



POLSKIE TOWARZYSTWO GEOGRAFICZNE • POLISH GEOGRAPHICAL SOCIETY



czasopismo
geograficzne

geographical
journal od
since 1923

NIEPEWNOŚĆ REŻIMU ODPIŁYWU RZEK W POLSCE W WARUNKACH OCIEPLENIA KLIMATU

UNCERTAINTY OF THE RIVER RUNOFF REGIME IN POLAND UNDER CLIMATE WARMING

Dariusz Wrześciński, Wiktoria Brzezińska

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza w Poznaniu, Wydział Nauk Geograficznych i Geologicznych,
DW  <https://orcid.org/0000-0001-5025-1447>, e-mail: darwrze@amu.edu.pl (autor korespondencyjny),
WB  <https://orcid.org/0009-0003-6577-4648>, e-mail: wikbrz@st.amu.edu.pl

Streszczenie

Obserwowana od końca lat 80. XX w. zmiana klimatu w Polsce polegająca na istotnym wzroście temperatury powietrza prowadzi do zmiany funkcjonowania środowiska hydrologicznego, w tym sposobu zasilania rzek i wysokości oraz rozkładu odpływu w cyklu rocznym. Celem pracy jest przedstawienie przestrzennego zróżnicowania niepewności reżimu odpływu rzek i jej zmian w Polsce w latach 1951–2020 na podstawie miary opartej na teorii entropii informacji Shannona. Ustalono stopień niepewności odpływu w cyklu rocznym w całym wieloletniu 1951–2020 oraz w dwóch podokresach: przed silnym wzrostem temperatury powietrza (1951–1988) i w jego czasie (1988–2020). Po roku 1988 nastąpił wzrost niepewności i wyrównanie rozkładu odpływu rzek w przypadku 86% przekrojów wodowskazowych w dorzeczu Wisły, istotny statystycznie we wschodniej części dorzecza. Natomiast odpływ większości rzek w dorzeczu Odry (61%) wykazał nieistotny statystycznie spadek entropii rozkładu odpływu. Do przyczyn takich zmian należy zaliczyć przestrzenne zróżnicowanie zmian wysokości odpływu i jego struktury w okresie ocieplenia. Entropia rozkładu informująca o sezonowości odpływu może być przydatną miarą charakteryzującą reżim odpływu i jego transformację w warunkach zmiany klimatu. Na zmianę reżimu odpływu najbardziej narażone są rzeki o reżimie niwalnym,

Wrześciński D., Brzezińska W. (2024). Niepewność reżimu odpływu rzek w Polsce w warunkach ocieplenia klimatu. *Czasopismo Geograficzne*, 95(2): 183–208. <https://doi.org/10.12657/czageo-95-08>



Otrzymano/Received: 29.01.2024
Zaakceptowano/Accepted: 2.04.2024

zwłaszcza niwalnym silnie wykształconym, oraz reżimach złożonych: niwalno-pluwialnym i pluwialno-niwalnym.

Słowa kluczowe: zmiana klimatu, odpływ, reżim rzek, teoria entropii, niepewność, Polska.

Abstract

Climate change in Poland, observed since the end of the 1980s, consisting in a significant increase in air temperature, has led to changes in the hydrological environment, including the structure of river feeding and the height and distribution of runoff in the annual cycle. The aim of the paper is to present the spatial diversity of uncertainty in the river runoff regime and its changes in Poland in 1951–2020 with the use of measures drawn from Shannon's information entropy theory. Based on the entropy of the runoff distribution, the degree of its uncertainty was determined in the annual cycle in the whole multi-annual period of 1951–2020, and also in two sub-periods of 1951–1988 and 1988–2020, which is before and after the strong increase in air temperature. After 1988, there was an increase in uncertainty and levelling of the river runoff distribution in 86% of water gauges in the Vistula River basin, statistically significant in the eastern part of that basin. However, the runoff of most rivers in the Oder River basin (61%) showed a statistically insignificant decrease in the entropy of the runoff distribution. The reasons for such changes include spatial differences in changes in the runoff height and its structure during the warming period. Distribution entropy informing on the seasonality of runoff can be a useful measure characterizing the runoff regime and its transformation under the conditions of climate change. Rivers with the nival regime, especially the strongly developed nival regime, and complex regimes – the nival-pluvial and pluvial-nival, are most exposed to changes in the runoff regime.

Keywords: climate change, runoff, river regime, entropy theory, uncertainty, Poland.

WSTĘP

Środowisko przyrodnicze, w tym jego bardzo istotne ogniwo hydrologiczne, funkcjonuje w warunkach niepewności. W nauce niepewność często uznawana jest za niepożądany stan, który należy wyeliminować lub ograniczyć w możliwie szerokim zakresie (Singh, 1997; Garbaczewski, 2006; Markiewicz i in., 2020). Niepewność to także właściwość przypisana obiegowi wody w przyrodzie i nieodłącznie z nim związana. Zrozumienie i ustalenie stopnia niepewności zjawisk hydrologicznych może przyczynić się do lepszego poznania procesów zachodzących w przyrodzie oraz sprawić, że ich modelowanie będzie bardziej realistyczne. W procesie poznawczym stosowanie metod modelowania deterministycznego należy zatem łączyć z szacowaniem niepewności, aby poprawić jakość modeli i prognoz. Zmiana klimatu i zmienność warunków klimatycznych oraz działalności człowieka to istotne przyczyny niepewności reżimu odpływu rzek. Ustalenie

powiązań między ogniwem klimatycznym i hydrologicznym ilościowo ilustrujących obserwowane relacje dotyczy zarówno wieloletniej i sezonowej dynamiki, jak i niepewności lub stabilności reżimu odpływu (Wrześniński, 2013a, 2018, 2021).

Entropia, jako miara stopnia niepewności, znalazła zastosowanie w wielu dziedzinach nauki, w tym hydrologii, a ich przegląd zawierają prace Wrześnińskiego (2010, 2013a). Teorię entropii stosuje się w różnych aspektach analizy zasobów wodnych. Szczegółową analizę możliwości wykorzystania entropii informacji w problematyce hydrologicznej przedstawił Singh (1997). Entropię stosowano w procesie estymacji parametrów hydrologicznych Singh (1998) i analizie współczynnika odpływu Chou (2012). Teoria entropii została również wykorzystana do ustalenia optymalnej konfiguracji stacji wodowskazowych (Joo i in., 2019a, b), gęstości sieci pomiarowej opadów atmosferycznych (Kim i in., 2007) i jej optymalizacji (Lee i in., 2013). Dostępność potencjalnych zasobów wodnych na podstawie entropii opadów atmosferycznych ustalili Kawachi i in. (2001) oraz Maruyama i in. (2005). Barberis i in. (2003) wskazali na możliwość wykorzystania entropii do konstrukcji wskaźnika klasyfikacji reżimu rzecznego. Te propozycje metodyczne znalazły zastosowanie w ocenie niepewności cech reżimu odpływu rzek w Europie (Wrześniński, 2013a, b, 2016) i Indusu w Azji (Faiz i in., 2019). Wykorzystując teorię entropii, Zhu i in. (2015) opisali ewolucję zasobów wodnych pod wpływem zmian klimatycznych i działalności człowieka. Natomiast Ilunga (2017, 2018, 2019) zastosował mierniki odporności zlewni oparte na entropii w ustalaniu stopnia stabilności zasobów wodnych różnych jednostek terytorialnych.

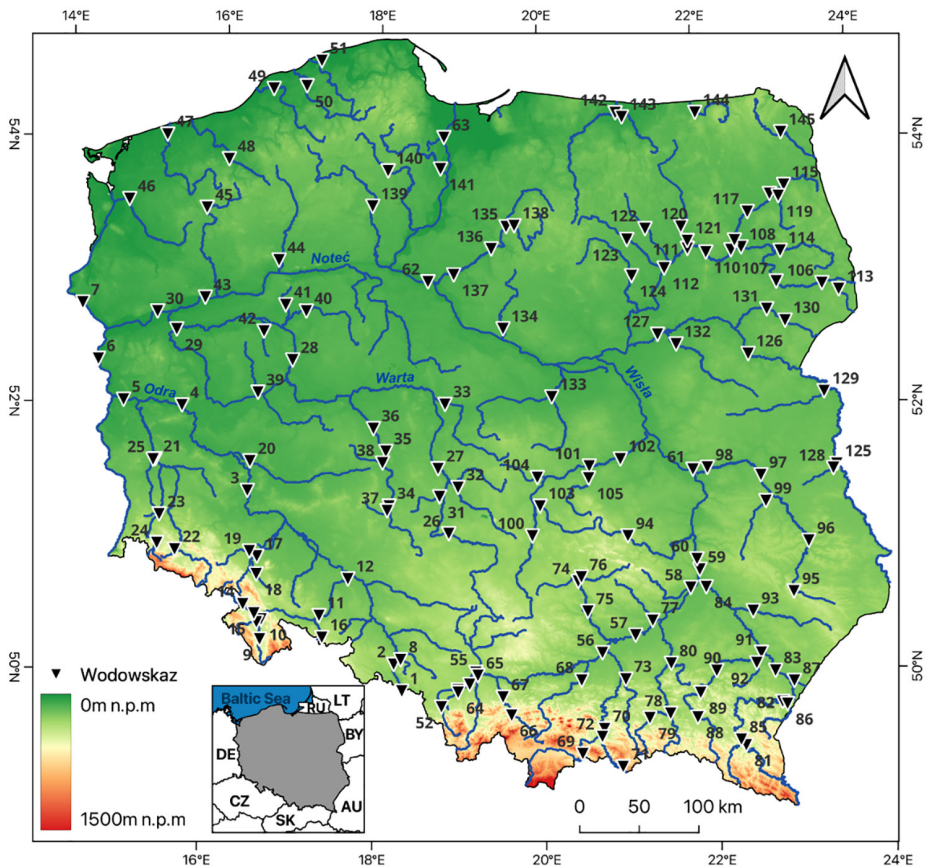
Zmiana warunków klimatycznych i działalność człowieka mogą powodować zmiany charakterystyk hydrologicznych, takich jak przepływ (odpływ). To z kolei przynosi zmianę stopnia niepewności wyrażonego entropią Shannona (np. Zang, Singh, 2012; Fan i in., 2013; Wrześniński, 2013a, 2016; Ilunga, Singh, 2015; Pan i in., 2017). Czynniki naturalne i antropogeniczne mogą wpływać pozytywnie lub negatywnie na wielkość i zmiany odpływu rzecznego.

Badania klimatyczne wskazują na ocieplenie w Polsce w drugiej połowie XX w., szczególnie w latach 80. i 90. (Fortuniak i in., 2001; Kożuchowski, Żmudzka, 2001, 2002; Kożuchowski, 2004a) przy jednoczesnym braku istotnych zmian wysokości opadów (Żmudzka, 2002; Kożuchowski, 2004b). Wśród przyczyn ocieplenia wymieniane są czynniki solarne, a zwłaszcza cyrkulacyjne związane z nasileniem strefowej, zachodniej cyrkulacji atmosferycznej i rozwojem nad Polską południowej składowej cyrkulacji. Od końca lat 80. XX w. obserwuje się w Polsce wyraźny wzrost temperatury powietrza, a rok 1988 uznawany jest za początek ocieplenia klimatu (Marsz, Styszyńska, 2021a, b; Marsz i in., 2022). Na hydrologiczne konsekwencje wzrostu temperatury w tym okresie zwrócono uwagę, analizując zmiany odpływu rzek w Polsce i jego struktury (Brzezińska i in., 2023; Wrześniński, Brzezińska, 2023) oraz czasu trwania niskich przepływów (Wrześniński i in., 2022; Marsz i in., 2022, 2023).

Celem pracy jest przedstawienie przestrzennego zróżnicowania niepewności reżimu odpływu rzek i jej zmian w Polsce w latach 1951–2020 na podstawie miary wynikającej z teorii entropii informacji Shannona (1948) w warunkach ocieplenia klimatu. Za moment, po którym istotnie statystycznie nastąpił wzrost temperatury powietrza, przyjęto rok 1988. Ustalono stopień niepewności rozkładu odpływu w cyklu rocznym w całym wieloletniu 1951–2020 oraz jego zmiany w okresie ocieplenia (1988–2020) względem lat 1951–1988.

MATERIAŁY ŹRÓDŁOWE

Zakres merytoryczny pracy ze względu na przestrzenny aspekt analizy oraz zastosowaną metodykę wymagał zgromadzenia dużej liczby zlewni rzecznych



Ryc. 1. Położenie przekrojów wodowskazowych na badanych rzekach w Polsce.

Numeracja zgodna z załącznikiem 1

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

o możliwie najdłuższych i czasowo jednorodnych seriach danych obejmujących lata 1951–2020. Ponieważ przedmiotem analiz były zmiany niepewności reżimu odpływu pod wpływem ocieplenia klimatu, w pracy uwzględniono cały dostępny materiał hydrometryczny dla obiektów o quasi-naturalnych warunkach odpływu. W pracy wykorzystano dobowe wartości przepływów ze 145 posterunków zlokalizowanych na 97 rzekach Polski (ryc. 1). Dane hydrometryczne uzyskano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej-PIB.

METODY BADAŃ

Rozwiązanie postawionego problemu badawczego było możliwe dzięki zastosowaniu metod pomiaru niepewności odpływu zaproponowanych we wcześniejszych pracach (Wrzeński, 2010, 2013a, 2016). Aby ilościowo określić stopień niepewności reżimu odpływu, zastosowano entropię rozkładu odpływu w cyklu rocznym.

Według teorii entropii informacji Shannona (1948), entropia (H) to średnia ilość informacji, przypadająca na znak symbolizujący zajście zdarzenia z pewnego zbioru. Zdarzenia w tym zbiorze mają przypisane prawdopodobieństwa wystąpienia:

$$H = \sum_{i=1}^n p_i \log_r \left(\frac{1}{p_i} \right) \quad (1)$$

gdzie:

- p_i – prawdopodobieństwo wystąpienia konkretnego stanu zdarzenia,
- n – liczba możliwych zdarzeń,
- r – podstawa logarytmu.

Jeżeli ilość informacji jest logarytmem z prawdopodobieństwa stanu komunikatu, jednostka, w której oblicza się ilość informacji, zależy od wyboru podstawy logarytmu. Gdy podstawa logarytmu $r = 2$, jednostką jest bit (*binary digit*). Entropia przyjmuje maksymalną wartość, gdy prawdopodobieństwa są jednakowe, a zmniejsza się do zera, gdy jedna wartość zmiennej występuje z prawdopodobieństwem równym jeden.

Entropia rozkładu odpływu w cyklu rocznym

Entropię rozkładu odpływu w czasie zdefiniowano, przyjmując, że r_i będzie wysokością miesięcznego odpływu w i -tym miesiącu roku. Odpływ roczny, R , jest zatem sumą r_i , od $i=1$ do $i=12$. W tym przypadku prawdopodobieństwo p_i można obliczyć jako iloraz r_i oraz R . Stosując entropię informacji, uzyskujemy miarę nieuporządkowania w rozkładzie miesięcznych odpływów w roku (E_R), którą można zapisać jako:

$$E_R = \sum_{i=1}^{12} (r_i \cdot R^{-1}) \log_2 (r_i \cdot R^{-1}) \quad (2)$$

Wartości entropii rozkładu odpływu (E_R) zawierają się w przedziale od 0 do $\log_2 12$ bitu. Wartości E_R wyrażono w procentach, zakładając, że maksymalna uzyskana entropia równa 3,58 stanowi 100%. Maksymalna wartość ($E_R = \log_2 12 = 3,58$ bitu = 100%) osiągnięta jest wówczas, gdy roczny odpływ rozłożony jest równomiernie na wszystkie miesiące roku ($p_1 = p_2 = p_3 = \dots = p_n = 1/n$). Natomiast gdy cały roczny odpływ przypada na jeden miesiąc, entropia rozkładu odpływu przyjmuje wartość minimalną ($E_R = 0$). Wysoka entropia rozkładu oznacza zatem dużą niepewność i równomierne rozłożenie odpływu całkowitego na poszczególne miesiące roku. Natomiast niska oznacza małą niepewność i silną koncentrację odpływu w możliwie krótkim czasie, w skrajnym przypadku w ciągu jednego miesiąca. Entropię rozkładu odpływu w czasie (E_R) obliczono dla każdego roku, a wartość reprezentatywną dla danego przekroju wodowskazowego uzyskano poprzez uśrednienie wartości rocznych E_R dla badanych wieloletnich okresów: 1951–2020, 1951–1988 i 1988–2020. Pozwoliło to na analizę zmian stopnia niepewności odpływu w wyróżnionych podokresach wielolecia 1951–2020.

Zmiana entropii i jej istotność

W celu określenia zmian entropii rozkładu (E_R) odpływu rzek w warunkach ocieplenia klimatu w latach 1988–2020 względem okresu 1951–1988 obliczono wskaźnik zmian jako różnicę entropii w tych okresach wyrażoną w procentach. Istotność statystyczną tych różnic badano testem dla prób niezależnych. Każdorazowo testowano hipotezę zerową: $H_0: \mu_1 = \mu_2$ o równości wartości oczekiwanych, przeciwko hipotezie alternatywnej: $H_1: \mu_1 \neq \mu_2$. Odrzucenie hipotezy zerowej pozwala wnioskować o istotnych różnicach entropii rozkładu odpływu w cyklu rocznym obserwowanych po i przed zmianą klimatu. Statystyka T ma rozkład Studenta, przy $n_1 + n_2 - 2$ stopniach swobody:

$$T = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}} \quad (3)$$

gdzie $S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}$ wynosi

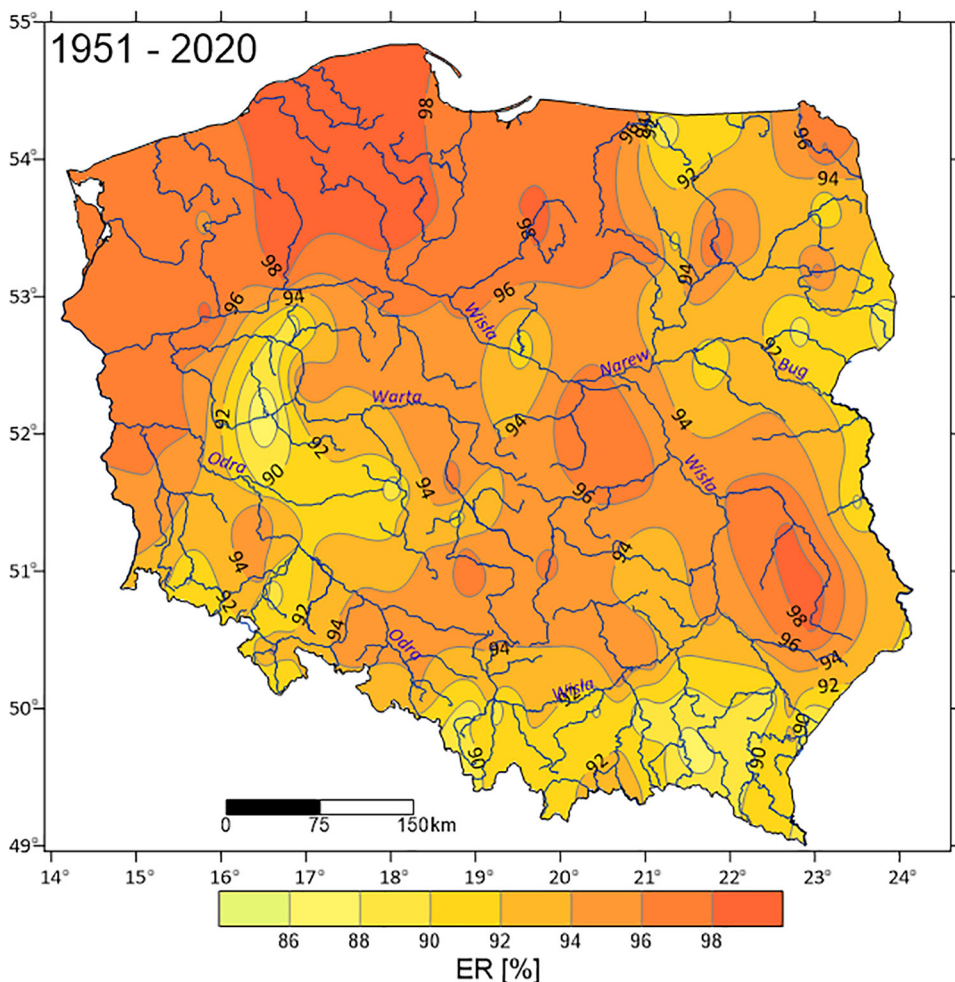
$$S_{\bar{X}_1 - \bar{X}_2} = \sqrt{\frac{(n_1 - 1) \cdot S_1^2 + (n_2 - 1) S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \cdot \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)} \quad (4)$$

gdzie: n_1, n_2 – liczebność prób, S_1^2 – wariancje obu prób, S_2^2 – średnie z obu prób.

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.

ENTROPIA ROZKŁADU ODPŁYWU W CYKLU ROCZNYM

W latach 1951–2020 entropia rozkładu odpływów miesięcznych w cyklu rocznym polskich rzek była stosunkowo wysoka i wahała się od 85,6% (Mogilnica–Konojad) do 99,4% (Łupawa–Smoldzino) – zał. 1. W porównaniu z rozkładem



Ryc. 2. Entropia rozkładu odpływów miesięcznych w cyklu rocznym w latach 1951–2020

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

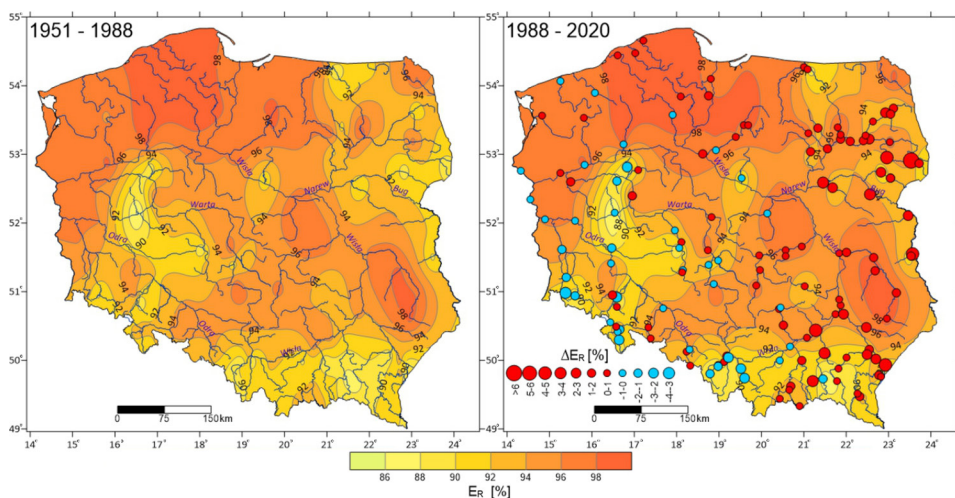
odpływu rzek europejskich są to wysokie wartości świadczące o większej niepewności i bardziej wyrównanych odpływach miesięcznych w cyklu rocznym (Wrzeński, 2010, 2013b). Rozkład przestrzenny E_R wykazuje silne przestrzenne zróżnicowanie odzwierciedlające cechy reżimu odpływu polskich rzek (ryc. 2). Niską entropią rozkładu odpływów miesięcznych ($E_R < 90\%$) wyróżniają się rzeki o silnie wykształconym reżimie niwalnym położone na Wysoczyźnie Poznańskiej (Mogilnica, Flinta, Sama) i w północno-wschodniej części kraju (Narewka, Nurzec, Włodawka, Guber). Podobnie niską entropię mają rzeki górskie, głównie w dorzeczu górnej Wisły: Wisła po Goczałkowice, Soła, Raba, Wisłoka i rzeki w zlewni Sanu (Osława, Wiar, Wisznia, Wisłok, Mleczka) oraz rzeki w dorzeczu Odry – Bystrzyca z Piławą i Kamienica w zlewni Bobru (ryc. 2). Niska entropia świadczy o nierównomiernym rozkładzie odpływów miesięcznych w roku i jego koncentracji w krótkim czasie. W centralnej części kraju wyjątek stanowią duże rzeki tranzytowe – Wisła i Odra, dla których entropia rozkładu odpływu osiąga relatywnie wysokie wartości, wzrastające wraz z ich biegiem.

Wzrost entropii rozkładu odpływu świadczy o jego wyrównywaniu w cyklu rocznym. Wysoką entropią ($E_R > 95\%$) i bardziej równomiernym rozkładem odpływu w roku, oprócz dużych rzek (Wisła, Odra, Warta), charakteryzuje się większość rzek pojeziernych, rzeki w górnej części dorzecza Warty, a także w dolnej części dorzecza Odry i Wisły oraz rzeki Lubelszczyzny. Skrajnie wysoką entropią ($E_R > 99\%$) wyróżniają się rzeki przymorskie i pojezierne (Śłupia, Łupawa, Brda i Wda) o quasi-naturalnym, głównie słabo wykształconym reżimie niwalnym. Podobnie wysoką entropią cechują się rzeki o zmienionych cechach odpływu w wyniku działalności człowieka, które nie zostały uwzględnione w tym badaniu, np. Biała Przemsza, Bytomka, Widawka (Wrzeński, 2014).

Zmiany entropii rozkładu odpływu

W okresie ocieplenia w latach 1988–2020 odpływ roczny większości rzek zmniejszył się, z wyjątkiem karpackich dopływów Wisły. Wyraźnie zmieniła się też sezonowa struktura odpływu rzek w Polsce (Wrzeński, Brzezińska, 2023). W miesiącach zimowych odpływ większości rzek wzrósł, a w miesiącach letnich zmalał. Bardziej skomplikowana jest zmiana odpływu w sezonie wiosennym. Istotny spadek odpływu wiosennego występuje głównie na rzekach w północno-wschodniej części kraju w zlewni Narwi z Bugiem i Biebrzą. Natomiast niewielki i zazwyczaj statystycznie nieistotny wzrost odpływu wiosennego obserwowany jest na rzekach w południowo-zachodniej części kraju, na większości rzek w dorzeczu środkowej Odry, zlewni górnej Warty i górnego dorzecza Wisły po Rabę. Zmiany te istotnie oddziałują na wysokość i rozkład odpływów miesięcznych, a w konsekwencji na stopień ich niepewności. Zauważalne w okresie ocieplenia po roku 1988 zmiany entropii rozkładu polegają głównie na jej wzroście, który obserwuje

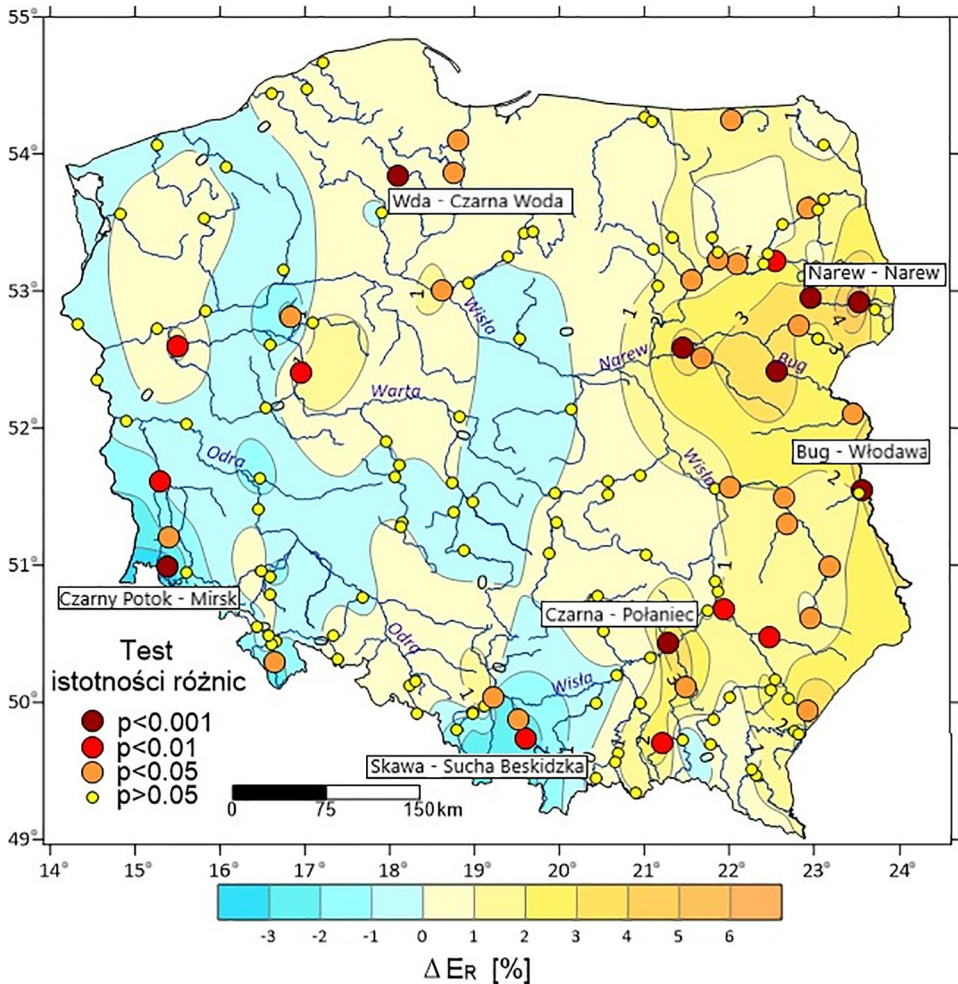
się na 70% badanych przekrojów wodowskazowych (ryc. 3). Wyraźnie odmienny jest jednak charakter tych zmian w największych dorzeczach Polski. W dorzeczu Wisły na zdecydowanej większości przekrojów wodowskazowych (86%) widoczny jest wzrost entropii rozkładu odpływu, głównie w jej prawej, wschodniej części, przy czym w niemal połowie z nich zmiany te są istotne statystycznie ($p < 0,05$) – rycina 4. W nielicznych (14%) pozostałych przekrojach entropia rozkładu odpływu zmalała, a stwierdzono to w przekrojach zlokalizowanych na górnej Wiśle i jej karpackich dopływach po Rabę oraz w pojedynczych rzekach położonych w pozostałej części dorzecza (Wisłoka, Rawka, Skrwa i Brda). Spadek entropii był zazwyczaj niewielki, a istotny statystycznie stwierdzono tylko w przypadku Soły ($p < 0,05$) i Skawy ($p < 0,01$).



Ryc. 3. Entropia rozkładu odpływów miesięcznych w cyklu rocznym w badanych wieloleciach oraz jej zmiany (ΔE_R) w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 względem okresu 1951–1988

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

Odmienne zjawiska obserwuje się w dorzeczu Odry, gdzie w większości (61%) badanych przekrojów wodowskazowych stwierdzono spadek entropii rozkładu odpływu. Jednak istotne statystycznie zmiany stwierdzono jedynie na dopływach Bobru: Kwisie ($p < 0,05$) z Czarnym Potokiem ($p < 0,01$) i Czernej Wielkiej ($p < 0,001$) oraz w górnej Nysie Kłodzkiej po Bystrzycę Kłodzką ($p < 0,05$) i Flincie ($p < 0,05$) na Pojezierzu Wielkopolskim. Niewielki, zazwyczaj nieistotny statystycznie, wzrost entropii rozkładu odpływu stwierdzono na pozostałych rzekach zlokalizowanych w różnych częściach dorzecza Odry i Przymorza (Ina, Wieprza, Słupia, Łupawa). Istotny wzrost entropii zidentyfikowano jedynie w rozkładzie odpływu Warty po Poznań i Skwierzynę ($p < 0,01$) – rycina 4.

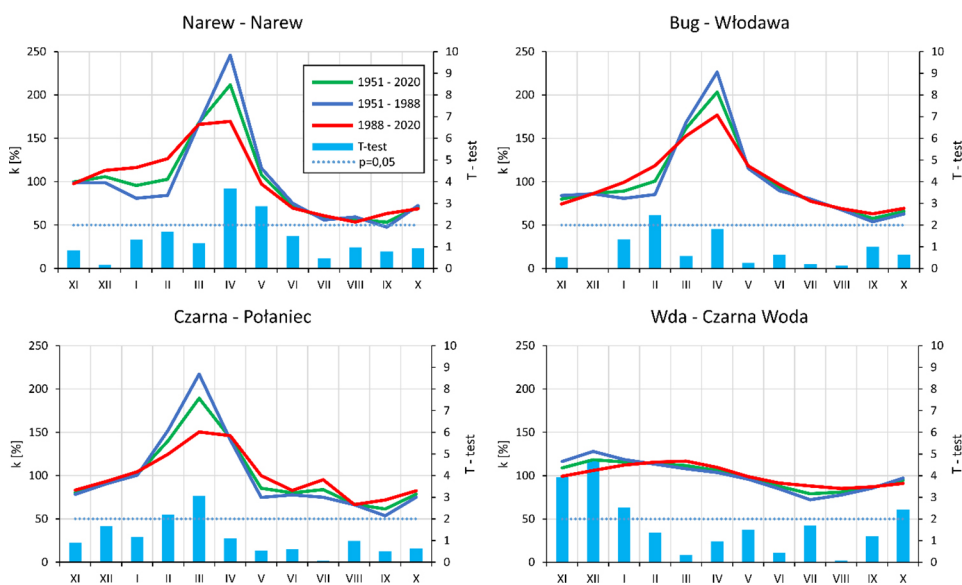


Ryc. 4. Zmiany entropii rozkładu odpływów miesięcznych w cyklu rocznym (ΔE_R) w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 względem okresu 1951–1988 i ich statystyczna istotność (p)

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

Dla wybranych rzek, w przypadku których w okresie ocieplenia po roku 1988 stwierdzono najbardziej istotne statystycznie pozytywne lub negatywne zmiany entropii rozkładu odpływu w cyklu rocznym, przedstawiono przebieg miesięcznych współczynników przepływu dla trzech przyjętych wariantów czasowych: całego wielolecia 1951–2020 oraz okresu przed ociepleniem klimatu (1951–1988) i po (1988–2020) – ryciny 5 i 6. Najsilniejsze zmiany entropii, polegające na wzroście niepewności rozkładu odpływu, obserwowane we wschodniej części dorzecza Wisły, wynikają ze zmian sezonowych odpływów i ich udziału w odpływie rocz-

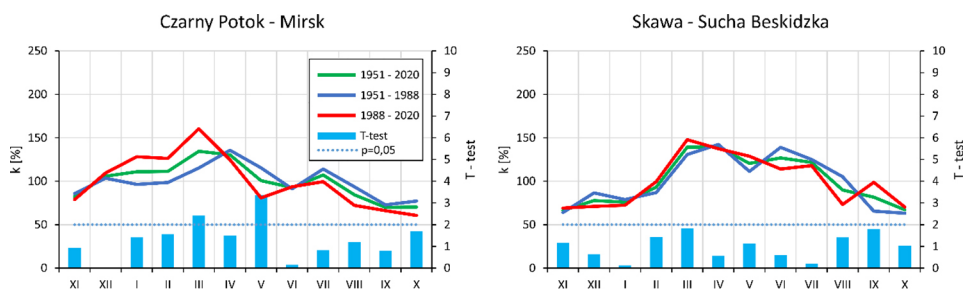
nym. W czasie cieplejszych zim zmieniający się typ opadów i odwilże śródzimowe zwiększają przepływy rzek górskich i niektórych pojeziernych, ale najsilniejszy wzrost dotyczy rzek w północno-wschodniej części kraju, funkcjonujących w warunkach najbardziej surowego, quasi-kontynentalnego klimatu. W przypadku większości rzek w Polsce wzrasta też udział odpływu sezonu zimowego w odpływie rocznym. W konsekwencji rzadszych opadów śniegu, a zwłaszcza coraz cieńszej i krócej trwającej pokrywy śnieżnej w miesiącach wiosennych, zasilenie roztopowe ulega ograniczeniu, odpływ wiosenny zaś maleje, z wyjątkiem karpaccich dopływów Wisły. Na wielu rzekach obserwuje się zatem wzrost odpływu w okresie zimowym i spadek w miesiącach wiosennych (np. Narew i Bug), co wyraźnie wyrównuje rozkład odpływu w cyklu rocznym i zwiększa entropię rozkładu odpływu (ryc. 5). Nieco inny jest charakter zmian odpływów miesięcznych w przypadku rzek Przymorza i pojezierzy o najmniejszej zmienności przepływów i najbardziej wyrównanych odpływach. W okresie ocieplenia odpływ zimowy i jego udział w odpływie rocznym nieznacznie tu rośnie, ale w niektórych przypadkach (Wda, Drawa) także maleje. Do jeszcze większego wyrównania odpływów w cyklu rocznym w tych rzekach przyczynia się też niewielki wzrost odpływu w sezonie letnim.



Ryc. 5. Przebieg miesięcznych współczynników przepływu (k) wybranych rzek o istotnym statystycznie ($p < 0,001$) wzroście entropii rozkładu odpływu w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 wraz z testem istotności różnicy wysokości odpływów miesięcznych (T -test) między wieloleciami 1988–2020 i 1951–1988

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

W okresie ocieplenia istotny statystycznie wzrost entropii rozkładu odpływu obserwuje się na polskich rzekach sporadycznie. Stwierdzono go ($p < 0,001$) w zlewni Czarnego Potoku – dopływu Kwisy. Przebieg miesięcznych współczynników przepływu tej rzeki wskazuje, że wzrost niepewności rozkładu odpływu w cyklu rocznym wynika ze znacznego zwiększenia przepływu w okresie zimowo-wiosennym, od stycznia do marca, oraz jego spadku w pozostałej części roku hydrologicznego: od maja do października (ryc. 6). Drugi obszar o zwiększonej entropii rozkładu odpływu zidentyfikowano w górnej części dorzecza Wisły po Rabę, z istotnymi statystycznie zmianami w przypadku Soły i Skawy. W przypadku Skawy zmiany odpływów miesięcznych w okresie ocieplenia nie są istotne statystycznie, jednak na tyle wysokie, że zwiększają zróżnicowanie rozkładu odpływu. Przyczynił się do tego wzrost odpływu od lutego do marca i spadek w sezonie letnim.

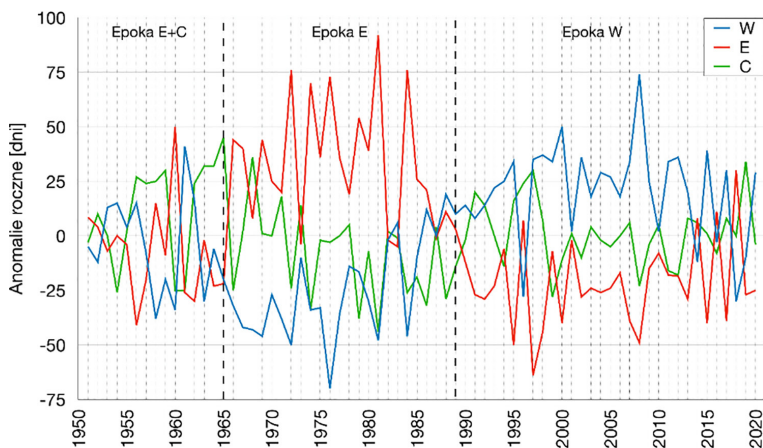


Ryc. 6. Przebieg miesięcznych współczynników przepływu (k) wybranych rzek o istotnym statystycznie ($p < 0,01$) wzroście entropii rozkładu odpływu w okresie ocieplenia w latach 1988–2020 wraz z testem istotności różnicy wysokości odpływów miesięcznych (T -test) między wieloleciami 1988–2020 i 1951–1988
Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Niepewność reżimu odpływu rzek w Polsce odnośnie do rozkładu odpływów miesięcznych w cyklu rocznym ustalono z wykorzystaniem teorii entropii informacji Shannona. Miara ta pozwala w pośredni sposób określić przewidywalność, regularność i stabilność odpływu i zasobów wodnych. Jest to szczególnie istotne w warunkach zmiany i zmienności warunków klimatycznych, których przejawem jest ocieplenie obserwowane w Polsce od końca lat 80. XX w. Zmiany w ostatnich dziesięcioleciach takich elementów meteorologicznych, jak m.in.: wzrost usłonecznienia i temperatury powietrza, spadek wilgotności względnej powietrza oraz struktura zachmurzenia, stanowią konsekwencję procesów globalnego ocieplenia. W opracowaniach naukowych wskazuje się rok 1988 jako umowny termin początku tych zmian w Polsce (Marsz, Styszyńska, 2021a, b; Marsz i in.,

2022). Wśród przyczyn ocieplenia klimatu wskazuje się zmianę warunków makrocyrkulacyjnych, które w ciągu ostatnich 70. lat zmieniły się dwukrotnie – ryцина 7 (Marsz, Styszyńska, 2022; Wrzeński i in., 2022). Zmiany poszczególnych makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej wskazują na spadek po roku 1988 częstości pojawiania się makrotypu E, a wzrost strefowego makrotypu W. Stwierdzone zmiany struktury makrotypów w wyróżnionych epokach wymuszają synchroniczne zmiany poszczególnych charakterystyk klimatycznych, a tym samym cyrkulacji atmosferycznej. Przyczynia się to do wzrostu temperatury powietrza i zwiększenia parowania, co powoduje zmiany w bilansie wodnym, m.in. w odpływie rzek (Wrzeński i in., 2022).

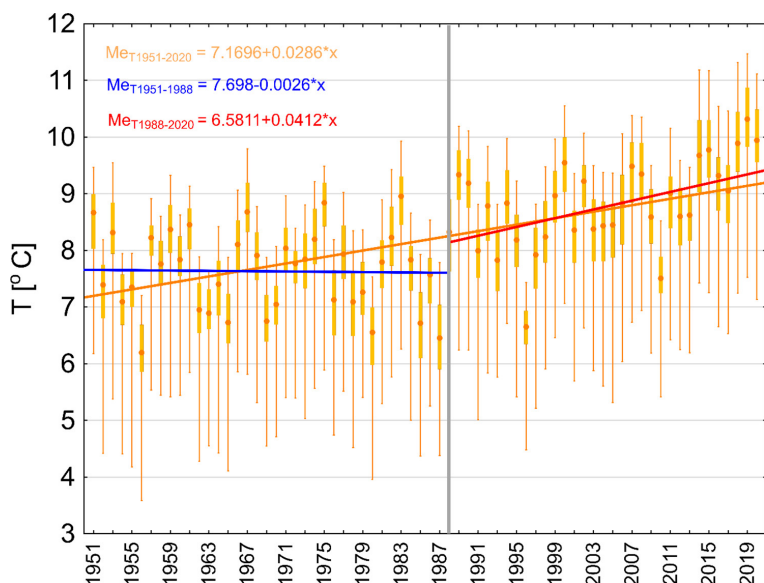


Ryc. 7. Zmiany frekwencji anomalii rocznych poszczególnych makrotypów cyrkulacji środkowotroposferycznej (W, E i C) w latach 1951–2020, według klasyfikacji Wangengejma-Girsa. Makroforma W – adwekcja z kierunku zachodniego, makroformy południkowe: E – adwekcja z kierunku południowego, C – adwekcja z kierunku północnego

Źródło: opracowanie własne na podstawie Marsz i in. (2021), Wrzeński i in. (2022).

Temperatura powietrza w latach 1951–1988 wykazała ujemny, statystycznie nieistotny trend malejący (ryc. 8). W latach 1987–1989 doszło do zmiany epok cyrkulacyjnych z E na W. W konsekwencji wyraźnie zmieniły się charakterystyki temperatury powietrza, a jej trend w latach 1988–2020 był dodatni i istotny statystycznie ($p < 0,01$). Należy się spodziewać, że obserwowana zmiana temperatury powietrza prowadzić będzie do przekształceń środowiska hydrologicznego – sposobu zasilania rzek, wielkości odpływu i zasobów wód powierzchniowych oraz struktury bilansu wodnego Polski. W różnych warunkach środowiskowych zmiany te mogą charakteryzować się odmiennymi przestrzennymi i czasowymi prawidłowościami (Brzezińska i in., 2023; Wrzeński, Brzezińska, 2023). Potwierdzają

to także badania trendów przepływów, które wskazują na silny składnik losowy, niewielkie zmiany i brak przestrzennych prawidłowości (Jokiel, Kożuchowski, 1989; Piniewski i in., 2018). Celowe zatem wydaje się ustalenie stopnia niepewności cech reżimu odpływu rzek w Polsce w warunkach ocieplenia klimatu z wykorzystaniem miar wynikających z teorii entropii informacji Shannona. W pracy przedstawiono zarówno przestrzenne, jak i czasowe zróżnicowanie entropii rozkładu odpływu w cyklu rocznym oraz ustalono jej zmiany i ich statystyczną istotność w okresie ocieplenia, w latach 1988–2020, w porównaniu z okresem poprzedzającym (1951–1988).



Ryc. 8. Zakres i tendencje zmian temperatury powietrza w latach 1951–2020 oraz w okresie przed ociepleniem (1951–1988) i po (1988–2020)

Źródło: opracowanie własne na podstawie Wrześniński, Brzezińska (2023).

W latach 1951–2020 przestrzenne zróżnicowanie entropii rozkładu odpływów miesięcznych nawiązuje do typologii reżimu polskich rzek. Najniższą entropią rozkładu odpływów miesięcznych i dużą jego koncentracją wyróżniają się rzeki o silnie wykształconym reżimie niwalnym płynące w północno-wschodniej części kraju, m.in. w zlewni Narwi z Bugiem i Biebrzą oraz rzeki Pojezierza Wielkopolskiego. Stosunkowo niską niepewnością cechuje się też sezonowy rozkład odpływu rzek górskich o reżimie złożonym niwalno-pluwialnym i pluwialno-niwalnym. Najbardziej wyrównanymi odpływami w roku, czego przejawem są wysokie wartości entropii, oprócz dużych rzek (Wisła, Odra, Warta), charakteryzuje się większość rzek pojeziernych. Skrajnie wysokie wartości entropii

($E_R > 99\%$) typowe są dla rzek o słabo wykształconym reżimie niwalnym (rzeki przymorskie i pojezierne). Na znaczenie entropii rozkładu odpływów miesięcznych w czasie jako miary charakteryzującej reżim hydrologiczny rzek wskazują wcześniejsze ustalenia stwierdzające istnienie statystycznie istotnych związków korelacyjnych między wysokością entropii rozkładu odpływu w roku a takimi charakterystykami reżimu, jak współczynnik zmienności przepływów dobowych i udział odpływu podziemnego w odpływie całkowitym (Wrzeziński 2013a, 2016). Rzeki o dużej zmienności przepływów wyróżniają się niewielką entropią rozkładu odpływu, a zatem jego silniejszą koncentracją w roku. Z kolei rzeki o dużym udziale odpływu podziemnego w odpływie całkowitym i małej zmienności przepływów charakteryzują się wyższą entropią rozkładu, co przejawia się bardziej wyrównanym i równomiernie rozłożonym odpływem w cyklu rocznym (Wrzeziński, 2013a).

W okresie ocieplenia klimatu po roku 1988 zmieniła się entropia rozkładu odpływu w cyklu rocznym, przy czym zmiana ta ma odmienny charakter w dorzeczu Wisły i Odry. W dorzeczu Wisły wyraźnie dominuje (86% przekrojów wodowskazowych) wzrost niepewności i wyrównanie rozkładu odpływu rzek. W prawie połowie przypadków wzrost entropii jest statystycznie istotny i obserwowany głównie na prawych, wschodnich dopływach Wisły. Z kolei w większości (61%) badanych przekrojów wodowskazowych zlokalizowanych na rzekach w dorzeczu Odry stwierdzono spadek entropii rozkładu odpływu. Jednak istotny statystycznie spadek niepewności rozkładu wykazał odpływ tylko kilku rzek – Bobru, Kwisy, Czarnego Potoku i Czernej Wielkiej oraz Nysy Kłodzkiej po Bystrzycę Kłodzką i Flinty na Pojezierzu Wielkopolskim.

Przyczyną zróżnicowania zmian niepewności rozkładu odpływu może być obserwowane po roku 1988 przestrzenne zróżnicowanie zmian wysokości odpływu i jego struktury (Brzezińska i in., 2023; Wrzeziński, Brzezińska, 2023). Po roku 1988 doszło do znacznego wzrostu temperatury powietrza i niewielkich zmian wysokości i sezonowego rozkładu opadów atmosferycznych. W okresie ocieplenia klimatu w przypadku wielu polskich rzek wzrósł odpływ zimowy i jego udział w odpływie całkowitym oraz zmniejszyły się wysokość i udział odpływu wiosennego i letniego. Najbardziej istotne zmiany stwierdzono na rzekach w północno-wschodniej części kraju. Ponieważ wpływ ocieplenia klimatu na odpływ polskich rzek szczególnie wyraźnie zaznacza się w sezonie wiosennym i zimowym, będzie to miało istotne oddziaływanie na formowane w tych sezonach zasoby wodne Polski i strukturę bilansu wodnego (Jokiel, Kożuchowski, 1989; Gutry-Korycka, Boryczka, 1990; Jokiel, 2004; Gutry-Korycka i in., 2014). Zastosowana w pracy miara entropii informuje o sezonowości odpływu i może być wykorzystana do ustalenia stopnia jej zmian, a zatem pośrednio także zmian reżimu odpływu. Uzyskane wyniki wskazują, że ocieplenie klimatu może skutkować powstaniem nowych wzorców sezonowego rozkładu odpływu polskich rzek i transformacji

ich reżimu, którego typologia przeprowadzana jest z uwzględnieniem rodzaju zasilania i w oparciu o miesięczne współczynniki przepływu oraz zmienność przepływów (Dynowska, 1994; Wrześniński, 2017). Największych zmian należy spodziewać się w przypadku rzek o reżimie niwalnym, zwłaszcza reżimie niwalnym silnie wykształconym oraz reżimach złożonych niwalno-pluwialnym i pluwialno-niwalnym. Możliwe zmiany wzorców sezonowości odpływu stwierdzono już wcześniej w kontekście zmian intensywności makroskalowych typów cyrkulacji, np. Oscylacji Północnoatlantyckiej (Wrześniński, 2021) i cyrkulacji termohalinowej (Wrześniński i in., 2019). Wzrost temperatury w sezonie letnim, a w konsekwencji wzrost strat na parowanie oraz zmniejszenie odpływu skutkować też będzie wydłużeniem okresów niżówkowych i ich pogłębieniem, na co wskazali Tomaszewski (2007, 2012), Marsz i in. (2022, 2023) oraz Wrześniński i in. (2022), co z kolei spowoduje spadek niepewności i wzrost regularności terminu pojawiania się niskich przepływów.

LITERATURA

- Barberis C., Molnar P., Claps P., Burlando P. (2003). Hydrologic similarity of river basins through regime stability. *Working Paper, 03*. Dipartimento Di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico Di Torino.
- Brzezińska W., Wrześniński D., Świątek S. (2023). Wpływ ocieplenia klimatu na odpływ rzek w Polsce w latach 1951–2020. *Geoprzeźrenie*, 7: 59–74. Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań.
- Chou C.M. (2012). Applying multiscale entropy to the complexity analysis of rainfall-run-off relationships. *Entropy*, 14: 945–957. <https://doi.org/10.3390/e14050945>
- Dynowska I. (1994). Reżim odpływu rzecznego, plansza 32,3 Odpływ rzeczny. W: *Atlas Rzeczypospolitej Polskiej*. Warszawa: IGiPZ PAN, Główny Geodeta Kraju.
- Faiz M.A., Liu D., Fu Q., Wrześniński D., Muneer 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 Meteorol. *Atmos. Phys.*, 131: 127–136. <https://doi.org/10.1007/s00703-017-0553-6>
- Fan J., Huang Q., Chang J., Sun D., Cui S. (2013). Detecting Abrupt change of streamflow at Lintong Station of Wei River. *Math. Probl. Eng.*, 976591. <https://doi.org/10.1155/2013/976591>
- 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.
- Garbaczewski P. (2006). Differential Entropy and Dynamics of Uncertainty. *J. Statist. Phys.*, 123: 314–355. <https://doi.org/10.1007/s10955-006-9058-2>
- Gutry-Korycka M., Boryczka J. (1990). Long-term changes in water balance elements in Poland and the Baltic Sea basin. *Przegląd Geofizyczny*, 35: 19–32.
- Gutry-Korycka M., Sadurski A., Kundzewicz Z.W., Pociask-Karteczka J., Skrzypczyk L. (2014). Zasoby wodne a ich wykorzystanie. *Nauka*, 1: 77–98.

- Ilunga M. (2017). Assessing catchment resilience using entropy associated with mean annual runoff for the Upper Vaal catchment in South Africa. *Entropy*, 19: 147. <https://doi.org/10.3390/e19050147>
- Ilunga M. (2018). Cross Mean Annual Runoff Pseudo-Elasticity of Entropy for Quaternary Catchments of the Upper Vaal Catchment in South Africa. *Entropy*, 20: 281. <https://doi.org/10.3390/e20040281>
- Ilunga M. (2019). Shannon Entropy for Measuring Spatial Complexity Associated with Mean Annual Runoff of Tertiary Catchments of the Middle Vaal Basin in South Africa. *Entropy*, 21: 366. <https://doi.org/10.3390/e21040366>
- Ilunga M., Singh V.P. (2015). Measuring spatial variability of land use associated with hydrological impact in urbanized quaternary catchment using entropy. *Water SA*, 41: 41–54. <https://doi.org/10.4314/wsa.v41i1.7>
- Jokiel P. (2004). *Zasoby wodne środkowej Polski na progno XXI wieku*. Łódź: Wydawnictwo UŁ.
- Jokiel P., Kożuchowski K. (1989). Zmiany wybranych charakterystyk hydroklimatycznych Polski w bieżącym stuleciu. *Dokumentacja Geograficzna IGI PZ PAN*: 1–94.
- 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: 673. <https://doi.org/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: 991. <https://doi.org/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. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(01\)00355-9](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(01)00355-9)
- Kim J.B., Bae Y.D., Park B.J., Kim J.H. (2007). *Evaluation of the soundness of the rain gauge network in the Soyang-dam basin*. Proceedings of the Korea Water Resources Association Annual Conference, Korea, 17 May 2007, s. 178–182.
- 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*. Łódź, s. 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*. Łódź, s. 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. *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 13: 217–226. <https://doi.org/10.9798/KOSH-AM.2013.13.2.217>

- Markiewicz I., Bogdanowicz E., Kochanek K. (2020). On the Uncertainty and Changeability of the Estimates of Seasonal Maximum Flows. *Water*, 12: 704. <https://doi.org/10.3390/w12030704>
- Marsz A.A., Matuszko D., Styszyńska A. (2022). The thermal state of the North Atlantic and macro-circulation conditions in the Atlantic-European sector, and changes in sunshine duration in Central Europe. *International Journal of Climatology*, 42: 748–761. <https://doi.org/10.1002/joc.7270>
- Marsz A.A., Styszyńska A. (2021a). Inercja rocznego odpływu całkowitego rzek Polski względem międzyrocznej zmienności przebiegu elementów klimatycznych. *Badania Fizjograficzne*, 72: 159–179. <https://doi.org/10.14746/bfg.2021.12.9>
- Marsz A.A., Styszyńska A. (2021b). Zmiany usłonecznienia rzeczywistego w Polsce i ich przyczyny (1966–2018). *Prace Geograficzne*, 165: 23–52. <https://doi.org/10.4467/20833113PG.21.008.14585>
- 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. <https://doi.org/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. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.11.020>
- Pan S., Liu D., Wang Z., Zhao Q., Zou H., Hou Y., Liu P., Xiong L. (2017). Runoff responses to climate and land use/cover changes under future scenarios. *Water*, 9: 1–475. <https://doi.org/10.3390/w9070475>
- 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>
- 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. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(199705\)11:6<587::AID-HYP479>3.0.CO;2-P](https://doi.org/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*. Springer: Berlin/Heidelberg, Germany.
- Tomaszewski E. (2007). Maksymalny czas trwania głębokich niżówek letnich w środkowej Polsce i jego uwarunkowania. *Acta Universitatis Lodzianensis, Folia Geographica Physica*, 8: 89–98.

- Tomaszewski E. (2012). Pora koncentracji suszy hydrologicznej w zlewniach nizinnych. *Monografie Komisji Hydrologicznej PTG*, 18, 2: 41–56.
- Wrzesiński D. (2010). Przestrzenne zróżnicowanie stabilności reżimu odpływu rzek europejskich. *Studia i Prace z Geografii i Geologii*, 3: 1–220. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Wrzesiński D. (2013a). Entropia odpływu rzek w Polsce. *Studia i Prace z Geografii i Geologii*, 33: 1–204. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Wrzesiński D. (2013b). Uncertainty of flow regime characteristics of rivers in Europe. *Quaestiones Geographicae*, 32(1): 49–59. DOI 10.2478/quageo-2013-0006
- Wrzesiński D. (2014). Niepewność ustroju odpływu rzek w Polsce. *Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN*, 20, 2: 189–201.
- Wrzesiński D. (2016). Use of entropy in the assessment of uncertainty of river runoff regime in Poland. *Acta Geophysica*, 64(5): 1825–1839. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0073>
- Wrzesiński D. (2017). Reżimy rzek Polski. W: P. Jokieli, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.), *Hydrologia Polski*. Warszawa: PWN, s. 215–221.
- Wrzesiński D. (2021). Flow Regime Patterns and Their Changes. W: M. Zeleňáková, K. Kubiak-Wójcicka, A.M. Negm (red.), *Management of Water Resources in Poland*. Springer, s. 163–180.
- Wrzesiński D., Brzezińska W. (2023). Sezonowa struktura odpływu rzek w Polsce w warunkach ocieplenia klimatu. W: D. Wrzesiński, R. Graf, W. Brzezińska (red.), *Naturalne i antropogeniczne zmiany obiegu wody. Badania interdyscyplinarne. Studia i Prace z Geografii*, 98: 101–115. Poznań: Bogucki Wydawnictwo Naukowe.
- Wrzesiński 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. <https://doi.org/10.3390/w14182780>
- Wrzesiński 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. <https://doi.org/10.3390/w11081622>
- Wrzesiński D., Sobkowiak L. (2018). Detection of changes in flow regime of rivers in Poland. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 66, 1: 55–64. <https://doi.org/10.1515/johh-2017-0045>
- Zhang L., Singh V.P. (2012). Bivariate rainfall and runoff analysis using entropy and Copula theories. *Entropy*, 14: 1784–1812. <https://doi.org/10.3390/e14091784>
- Zhu Q., Shen L., Liu P., Zhao Y., Yang Y., Huang D., Wang P., Yang J. (2015). Evolution of the water resources system based on synergetic and entropy theory. *Pol. J. Environ. Stud.*, 24: 2727–2738. <https://doi.org/10.15244/pjoes/59236>
- Żmudzka E. (2002). O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. *Wiadomości. Instytut Meteorologii i Gospodarki Wodnej*, 25(46), 4: 23–38.

Załącznik 1. Zestawienie badanych rzek i podstawowe charakterystyki hydrologiczne. Numeracja zgodna z ryc. 1

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1951-2020}$ [dm ³ s ⁻¹ km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R)			ΔE_R^R [%]	Typ reżimu
						1951–2020	1951–1988	1988–2020		
1	Odra	Chałupki	4666	8,95	-6,94	91,75	91,59	92,02	0,43	4
2	Odra	Racibórz	6744	9,54	-7,30	92,90	92,87	93,02	0,15	4
3	Odra	Ścinawa	29584	5,99	-16,81*	95,97	96,12	95,82	-0,29	4
4	Odra	Cigacice	40106	5,41	-13,32*	96,14	96,40	95,82	-0,58	2
5	Odra	Połęcko	47370	5,30	-14,33*	96,44	96,65	96,19	-0,46	2
6	Odra	Słubice	53600	5,52	-13,01*	96,64	96,94	96,28	-0,66	2
7	Odra	Gozdowice	109729	4,66	-12,02*	97,24	97,41	97,02	-0,39	2
8	Sumina	Nęcza	94,4	6,12	-22,23*	94,22	94,24	94,15	-0,10	4
9	Nysa Kłodzka	Bystrzyca Kłodzka	260	14,80	-10,11	90,47	91,63	89,24	-2,39*	4
10	Nysa Kłodzka	Kłodzko	1084	11,57	0,09	93,67	94,21	93,09	-1,12	4
11	Nysa Kłodzka	Nysa	3276	8,83	-15,33*	94,26	94,06	94,49	0,44	4
12	Nysa Kłodzka	Skorogoszcz	4514	7,92	-20,22*	94,67	94,79	94,53	-0,26	4
13	Bystrzyca Dusznicka	Szalejów Dolny	175	11,99	-3,59	94,87	95,08	94,65	-0,44	2
14	Ścinawka	Tłumaczów	256	8,87	0,70	91,81	92,29	91,29	-1,00	2
15	Ścinawka	Gorzuchów	511	8,71	-15,45*	92,37	92,14	92,73	0,58	4
16	Biała Głuchołaska	Głuchołazy	283	17,19	-4,30	93,95	93,76	94,30	0,54	4
17	Bystrzyca	Krasków	683	6,53	-8,23	89,69	90,68	88,65	-2,03	4
18	Piława	Mościsko	291	5,47	-16,41	89,35	89,19	89,63	0,43	4
19	Strzegomka	Łażany	356	6,28	-8,38	94,72	94,17	95,44	1,27	4

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1,95 2020}$ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R)		ΔE_R [%]	Typ reżimu	
						1951–2020	1951–1988	1988–2020		
20	Barycz	Osetno	4579	3,22	-17,79	89,73	90,50	88,78	-1,72	3
21	Bóbr	Żagań	4254	8,74	-13,97*	94,88	95,15	94,61	-0,53	4
22	Kamienica	Barcinek	97,2	12,36	-2,97	89,82	90,73	88,76	-1,97	2
23	Kwisa	Nowogrodzic	736	9,73	-4,61	93,52	94,28	92,58	-1,70*	4
24	Czarny Potok	Mirsk	55,9	15,68	-5,53	92,43	94,32	90,34	-3,98*	4
25	Czerna Wielka	Żagań	896	4,72	-21,33*	95,78	96,54	94,94	-1,60*	2
26	Warta	Działoszyn	4088	5,89	-15,71*	97,27	97,49	97,02	-0,47	2
27	Warta	Sieradz	8140	5,43	-12,13*	97,15	97,09	97,24	0,15	2
28	Warta	Poznań	25126	3,95	-9,46	96,02	95,21	96,94	1,73*	2
29	Warta	Skwierzyna	31268	3,91	-10,76	96,13	95,44	96,91	1,47*	2
30	Warta	Gorzów Wlkp.	52186	3,94	-11,52	97,23	97,01	97,48	0,47	2
31	Oleśnica	Niechmierz	592	4,02	-15,40	90,68	91,05	90,24	-0,82	3
32	Grabia	Grabno	811	5,08	-8,82	91,85	92,32	91,33	-1,00	3
33	Ner	Dąbie	1712	5,76	-11,67	94,98	94,96	95,06	0,11	2
34	Prosna	Mirków	1255	3,99	-15,44*	93,88	94,18	93,57	-0,61	2
35	Prosna	Piwnice	2938	3,78	-11,88	92,79	92,80	92,82	0,01	2
36	Prosna	Bogusław	4304	3,62	-14,81	92,76	92,79	92,78	-0,01	2
37	Niesób	Kuźnica Skakawska	246	3,93	-5,76	92,18	91,93	92,56	0,63	3
38	Ołobok	Ołobok	447	3,51	-15,71	88,40	88,81	87,98	-0,84	3
39	Mogilnica	Konojad	663	2,45	-9,18	85,63	85,88	85,43	-0,45	3
40	Wetna	Pruśce	1130	2,93	-22,86	91,74	91,28	92,27	0,98	3
41	Flinta	Ryczywół	276	2,35	-15,44	88,66	90,05	87,19	-2,86*	3

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1,95;2020}$ [dm ³ s ⁻¹ km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R) 1951–2020 1951–1988 1988–2020	ΔE_R [%]	Typ reżimu
42	Sama	Szamotuły	395	2,64	-15,59	89,25 89,77 88,69	-1,08	3
43	Noteć	Nowe Drezdenko	15970	4,54	-9,99*	98,42 98,48 98,33	-0,15	2
44	Gwda	Piła	4704	5,71	-2,10	98,74 98,90 98,56	-0,33	1
45	Drawa	Drawsko Pomorskie	609	6,63	-2,89	95,68 95,43 95,97	0,55	2
46	Ina	Goleniów	2163	5,88	5,59	96,22 96,21 96,25	0,03	2
47	Rega	Trzebiatów	2628	7,59	-7,90	97,49 97,54 97,40	-0,14	2
48	Parsęta	Tychówko	896	9,17	-4,90	97,15 97,23 97,05	-0,18	2
49	Wieprza	Stary Kraków	1519	10,37	1,11	98,66 98,61 98,72	0,11	1
50	Słupia	Słupsk	1450	10,73	-1,92	99,23 99,21 99,26	0,05	1
51	Łupawa	Smoldzino	805	10,33	3,80	99,45 99,43 99,49	0,06	1
52	Wisła	Skoczów	297	20,33	-0,19	88,69 89,45 87,87	-1,58	4
53	Wisła	Goczałkowice	738	12,08	-0,08	87,67 87,54 87,99	0,45	5
54	Wisła	Jawiszowice	971	13,51	-1,57	90,79 90,44 91,34	0,90	5
55	Wisła	Bieruń Nowy	1748	12,11	0,46	93,22 92,70 93,93	1,23	4
56	Wisła	Jagodniki	12058	10,60	-8,59	94,88 94,99 94,82	-0,17	4
57	Wisła	Szczucin	23901	9,75	-2,26	94,78 94,78 94,85	0,07	4
58	Wisła	Sandomierz	31846	9,03	-1,99	94,59 94,46 94,81	0,35	4
59	Wisła	Zawichost	50732	8,30	-6,39	94,51 94,17 94,96	0,79	4
60	Wisła	Annopol	51518	8,30	-5,00	94,68 94,39 95,08	0,68	4
61	Wisła	Dęblin	68234	7,23	-4,51	95,25 94,88 95,73	0,85	4
62	Wisła	Toruń	181033	5,31	-8,95	96,05 95,49 96,75	1,25*	2
63	Wisła	Tczew	194376	5,30	-7,56	96,58 96,15 97,11	0,95*	2

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1951,2020}$ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R)			ΔE_R [%]	Typ reżimu
						1951-2020	1951-1988	1988-2020		
64	Iłownica	Czechowice-Dziedzice	194	15,53	-8,32	91,06	91,91	90,27	-1,64	5
65	Soła	Oświęcim	1386	15,00	2,09	88,74	90,02	87,35	-2,67*	4
66	Skawa	Sucha Beskidzka	468	16,11	10,92	91,85	93,13	90,48	-2,65*	4
67	Skawa	Wadowice	836	14,74	-1,67	91,81	92,83	90,75	-2,08*	4
68	Raba	Proszówki	1470	11,31	-2,34	89,61	89,85	89,19	-0,67	4
69	Dunajec	Krościenko	1580	20,13	7,31	92,57	92,35	92,93	0,59	5
70	Dunajec	Nowy Sącz	4341	14,99	7,17	92,62	92,12	93,32	1,20	4
71	Poprad	Muszyna	1514	11,60	8,81	92,45	92,08	93,03	0,95	4
72	Poprad	Stary Sącz	2071	12,07	5,94	92,54	92,24	93,04	0,80	4
73	Biała	Koszyce Wielkie	957	9,21	8,91	88,47	87,98	89,10	1,12	4
74	Nida	Brzegi	2259	5,62	-10,62	94,92	94,63	95,26	0,62	2
75	Nida	Pińczów	3352	5,33	-14,17	94,98	94,51	95,54	1,03	2
76	Czarna Nida	Tokarnia	1216	5,43	-7,18	94,12	94,15	94,12	-0,04	2
77	Czarna	Połaniec	1354	4,73	-19,32*	92,62	90,62	94,89	4,27*	3
78	Wisłoka	Żółków	581	12,20	11,09	87,06	87,58	86,46	-1,12	4
79	Ropa	Klęczany	483	12,90	16,25*	90,24	88,78	91,94	3,16*	4
80	Brzeźnica	Brzeźnica	484	6,74	-3,92	89,60	88,10	91,41	3,31*	4
81	San	Lesko	1614	17,60	8,87	91,82	91,27	92,56	1,29	4
82	San	Przemysł	3686	14,11	4,74	92,51	91,64	93,61	1,98	4
83	San	Jarosław	7041	9,91	-4,66	92,76	91,77	93,99	2,22	4
84	San	Radomyśl	16824	7,66	2,06	93,86	92,91	95,02	2,11*	4
85	Ośława	Zagórz	505	16,14	3,05	89,38	89,31	89,51	0,20	4

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1,95 2020}$ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R) 1951–2020	1951–1988	1988–2020	$\frac{\Delta E_R}{E_R}$ [%]	Typ reżimu
86	Wiar	Krówniki	789	8,01	4,52	88,20	88,13	88,40	0,27	4
87	Wisznia	Nienowice	1185	5,66	-16,26	88,51	86,53	90,97	4,44*	4
88	Wisłok	Krosno	596	10,39	9,04	87,80	87,67	87,90	0,23	4
89	Wisłok	Żarnowa	1427	9,11	9,43	89,37	88,93	89,85	0,92	4
90	Wisłok	Rzeszów	2086	8,34	7,41	90,18	90,03	90,39	0,36	4
91	Wisłok	Trynca	3516	7,22	6,87	91,57	90,85	92,40	1,55	4
92	Mleczka	Gorliczyna	529	5,49	14,41	88,54	87,28	90,11	2,83	4
93	Tanew	Harasiuki	2034	6,01	-5,08	95,15	94,26	96,29	2,04*	2
94	Kamienna	Wąchock	476	6,11	-18,15*	91,97	91,92	92,04	0,11	2
95	Wieprz	Zwierzyniec	405	5,08	-4,90	98,70	98,41	99,05	0,64*	1
96	Wieprz	Krasnystaw	3001	4,12	7,12	97,51	96,69	98,49	1,80*	2
97	Wieprz	Lubartów	6364	3,54	-2,48	96,99	96,13	98,05	1,91*	2
98	Wieprz	Kośmin	10231	3,59	-2,12	96,29	95,45	97,34	1,89*	2
99	Bystrzyca	Sobianowice	1265	3,98	-3,25	98,35	97,86	98,96	1,10*	2
100	Pilica	Przedbórz	2536	5,90	-17,98*	96,52	96,41	96,65	0,24	2
101	Pilica	Nowe Miasto	6717	5,29	-16,90*	96,90	96,75	97,06	0,32	2
102	Pilica	Białobrzegi	8664	5,09	-13,24*	96,77	96,50	97,11	0,61	2
103	Czarna	Dąbrowa	941	6,25	-10,39	94,48	94,19	94,82	0,63	2
104	Wolbórka	Zawada	616	4,36	-9,65	95,21	95,24	95,24	0,00	2
105	Drzewiczka	Odrzywół	1004	5,29	-21,27*	96,16	95,95	96,45	0,50	2
106	Narew	Narew	1978	4,63	-15,08*	91,40	88,48	94,82	6,34*	3
107	Narew	Suraż	3376	4,42	-9,56	91,33	89,25	93,76	4,50*	3

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1951/2020}$ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R)		ΔE_R [%]	Typ reżimu	
						1951–2020	1951–1988	1988–2020		
108	Narew	Strękowa Góra	7181	4,48	-8,71	93,28	92,07	94,72	2,65*	3
109	Narew	Wizna	14308	4,71	-2,51	93,60	92,81	94,49	1,68	3
110	Narew	Piątnica–Łomża	15296	4,79	-3,83	93,64	92,80	94,62	1,82*	3
111	Narew	Nowogród	20106	4,83	-4,84	95,20	94,58	95,93	1,35*	3
112	Narew	Ostrołęka	21862	4,94	-7,37	95,25	94,63	96,00	1,36*	3
113	Narewka	Narewka	590	4,97	-19,27*	89,37	88,56	90,45	1,90	3
114	Supraśl	Fasty	1817	4,86	2,00	96,89	96,82	97,00	0,18	2
115	Biebrza	Sztabin	846	5,44	-12,93	90,28	89,38	91,34	1,96	3
116	Biebrza	Dębowo	2322	5,30	-2,47	92,24	91,11	93,53	2,42*	3
117	Biebrza	Osowiec	4365	5,07	-1,16	92,87	92,82	92,97	0,15	3
118	Biebrza	Burzyn	6900	5,01	6,72	93,65	93,58	93,74	0,16	3
119	Brzozówka	Karpowicze	650	4,89	-12,84	91,14	90,49	91,97	1,49	3
120	Pisa	Ptaki	3562	5,76	-10,34	98,16	98,07	98,30	0,23	1
121	Pisa	Dobrylas	4061	5,78	-11,94	98,15	98,00	98,35	0,36	2
122	Rozoga	Myszyniec	231	4,92	-9,82	91,11	90,26	92,17	1,90	2
123	Omulew	Krukowo	1265	5,39	-18,21*	97,16	97,07	97,30	0,23	2
124	Orzyc	Krasnosielc	1268	4,51	-15,90*	91,69	91,12	92,42	1,30	2
125	Bug	Włodawa	14410	3,82	0,30	92,83	90,61	95,51	4,90*	3
126	Bug	Frankopol	31336	3,74	-4,81	93,32	91,56	95,47	3,92*	3
127	Bug	Wyszków	39119	3,89	-8,72	93,24	91,59	95,24	3,65*	3
128	Włodawka	Okuninka	576	3,70	-8,94	88,88	88,24	89,75	1,51	3
129	Krzna	Małowa Góra	3128	3,43	3,73	91,63	90,51	93,02	2,51*	3

Lp.	Rzeka	Przekrój	A [km ²]	$q_{1951,2020}$ [dm ³ ·s ⁻¹ ·km ⁻²]	Δq [%]	Entropia rozkładu odpływu (E_R)		ΔE_R [%]	Typ reżimu	
						1951–2020	1951–1988	1988–2020		
130	Nurzec	Boćki	556	4,25	-18,26*	91,19	90,34	92,25	1,91	3
131	Nurzec	Brańsk	1227	4,02	-19,79*	88,81	87,38	90,36	2,98*	3
132	Liwiec	Łochów	2466	4,25	-9,55	90,66	89,32	92,28	2,96*	3
133	Rawka	Kęszyce	1191	4,02	-15,93*	97,61	97,66	97,55	-0,10	2
134	Skrwa	Parzeń	1534	3,96	-8,88	90,64	90,84	90,39	-0,45	3
135	Drwęca	Nowe Miasto Lubawskie	2725	5,99	-6,33	97,48	97,28	97,72	0,45	2
136	Drwęca	Brodnica	3526	6,10	-5,13	97,86	97,84	97,90	0,05	2
137	Drwęca	Elgiszewo	4959	5,51	-9,12	97,68	97,70	97,67	-0,03	2
138	Wel	Kuligi	764	6,54	-7,74	98,46	98,36	98,61	0,25	1
139	Brda	Tuchoła	2462	7,88	-5,63*	99,25	99,33	99,16	-0,17	1
140	Wda	Czarna Woda	940	6,68	-9,08*	99,11	98,71	99,57	0,86*	1
141	Wierzyca	Brody Pomorskie	1544	5,55	-10,69*	97,65	97,19	98,19	1,00*	2
142	Łyna	Sępapol	3647	6,71	-8,86	95,77	95,54	96,04	0,49	2
143	Guber	Prosna	1568	5,44	-9,89	88,66	88,39	89,08	0,68	2
144	Gołdapa	Banie Mazurskie	548	8,46	-4,05	91,26	90,30	92,37	2,07*	3
145	Czarna Hańcza	Czerwonny Folwark	454	8,33	-9,04	98,20	97,96	98,49	0,52	2

Objaśnienia: A – powierzchnia zlewni; q – odpływ jednostkowy; Δq – zmiana odpływu jednostkowego w okresie ocieplenia; ΔE_R – zmiana entropii rozkładu odpływu w okresie ocieplenia; * – 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

Źródło: opracowanie własne na podstawie danych IMGW-PIB.