys. 11). Przeciętną stabilnością tej cechy reżimu ($55\% < E_{\min} \leq 75\%$) charakteryzuje się wiele rzek rozproszonych w centralnej i północnej części kraju, niektóre rzeki Przymorza (Parseta, Wieprza, Słupia) oraz większość rzek pojeziernych z wyjątkiem Pisy. Wyraźnie większą niepewnością i niestabilnym terminem wystąpienia minimalnego odpływu miesięcznego ($E_{\min} > 80\%$) charakteryzują się duże rzeki – Wisła po Zawichost, Odra po Ścinawę, Bug po Frankopol, a także Wieprz po Lubartów, Pilica

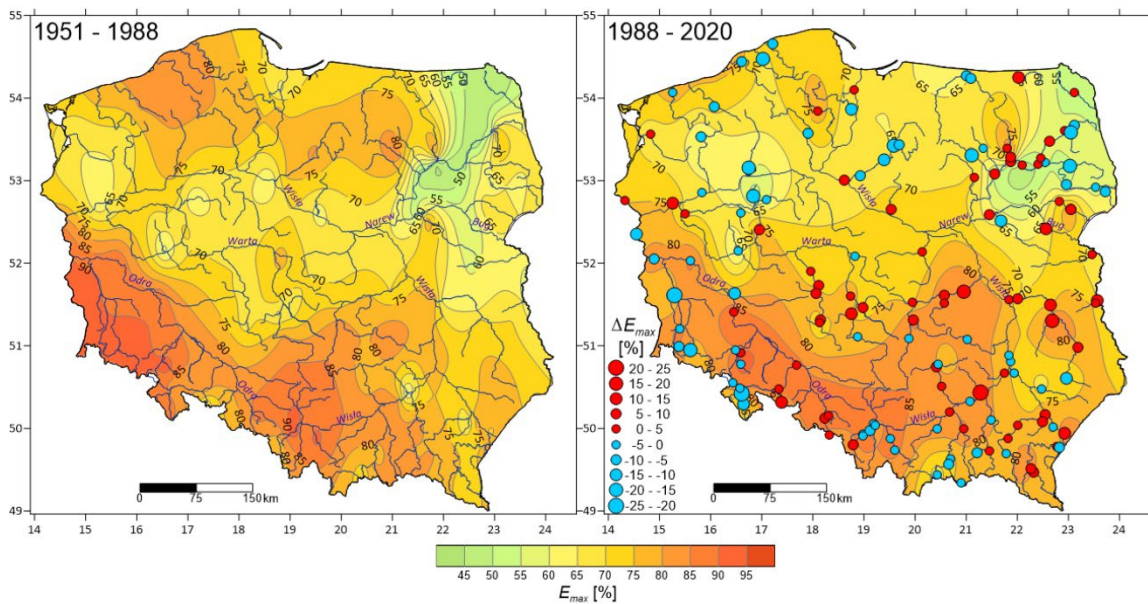
oraz większość sudeckich dopływów Odry i karpackich Wisły, z wyjątkiem Dunajca z Popradem.

Podobnie jak w przypadku współczynnika stabilności, zmiany entropii odpływów maksymalnych i minimalnych w okresie ocieplenia (1988–2020) mają odmienny charakter. Przeciętna niepewność odpływu maksymalnego nie zmieniła się, natomiast w odniesieniu do odpływu minimalnego wyraźnie zmalała, co wskazuje na jego większą stabilizację. W konsekwencji nie zmieniły się udziały wodowskazów reprezentujących rzeki w poszczególnych kategoriach entropii odpływów maksymalnych (rys. 12A), natomiast wzrósł ich udział w kategoriach najniższych wartości entropii odpływów minimalnych (rys. 12B).



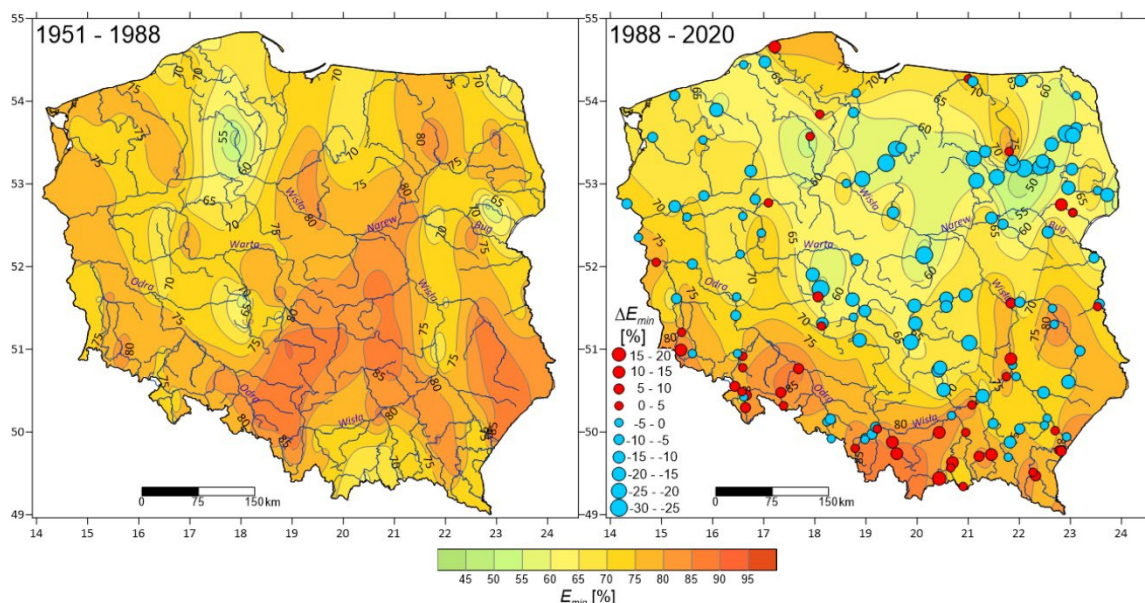
Rys. 12. Udział wodowskazów zlokalizowanych na rzekach reprezentujących analizowane kategorie entropii odpływu maksymalnego (A) i minimalnego (B) w badanych wieloletniach

Share of water gauges located on rivers representing the analysed categories of the maximum (A) and minimum (B) runoff entropy in the examined multi-annual periods



Rys. 13. Entropia maksymalnych odpływów miesięcznych w badanych wieloletniach oraz jej zmiana w okresie ocieplenia (1988–2020)

Entropy of the maximum monthly runoff in the studied multi-annual periods and its change during the warming period (1988–2020)



Rys. 14. Entropia minimalnych odpływów miesięcznych w badanych wieloletniach oraz jej zmiana w okresie ocieplenia (1988–2020)

Entropy of the minimum monthly runoff in the studied multi-annual periods and its change during the warming period (1988–2020)

Przy stosunkowo niewielkich zmianach przeciętnych wartości entropii wszystkich rzek zmiany niepewności zarówno odpływu maksymalnego, jak i minimalnego w okresie ocieplenia są silnie zróżnicowane przestrzennie (rys. 13, 14). W latach 1988–2020 niepewność odpływu maksymalnego zmalała w wielu regionach Polski. Dotyczy to zarówno rzek Przymorza i większości rzek pojezierzy, ale także, choć w mniejszym stopniu, rzek górskich – sudeckich dopływów środkowej Odry i karpackich dopływów górnej Wisły oraz pojedynczych rzek wyżynnych, takich jak górna Warta, Pilica, Kamienna, Wieprz i Tanew (rys. 13). Można też dostrzec brak prawidłowości w rozkładzie przestrzennym rzek wykazujących mniejszą regularność pojawiania się odpływu maksymalnego, związanego ze zwiększeniem entropii. Relatywnie większą niepewność odpływu maksymalnego stwierdzono w przypadku większości rzek wyżynnych, dopływów dolnej Odry, środkowego i dolnego biegu Narwi, Warty i Wisły oraz w całym biegu Bugu. W przypadku zmian niepewności odpływu minimalnego zauważalna jest prawidłowość w ich rozkładzie przestrzennym. Zdecydowana większość badanych rzek wykazała zmniejszenie niepewności odpływu minimalnego (rys. 14). Dotyczy to głównie rzek środkowej i północnej Polski. Natomiast bardziej nieregularne pojawianie się odpływu minimalnego związane ze wzrostem entropii stwierdzono w rzekach górskich. Taką prawidłowość odnotowano

w przypadku większości sudeckich dopływów środkowej Odry, karpackich dopływów Wisły po Wisłokę, górnego Sanu oraz środkowej Wisły.

Dyskusja i wnioski

Obserwowana od końca lat 80. XX wieku zmiana klimatu w Polsce polegająca na istotnym wzroście temperatury powietrza prowadzi do zmiany sposobu zasilania rzek oraz wielkości i rozkładu odpływu w cyklu rocznym. W pracy przedstawiono przestrzenne zróżnicowanie stabilności i niepewności maksymalnego i minimalnego miesięcznego odpływu rzek w Polsce w latach 1951–2020 oraz ich zmiany w okresie ocieplenia (1988–2020).

Badania wykazały, że zmiany stabilności i niepewności oraz terminu pojawiania się odpływu maksymalnego i minimalnego w okresie ocieplenia są silnie zróżnicowane przestrzennie. Stabilność odpływu maksymalnego maleje w przypadku rzek pasa nizinnej Polski oraz rzek we wschodniej części kraju, a wzrasta w przypadku większości rzek przymorskich i pojeziernych oraz sudeckich dopływów środkowej Odry i karpackich dopływów Wisły po Dunajec. Potwierdzają to wyniki zmian entropii odpływu maksymalnego, którego niepewność wystąpienia w przypadku pierwszej grupy rzek wzrasta, a w drugiej – maleje. Zmiany stabilności są na tyle istotne, że w 17% przekrojów stwierdzono zmianę

kategorię reżimu w kierunku mniejszej, a w 21% w kierunku większej stabilności odpływu maksymalnego. Termin pojawiania się odpływu maksymalnego w przypadku 25% wodowskazów uległ przyspieszeniu z miesięcy wiosennych na zimowo-wiosenne, a w 11% opóźnieniu z miesięcy zimowo-wiosennych na wiosenne lub wiosennych na wiosenno-letnie. Stabilność odpływu minimalnego wielu rzek w okresie ocieplenia (37% wodowskazów), z wyjątkiem rzek górskich, wyraźnie wzrosła. Zmianę kategorii reżimu w kierunku mniej stabilnego zidentyfikowano w grupie 11% przekrojów. Wzrost stabilności odpływu minimalnego rzek środkowej i północnej części kraju nie wywołał istotnych zmian terminu jego wystąpienia. Natomiast spadek stabilności rzek na południu wiąże się z istotną zmianą terminu pojawiania się odpływu minimalnego, który uległ przyspieszeniu z okresu jesiennego na letnio-jesienny. Zaobserwowano to w całym biegu Odry i w jej sudeckich dopływach oraz w Wiśle po Dęblin i większości jej karpaccich dopływów. Wyjątkiem jest Poprad, w którym stabilność minimalnego odpływu wzrosła, a termin jego pojawiania opóźnił się z jesienno-zimowego na zimowy.

Zastosowane w pracy miary stabilności i niepewności charakteryzujące fazę wysokich i niskich odpływów, choć uzyskane poprzez zastosowanie różnych podejść metodycznych, w analizie przestrzennej dają podobne wyniki. Zarówno współczynnik stabilności, jak i entropia dobrze informują o regularności pojawiania się maksymalnego i minimalnego odpływu w cyklu rocznym. Niewątpliwą zaletą stosowania współczynnika stabilności jest możliwość ustalenia terminu pojawiania się odpływu maksymalnego i minimalnego, co poszerza obszar analizy i interpretację wyników badań (Wrzeński 2013a).

Wzrost frekwencji pojawiania się odpływu maksymalnego i jej spadek w odniesieniu do odpływu minimalnego w chłodnej porze roku wynikają głównie ze zmian warunków termicznych zim. W czasie cieplejszych zim częściej dochodzi do odwilży śródzimowych i zmiany charakteru opadów ze śnieżnych na deszczowe. Prowadzi to do zwiększenia udziału zimowego odpływu w rocznym (Brzezińska, Wrzeński 2023; Wrzeński, Brzezińska 2023). Zmiany w cieplej porze roku dotyczą głównie odpływów minimalnych, których frekwencja wyraźnie wzrosła. Wzrost temperatury powietrza i strat na parowanie zmniejsza odpływ rzeczny, a zwiększa prawdopodobieństwo wystąpienia niższych przepływów, wydłuża w rzekach okresy niżówkowe i je

pogłębia (Tomaszewski 2012; Marsz i in. 2022, 2023; Wrzeński i in. 2022; Brzezińska i in. 2023).

Zastosowane w pracy miary stabilności i niepewności pozwoliły ustalić, w jakim stopniu dochodzi do zmian regularności pojawiania się analizowanych faz reżimu, a współczynnik stabilności umożliwił identyfikację kierunku zmian czasowych. Należy podkreślić, że stwierdzone zmiany mają istotne, uwarunkowane klimatyczno-hydrologicznie zróżnicowanie przestrzenne. Wskazywano na to już wcześniej, podczas analiz wpływu zmian intensywności Oscylacji Północnoatlantycznej i cyrkulacji termohalinowej na wielkość, stabilność i niepewność odpływu rzek w Polsce (Wrzeński 2013, 2016; Wrzeński i in. 2019).

Miary stabilności i niepewności odpływu mogą być także przydatne w ustaleniu cech przyszłych zasobów wodnych kraju w ujęciu probabilistycznym. Badania wskazują na silne zmiany stabilności odpływu w okresie zimowo-wiosennym, a więc w okresie niezwykle istotnym dla formowania zasobów wodnych Polski (Jokiel 2004; Gutry-Korycka i in. 2014).

Zmiany niepewności i regularności terminu pojawiania się wysokich i niskich odpływów wskazują również na powolną transformację reżimu polskich rzek, a dalsze ocieplenie klimatu skutkować może powstaniem nowych wzorców sezonowego rozkładu odpływu zarówno w rzekach nizinnych o reżimie niwalnym, zwłaszcza niwalnym silnie wykształconym, jak i w rzekach górskich reprezentujących złożone reżimy: niwalno-pluwialny i pluwialno-niwalny.

Literatura

- Barberis C., Molnar P., Claps P., Burlando P. 2003. Hydrologic similarity of river basins through regime stability. Working Paper 2003 – 03. Dipartimento Di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico Di Torino.
- Brzezińska W., Wrzeński D. 2023. Głębokość niżówek na rzekach w Polsce w warunkach zmiany klimatu. W: A. Młynarczyk (red.) *Środowisko przyrodnicze jako obszar badań* 5: 47-56.
- Brzezińska W., Wrzeński D., Świątek S. 2023. Wpływ ocieplenia klimatu na odpływ rzek w Polsce w latach 1951–2020. *Geoprzestrzeń* 7: 59-74.

- Chou C.M. 2012. Applying multiscale entropy to the complexity analysis of rainfall-runoff relationships. *Entropy* 14(5): 945-957. DOI: 10.3390/e14050945
- Corbus C.S., Stanescu V.A. 1999. A new method for the determination of river flow regime stability. Annual Seminar of FRIEND-AMHY Group, Cosenza, Italy.
- Corbus C.S., Stanescu V.A. 2004. The Stability Of The Hydrological Regimes: A Hydroecological Descriptor Of River Life. Conference on Water Observation and Information System for Decision Support, 25–29 May, Ohrid, Macedonia.
- Faiz M.A., Liu D., Fu Q., Wrzeński D., Muner S., Khan M.I., Li T., Cui S. 2019. Assessment of precipitation variability and uncertainty of stream flow in the Hindu Kush Himalayan and Karakoram River basins of Pakistan. *Meteorology and Atmospheric Physics* 131: 127-136. DOI: 10.1007/s00703-017-0553-6.
- Fortuniak K., Kożuchowski K., Żmudzka E. 2001. Trendy i okresowość zmian temperatury powietrza w Polsce w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny* 46(4): 283-303.
- Gutry-Korycka M., Sadurski A., Kundzewicz Z.W., Pociask-Karteczka J., Skrzypczyk L. 2014. Zasoby wodne a ich wykorzystanie. *Nauka* 1: 77-98.
- Jokiel P. 2004. Zasoby wodne środkowej Polski na progu XXI wieku. Wyd. Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź.
- Joo H., Jun H., Lee J., Kim H.S. 2019a. Assessment of a Stream Gauge Network Using Upstream and Downstream Runoff Characteristics and Entropy. *Entropy* 21(7): 673. DOI: 10.3390/e21070673.
- Joo H., Lee J., Jun H., Kim K., Hong S., Kim J., Kim H.S. 2019b. Optimal Stream Gauge Network Design Using Entropy Theory and Importance of Stream Gauge Stations. *Entropy* 21(10): 991. DOI: 10.3390/e21100991.
- Kawachi T., Maruyama T., Singh V.P. 2001. Rainfall entropy for delineation of water resources zones in Japan. *Journal of Hydrology* 246: 36-44. DOI: 10.1016/S0022-1694(01)00355-9.
- Kożuchowski K. 2004a. Skala i tendencje współczesnych zmian temperatury powietrza w Polsce. W: K. Kożuchowski (red.) *Skala uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*. Wyd. Biblioteka, Łódź: 25-46.
- Kożuchowski K. 2004b. Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w XX i XXI wieku. W: K. Kożuchowski (red.) *Skala uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*. Wyd. Biblioteka, Łódź: 47-58.
- Kożuchowski K., Żmudzka E. 2001. Ocieplenie w Polsce: skala i rozkład sezonowy zmian temperatury powietrza w drugiej połowie XX wieku. *Przegląd Geofizyczny* 46(1–2): 81-90.
- Kożuchowski K., Żmudzka E. 2002. Cyrkulacja atmosferyczna i jej wpływ na zmienność temperatury powietrza w Polsce. *Przegląd Geograficzny* 74(4): 591-604.
- Lee J.H., Byun H., Kim H.S., Jun H.D. 2013. Evaluation of a rain gauge network considering the spatial distribution characteristics and entropy: A case study of Imha dam basin. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation* 13: 217-226. DOI: 10.9798/KOSHAM.2013.13.2.217.
- Marsz A.A., Styszyńska A. 2021. Inercja rocznego odpływu całkowitego rzek Polski względem międzyrocznej zmienności przebiegu elementów klimatycznych. *Badania Fizjograficzne, Seria A – Geografia Fizyczna* 72: 159-179. DOI: 10.14746/bfg.2021.12.9.
- Marsz A. A., Styszyńska A. 2022. Proces ocieplenia w Polsce – przebieg i przyczyny (1951–2018). Przejaw wewnętrznej dynamiki systemu klimatycznego czy proces antropogeniczny? *Prace i Studia Geograficzne* 67: 51-82. DOI: 10.48128/pisg/2022-67.2-04.
- Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszyńska A., Wrzeński D. 2022. Causes and course of climate change and its hydrological consequences in the Greater Poland region in 1951–2020. *Quaestiones Geographicae* 41(3): 183-206. DOI: 10.2478/quageo-2022-0033.
- Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszyńska A., Wrzeński D., Perz A. 2023. The Thermal State of the North Atlantic Ocean and Hydrological Droughts in the Warta River Catchment in Poland during 1951–2020. *Water* 15(14): 2547. DOI: 10.3390/w15142547.
- Maruyama T., Kawachi T., Singh V.P. 2005. Entropy-based assessment and clustering of potential water resources availability. *Journal of Hydrology* 309: 104-113. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2004.11.020.

- Shannon C.E. 1948. A mathematical theory of communication. *Bell System Technical Journal* 27: 379-423.
- Singh V.P. 1997. The use of entropy in hydrology and water resources. *Hydrological Processes* 11: 587-626.
DOI: 10.1002/(SICI)1099-1085(199705)11:6<587::AID-HYP479>3.0.CO;2-P.
- Singh V.P. 1998. Entropy-Based Parameter Estimation in Hydrology. Kluwer Academic, Boston.
- Tomaszewski E. 2012. Pora koncentracji suszy hydrologicznej w zlewniach nizinnych. W: W. Marszelewski (red.) *Gospodarowanie wodą w warunkach zmieniającego się środowiska*. Monografie Komisji Hydrologicznej PTG 18(2): 41-56.
- Wrzeński D. 2010. Przestrzenne zróżnicowanie stabilności reżimu odpływu rzek europejskich. *Studia i Prace z Geografii i Geologii* (3), Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań,
- Wrzeński D. 2013a. Entropia odpływu rzek w Polsce. *Studia i Prace z Geografii i Geologii* (33), Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań.
- Wrzeński D. 2013b. Uncertainty of flow regime characteristics of rivers in Europe. *Quaestiones Geographicae* 32(1): 49-59.
DOI 10.2478/quageo-2013-0006.
- Wrzeński D. 2016. Use of entropy in the assessment of uncertainty of river runoff regime in Poland. *Acta Geophysica* 64 (5): 1825-1839.
DOI: 10.1515/acgeo-2016-0073.
- Wrzeński D. 2021. Flow Regime Patterns and Their Changes. In: M. Zelenáková, K. Kubiak-Wójcicka, A.M. Negm (red.) *Management of Water Resources in Poland*: 163-180.
- Wrzeński D., Brzezińska W. 2023. Sezonowa struktura odpływu rzek w Polsce w warunkach ocieplenia klimatu. W: D. Wrzeński, R. Graf, W. Brzezińska (red.) *Naturalne i antropogeniczne zmiany obiegu wody. Badania interdyscyplinarne. Studia i Prace z Geografii* (98), Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań: 101-115.
- Wrzeński D, Marsz A.A., Styszyńska A., Sobkowiak L. 2019. Effect of the North Atlantic Thermohaline Circulation on Changes in Climatic Conditions and River Flow in Poland. *Water* 11(8): 1622.
DOI: 10.3390/w11081622.
- Wrzeński D., Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszyńska A. 2022. Response of low flows of Polish rivers to climate change in 1987–1989. *Water* 14: 2780.
DOI: 10.3390/w14182780.
- Żmudzka E. 2002. O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 25(46): 23-38.

Summary

The climate change that has been observed in Poland since the end of the 1980s, consisting of a significant increase in air temperature, has led to changes in the functioning of the hydrological environment, including river-feeding patterns and the height and distribution of runoff in the annual cycle. The aim of this paper is to present the spatial differentiation of the stability and uncertainty of the characteristics of the river runoff regime in Poland in the years 1951–2020, and changes therein during the warming period. The year 1988 was assumed as the arbitrary date after which the air temperature increased significantly.

In the study, daily discharges from 146 water gauges located in Poland on 97 rivers with natural and quasi-natural runoff conditions were used. Hydrometric data were obtained from the Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute. The subject of the analysis was the maximum and minimum monthly runoff. On that basis, the degree of stability and uncertainty of the runoff regime in the years 1951–2020, 1951–88 and 1988–2020 was quantified using the runoff stability coefficient, which is defined as the degree of regularity of the occurrence of a specific regime phase as expressed by the first maximum (I max for the flood phase) and first minimum (I min for the low-flow phase) value of monthly runoff in the hydrological year. Shannon's (1948) information entropy was used to determine the uncertainty in the occurrence of maximum and minimum monthly runoff in the hydrological year. The paper presents the spatial variability of the analysed measures of runoff stability and entropy for the entire period 1951–2020 and determines changes therein during the period of climate warming in 1988–2020 compared to the preceding period. This made it possible to determine changes in the nature of the river regime in terms of the degree of stability and the date of occurrence of the maximum and minimum runoff.

The research revealed that changes in stability and uncertainty as well as the timing of the maximum and minimum runoff during the warming period were relatively differentiated spatially. The stability of the maximum runoff decreased in rivers in central Poland and rivers in the eastern part of the country and increased in most coastal and lake district rivers as well as the Sude-ten tributaries of the middle Oder and the Carpa-thian tributaries of the Vistula up to the Dunajec

River. This is confirmed by the results of changes in the entropy of the maximum runoff; the uncertainty of its occurrence increases in the first group of rivers and decreases in the second group. The changes in stability are so significant that, in 17% of the profiles, a change in the regime category towards lower stability was found, and 21% were located on rivers showing a more stable nature of the maximum runoff regime. The date when the maximum runoff occurs has also been changed. In more than 25% of the profiles, it accelerated and shifted from spring to winter-spring months. This concerns rivers located in north-east-ern (Drwęca, Gołdapa, Guber, Łyna, upper Biebrza), eastern (Narewka, Krzna, Bystrzyca) and western (lower section of the Warta with the Noteć) and south-western (Kwisa and Nysa Kłodzka) parts of the country alike. However, in 11% of the analysed profiles, a delay in the date of maximum runoff from winter-spring to spring (e.g., Piława and Strzegomka) and spring to spring-summer (e.g., Poprad and Ropa) was detected.

The stability of the minimum runoff in Polish rivers is clearly lower than the maximum runoff, but during the warming period in many rivers (37% of profiles) it increased significantly. The exceptions were mountain rivers, in which the stability of the minimum runoff decreased, while in 11% of the investigated rivers there was a change in the regime category. Interestingly, the increase in the stability of the minimum runoff of rivers in the central and northern parts of the country did not cause significant changes in the date of its occurrence. However, the decrease in the stability of rivers in the south was also associated with a significant change in the date of occurrence of the minimum runoff, which usually (29% of the analysed profiles) accelerated from autumn to summer-autumn, as observed along the entire course of the Oder and its Sude-ten tributaries and in the Vistula up to Dęblin and in most of its Carpathian tributaries. The Poprad River is the exception, where the stability of the minimum runoff has increased and the date of its appearance was delayed from autumn-winter to winter.

The obtained results indicate that climate warming may result in the emergence of new pat-terns of seasonal distribution of runoff in Polish rivers and the transformation of its regime. This may be most visible in the case of lowland rivers with a nival regime, especially a strongly devel-oped nival regime, and complex nival-pluvial and pluvial-nival regimes of mountain rivers.

Zestawienie badanych rzek i podstawowe charakterystyki hydrologiczne
Numeracja zgodna z Rysunkiem 1

List of the studied rivers and their basic hydrological characteristics
Numbering in accordance with Figure 1

Lp./ No.	Rzeka/ River	Wodowskaz/ Water gauge	A [km ²]	q ₁₉₅₁₋₂₀₂₀ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Stabilność/Stability		Entropia / Entropy		Typ reżimu/ Regime type
						ΔQM _{max} [-]	ΔQM _{min} [-]	ΔE _{max} [%]	ΔE _{min} [%]	
1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
1	Odra	Chałupki	4666	8,95	-6,94	0,04	-0,02	1,62	-3,55	4
2	Odra	Racibórz	6744	9,54	-7,30	-0,01	-0,02	7,45	-2,01	4
3	Odra	Ścinawa	29584	5,99	-16,81*	0,05	0,04	0,94	-5,04	4
4	Odra	Cigacice	40106	5,41	-13,32*	0,05	0,05	-3,98	-5,19	2
5	Odra	Połęcko	47370	5,30	-14,33*	0,04	-0,06	-6,92	3,61	2
6	Odra	Słubice	53600	5,52	-13,01*	0,06	0,00	-10,38	-1,27	2
7	Odra	Gozdowice	109729	4,66	-12,02*	-0,04	0,08	0,96	-6,12	2
8	Sumina	Nędza	94,4	6,12	-22,23*	-0,03	0,11	2,43	-9,51	4
9	Nysa Kłodzka	Bystrzyca Kłodzka	260	14,80	-10,11	0,15	-0,09	-14,90	7,98	4
10	Nysa Kłodzka	Kłodzko	1084	11,57	0,09	0,02	0,01	1,04	6,13	4
11	Nysa Kłodzka	Nysa	3276	8,83	-15,33*	-0,01	0,01	4,12	6,11	4
12	Nysa Kłodzka	Skorogoszcz	4514	7,92	-20,22*	-0,01	-0,04	3,07	5,86	4
13	Bystrzyca Dusznicka	Szalejów Dolny	175	11,99	-3,59	0,14	0,09	-20,66	-4,15	2
14	Ścinawka	Tłumaczów	256	8,87	0,70	0,06	-0,08	-3,07	5,44	2
15	Ścinawka	Gorzuchów	511	8,71	-15,45*	0,05	-0,03	-1,89	0,52	4
16	Biała Głucholańska	Głucholazy	283	17,19	-4,30	-0,04	0,04	14,43	1,63	4
17	Bystrzyca	Krasków	683	6,53	-8,23	0,01	-0,05	1,67	0,81	4
18	Piława	Mościsko	291	5,47	-16,41	0,01	-0,08	-2,08	2,74	4
19	Strzegomka	Łazany	356	6,28	-8,38	0,10	-0,02	-3,69	-0,98	4
20	Barycz	Osetno	4579	3,22	-17,79	0,06	0,05	-10,22	-3,65	3
21	Bóbr	Żagań	4254	8,74	-13,97*	0,03	-0,01	-5,01	-2,21	4
22	Kamienica	Barcinek	97,2	12,36	-2,97	0,16	0,00	-17,08	-1,85	2
23	Kwisa	Nowogrodziec	736	9,73	-4,61	0,13	-0,05	-4,70	1,40	4
24	Czarny Potok	Mirsk	55,9	15,68	-5,53	0,05	-0,10	-6,12	10,51	4
25	Czarna Wielka	Żagań	896	4,72	-21,33*	0,20	0,07	-22,74	-5,59	2
26	Warta	Działoszyn	4088	5,89	-15,71*	0,08	0,21	-3,97	-16,18	2
27	Warta	Sieradz	8140	5,43	-12,13*	-0,03	0,18	2,96	-17,54	2
28	Warta	Poznań	25126	3,95	-9,46	-0,09	0,06	9,07	-4,05	2
29	Warta	Skwierzyna	31268	3,91	-10,76	-0,05	0,04	0,98	-1,25	2
30	Warta	Gorzów Wlkp.	52186	3,94	-11,52	-0,14	0,06	14,97	-10,10	2
31	Oleśnica	Niechmierz	592	4,02	-15,40	-0,06	0,03	10,72	-0,19	3
32	Grabia	Grabno	811	5,08	-8,82	-0,07	0,11	8,34	-13,67	3
33	Ner	Dąbie	1712	5,76	-11,67	0,05	0,03	-4,17	-12,56	2

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
34	Prosna	Mirków	1255	3,99	-15,44*	-0,02	0,10	5,49	-12,36	2
35	Prosna	Piwonice	2938	3,78	-11,88	-0,03	0,13	7,26	-25,07	2
36	Prosna	Bogusław	4304	3,62	-14,81	0,01	0,09	3,19	-15,24	2
37	Niesób	Kuźnica Skakawska	246	3,93	-5,76	0,00	-0,04	2,69	4,34	3
38	Ołobok	Ołobok	447	3,51	-15,71	-0,05	-0,06	7,55	5,75	3
39	Mogilnica	Konojad	663	2,45	-9,18	-0,02	0,05	-0,29	-0,39	3
40	Welna	Pruśce	1130	2,93	-22,86	0,01	-0,01	-1,77	1,26	3
41	Flinta	Ryczywół	276	2,35	-15,44	0,17	0,03	-18,14	-5,36	3
42	Sama	Szamotuły	395	2,64	-15,59	0,02	0,01	-2,94	-1,02	3
43	Noteć	Nowe Drezdenko	15970	4,54	-9,99*	0,02	0,05	-3,75	-5,47	2
44	Gwda	Piła	4704	5,71	-2,10	0,14	0,11	-16,78	-10,56	1
45	Drawa	Drawsko Pomorskie	609	6,63	-2,89	0,04	0,05	-7,88	-0,71	2
46	Ina	Goleniów	2163	5,88	5,59	0,05	0,05	1,23	-8,82	2
47	Rega	Trzebiatów	2628	7,59	-7,90	0,05	0,13	-0,95	-7,12	2
48	Parzęta	Tychówko	896	9,17	-4,90	0,09	0,10	-8,25	-19,75	2
49	Wieprza	Stary Kraków	1519	10,37	1,11	0,12	-0,02	-8,59	-1,10	1
50	Słupia	Słupsk	1450	10,73	-1,92	0,19	0,09	-16,81	-14,08	1
51	Łupawa	Smoldzino	805	10,33	3,80	0,08	-0,15	-5,18	14,47	1
52	Wisła	Skoczów	297	20,33	-0,19	-0,02	0,00	7,71	3,90	4
53	Wisła	Goczałkowice	738	12,08	-0,08	0,03	-0,02	-3,95	-3,50	5
54	Wisła	Jawiszowice	971	13,51	-1,57	0,05	0,11	-6,51	-8,02	5
55	Wisła	Bieruń Nowy	1748	12,11	0,46	0,03	0,10	-2,80	-7,57	4
56	Wisła	Jagodniki	12058	10,60	-8,59	-0,02	0,00	0,33	-2,01	4
57	Wisła	Szczucin	23901	9,75	-2,26	0,02	-0,06	-1,11	4,15	4
58	Wisła	Sandomierz	31846	9,03	-1,99	0,02	-0,06	0,69	3,08	4
59	Wisła	Zawichost	50732	8,30	-6,39	0,06	-0,03	-3,76	-0,94	4
60	Wisła	Annopol	51518	8,30	-5,00	0,06	-0,13	-2,75	11,58	4
61	Wisła	Dęblin	68234	7,23	-4,51	0,04	-0,07	2,18	6,43	4
62	Wisła	Toruń	181033	5,31	-8,95	-0,08	0,07	6,74	-4,43	2
63	Wisła	Tczew	194376	5,30	-7,56	-0,06	0,04	3,83	-1,60	2
64	Łownica	Czechowice-Dziedzice	194	15,53	-8,32	-0,08	0,04	-0,93	-3,23	5
65	Soła	Oświęcim	1386	15,00	2,09	0,02	-0,07	-2,62	4,38	4
66	Skawa	Sucha Beskidzka	468	16,11	10,92	0,04	-0,10	-2,34	12,62	4
67	Skawa	Wadowice	836	14,74	-1,67	0,06	-0,04	-4,55	11,07	4
68	Raba	Proszówki	1470	11,31	-2,34	0,06	-0,04	-0,77	11,64	4
69	Dunajec	Krościenko	1580	20,13	7,31	0,02	-0,08	-4,28	18,42	5
70	Dunajec	Nowy Sącz	4341	14,99	7,17	0,08	-0,07	-4,30	10,22	4
71	Poprad	Muszyna	1514	11,60	8,81	0,02	0,08	-3,85	1,59	4
72	Poprad	Stary Sącz	2071	12,07	5,94	0,04	0,00	-8,58	2,32	4
73	Biała	Koszyce Wielkie	957	9,21	8,91	-0,01	-0,03	4,09	2,75	4
74	Nida	Brzęgi	2259	5,62	-10,62	-0,01	0,22	6,11	-15,05	2
75	Nida	Pińczów	3352	5,33	-14,17	-0,02	0,21	3,94	-17,87	2
76	Czarna Nida	Tokarnia	1216	5,43	-7,18	0,01	0,16	-0,67	-19,70	2

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
77	Czarna	Połaniec	1354	4,73	-19,32*	-0,22	0,14	21,87	-19,28	3
78	Wisłoka	Żółków	581	12,20	11,09	-0,02	-0,04	0,03	11,12	4
79	Ropa	Kłęczany	483	12,90	16,25*	0,01	-0,08	-6,28	8,42	4
80	Brzeźnica	Brzeźnica	484	6,74	-3,92	-0,03	0,08	-0,94	-8,09	4
81	San	Lesko	1614	17,60	8,87	0,02	0,00	5,64	7,03	4
82	San	Przemyśl	3686	14,11	4,74	0,01	-0,02	1,60	3,23	4
83	San	Jarosław	7041	9,91	-4,66	0,03	0,00	-4,37	2,84	4
84	San	Radomyśl	16824	7,66	2,06	0,00	0,03	-2,79	-4,55	4
85	Oslawa	Zagórz	505	16,14	3,05	-0,06	0,06	8,56	1,95	4
86	Wiar	Krówniki	789	8,01	4,52	0,09	-0,01	-5,16	8,34	4
87	Wisznia	Nienowice	1185	5,66	-16,26	-0,08	0,07	11,29	-2,45	4
88	Wisłok	Krosno	596	10,39	9,04	-0,02	0,05	-3,68	-2,06	4
89	Wisłok	Żarnowa	1427	9,11	9,43	0,00	0,10	1,11	-12,40	4
90	Wisłok	Rzeszów	2086	8,34	7,41	0,00	0,02	1,31	-7,16	4
91	Wisłok	Tryńcza	3516	7,22	6,87	-0,04	0,03	8,85	-4,16	4
92	Mleczka	Gorliczyna	529	5,49	14,41	-0,07	0,03	9,82	-3,38	4
93	Tanew	Harasiuki	2034	6,01	-5,08	0,00	0,08	-2,46	-10,00	2
94	Kamienna	Wąchock	476	6,11	-18,15*	0,04	0,22	-3,97	-21,95	2
95	Wieprz	Zwierzyniec	405	5,08	-4,90	0,09	0,20	-10,26	-15,06	1
96	Wieprz	Krasnystaw	3001	4,12	7,12	-0,08	0,20	7,60	-9,17	2
97	Wieprz	Lubartów	6364	3,54	-2,48	-0,11	0,03	11,43	-1,04	2
98	Wieprz	Kośmin	10231	3,59	-2,12	-0,07	0,10	7,43	-7,37	2
99	Bystrzyca	Sobianowice	1265	3,98	-3,25	-0,15	0,05	16,13	-1,59	2
100	Pilica	Przedbórz	2536	5,90	-17,98*	0,04	0,22	-1,72	-24,27	2
101	Pilica	Nowe Miasto	6717	5,29	-16,90*	-0,03	0,14	9,88	-17,44	2
102	Pilica	Białobrzegi	8664	5,09	-13,24*	-0,07	0,13	15,28	-18,03	2
103	Czarna	Dąbrowa	941	6,25	-10,39	-0,04	0,13	5,91	-17,97	2
104	Wolbórka	Zawada	616	4,36	-9,65	-0,03	0,11	1,34	-16,09	2
105	Drzewiczka	Odrzywół	1004	5,29	-21,27*	-0,02	0,15	4,90	-12,43	2
106	Narew	Narew	1978	4,63	-15,08*	-0,03	-0,03	-4,29	-2,60	3
107	Narew	Suraż	3376	4,42	-9,56	-0,01	0,14	-6,50	-16,78	3
108	Narew	Strękowa Góra	7181	4,48	-8,71	-0,03	0,14	-2,54	-23,65	3
109	Narew	Wizna	14308	4,71	-2,51	-0,05	0,15	3,79	-23,78	3
110	Narew	Piątnica-Łomża	15296	4,79	-3,83	0,01	0,15	0,73	-27,15	3
111	Narew	Nowogród	20106	4,83	-4,84	-0,05	0,17	7,44	-21,43	3
112	Narew	Ostrołęka	21862	4,94	-7,37	-0,05	0,18	7,44	-23,90	3
113	Narewka	Narewka	590	4,97	-19,27*	0,02	0,16	-7,85	-17,22	3
114	Supraśl	Fasty	1817	4,86	2,00	0,06	0,11	-15,18	-14,17	2
115	Biebrza	Sztabin	846	5,44	-12,93	0,06	0,13	-7,19	-12,63	3
116	Biebrza	Dębowo	2322	5,30	-2,47	-0,03	0,18	2,67	-25,20	3
117	Biebrza	Osowiec	4365	5,07	-1,16	-0,03	0,09	9,92	-17,19	3
118	Biebrza	Burzyn	6900	5,01	6,72	-0,03	0,13	3,95	-19,75	3
119	Brzozówka	Karpowicze	650	4,89	-12,84	0,10	0,15	-17,56	-20,96	3
120	Pisa	Ptaki	3562	5,76	-10,34	0,02	-0,03	3,07	0,37	1

1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.	11.
121	Pisa	Dobrylas	4061	5,78	-11,94	-0,07	0,07	7,37	-5,79	2
122	Rozoga	Myszyniec	231	4,92	-9,82	-0,01	0,12	-2,40	-14,84	2
123	Omulew	Krukowo	1265	5,39	-18,21*	0,15	0,16	-19,21	-20,93	2
124	Orzyc	Krasnosielec	1268	4,51	-15,90*	-0,05	0,16	0,91	-20,38	2
125	Bug	Włodawa	14410	3,82	0,30	-0,10	0,12	12,92	-7,23	3
126	Bug	Frankopol	31336	3,74	-4,81	-0,13	0,17	11,91	-13,91	3
127	Bug	Wyszków	39119	3,89	-8,72	-0,10	0,18	9,06	-10,70	3
128	Włodawka	Okuninka	576	3,70	-8,94	-0,02	0,03	4,74	2,43	3
129	Krzna	Malowa Góra	3128	3,43	3,73	-0,09	0,12	4,58	-8,37	3
130	Nurzec	Boćki	556	4,25	-18,26*	-0,07	-0,03	8,89	4,59	3
131	Nurzec	Brańsk	1227	4,02	-19,79*	-0,03	-0,08	2,89	10,07	3
132	Liwiec	Łochów	2466	4,25	-9,55	0,07	0,08	-14,47	-8,43	3
133	Rawka	Kęszyce	1191	4,02	-15,93*	-0,07	0,22	3,39	-27,24	2
134	Skrwa	Parzeń	1534	3,96	-8,88	-0,08	0,15	9,03	-12,50	3
135	Drwęca	Nowe Miasto Lubawskie	2725	5,99	-6,33	0,13	0,17	-15,44	-23,75	2
136	Drwęca	Brodnica	3526	6,10	-5,13	0,12	0,17	-12,65	-25,89	2
137	Drwęca	Elgiszewo	4959	5,51	-9,12	0,08	0,20	-8,19	-22,45	2
138	Wel	Kuligi	764	6,54	-7,74	0,04	0,06	-9,29	-8,61	1
139	Brda	Tuchola	2462	7,88	-5,63*	0,13	-0,06	-7,81	4,17	1
140	Wda	Czarna Woda	940	6,68	-9,08*	0,06	-0,07	0,38	4,67	1
141	Wierzyca	Brody Pomorskie	1544	5,55	-10,69*	0,05	0,06	-11,32	-9,43	2
142	Łyna	Sępól	3647	6,71	-8,86	0,06	0,00	-7,83	0,79	2
143	Guber	Prosna	1568	5,44	-9,89	0,06	0,03	-6,91	-7,03	2
144	Gołdapa	Banie Mazurskie	548	8,46	-4,05	-0,12	0,13	10,93	-13,98	3
145	Czarna Hańcza	Czerwony Folwark	454	8,33	-9,04	0,03	-0,03	2,73	-3,91	2

A – powierzchnia zlewni; q – odpływ jednostkowy;

Zmiana w okresie ocieplenia po roku 1988: Δq – odpływu jednostkowego, ΔQM_{max} – współczynnika stabilności odpływu maksymalnego, ΔQM_{min} – współczynnika stabilności odpływu minimalnego, ΔE_{max} – entropii odpływu maksymalnego, ΔE_{min} – entropii odpływu minimalnego; * – zmiana istotna statystycznie na poziomie $p < 0,05$;

Typ reżimu: 1 – niwalny słabo wykształcony, 2 – niwalny średnio wykształcony, 3 – niwalny silnie wykształcony, 4 – niwalno-pluwialny, 5 – pluwialno-niwalny.

A – catchment area; q – specific runoff;

Change in the warming period after 1988 of: Δq – specific runoff, ΔQM_{max} – stability coefficient of the maximum runoff, ΔQM_{min} – stability coefficient of the minimum runoff, ΔE_{max} – entropy of the maximum runoff, ΔE_{min} – entropy of the minimum runoff; * – statistically significant change at $p < 0.05$;

Type of regime: 1 – nival poorly developed, 2 – nival moderately developed, 3 – nival clearly developed, 4 – nival-pluvial, 5 – pluvial-nival.