

# UWARUNKOWANIA TERMICZNO-OPADOWE ORAZ HYDROLOGICZNE W OBSZARZE NATURA 2000 PUSZCZA BIAŁOWIESKA W KONTEKŚCIE POSTĘPUJĄCEJ ZMIANY KLIMATU

**Thermal, precipitation and hydrological conditions in the Natura 2000  
Puszcza Białowieska area in the context of ongoing climate change**

GRZEGORZ WAŁEK<sup>1</sup> , ROMAN SULIGOWSKI<sup>1</sup> 

**Zarys treści.** Artykuł przedstawia zmianę warunków termicznych i opadowych w obszarze Natura 2000 Puszcza Białowieska oraz zróżnicowanie odpływu w dwóch ciekach (Narewka, Leśna) przepływających przez ten teren. Analiza przebiegu wybranych elementów klimatu oraz charakterystyk hydrologicznych bazowała na wieloletnich (minimum 60-letnich) ciągach obserwacyjnych. Wyniki badań wskazują na: wzrost średniej rocznej i sezonowych temperatur powietrza, rosnącą tendencję rocznej liczby dni upalnych oraz rocznych sum opadu, wyraźny wzrost średnich rocznych wartości wskaźnika natężenia opadów, a także malejącą liczbę dni z pokrywą śnieżną. Zmianie ulegają również cechy reżimu rzek. Obserwuje się w nich tendencję spadkową średnich rocznych i miesięcznych (z wyjątkiem stycznia i lutego) przepływów, przesunięcie wiosennej kulminacji przepływów, a także przyspieszenie występowania letnich niżówek. Zjawiska te są niekorzystne z punktu widzenia stabilności ekosystemów i zbiorowisk roślinnych funkcjonujących w zasięgu badanego obszaru Natura 2000.

**Słowa kluczowe:** zmiana klimatu, odpływ rzeczny, zlewnie leśne, Puszcza Białowieska

**Abstract.** The paper presents changes in thermal and precipitation conditions in the Puszcza Białowieska Natura 2000 area and the differences in river runoff in two streams (Narewka, Leśna) flowing through this area. The analysis of the course of selected climate elements and hydrological characteristics was based on long-term (minimum 60-year) observation sequences. The research results indicate: an increase in the average annual and seasonal air temperatures, a growing trend in the annual number of hot days and annual precipitation totals, a clear increase in the average annual values of the precipitation intensity index and a decreasing number of days with snow cover. The features of the river regime are also changing. A downward trend in average annual and monthly (except January and February) runoff, a shift in the spring culmination of runoff, and an acceleration of the occurrence of summer low flows are observed. These phenomena are unfavorable from the point of view of the stability of ecosystems and plant communities within the studied Natura 2000 area.

**Key words:** climate change, river outflow, forest catchments, Puszcza Białowieska

## Wstęp

Skutki aktualnie występującej zmiany klimatu są odnotowywane w wielu opracowaniach naukowych dotyczących zagadnień hydrograficznych oraz gospodarowania wodą (Stagl i in. 2014; Koop, van Leeuwen 2015; Vetter i in. 2017; Yang i in. 2021), również w Polsce (Majewski, Walczykiewicz 2012; Kundzewicz 2014; Osuch, Roma-

nowicz 2014; Kundzewicz i in. 2018; Chojnacka-Ożga, Lorenc 2019; Wrześniński 2021; Marcinkowski i in. 2022; Marsz i in. 2022). Wpływ zmiany klimatu na uwarunkowania hydrologiczne w obszarze Natura 2000 Puszcza Białowieska (PLC200004) jest jednak dość słabo rozpoznany w literaturze przedmiotu. Dotychczasowe badania ograniczały się bowiem jedynie do zasięgu Białowieskiego Parku Narodowego. Wodami płynącymi i ich charakterystykami zajmowali się Wróbel

<sup>1</sup> Uniwersytet Jana Kochanowskiego w Kielcach, Instytut Geografii i Nauk o Środowisku, ul. Uniwersytecka 7, 25-406 Kielce; e-mail: grzegorz.walek@ujk.edu.pl, ORCID: 0000-0002-6310-2173; roman.suligowski@ujk.edu.pl, ORCID: 0000-0001-8947-324X

i in. (2016) oraz Wróbel (2018), natomiast zbiornikami wodnymi Bielecka i in. (2006) oraz Tyszka i in. (2011). Sporo uwagi poświęcono zjawisku susz hydrologicznych na analizowanym obszarze – głównie w kontekście ich wpływu na siedliska przyrodnicze i gatunki będące przedmiotami ochrony (Kaznowska 2006; Ciepeliowski, Kaznowska 2007; Radzka 2014; Boczoń i in. 2018; Hejduk i in. 2021; Boczoń 2022). Badania jakości wód powierzchniowych prowadzone były przez Miniuka (1998), Skorbiłowicza i in. (2008), Chomutowską i Wilamowskiego (2014) oraz Janek (2016). Odrębną grupę badań stanowiły opracowania dotyczące charakterystyki wód podziemnych (Obmiński 1960; Boczoń 2002, 2008; Pierzgałski i in. 2002). Uwarunkowania i zmienność klimatu w obszarze badań była przedmiotem rozważań Olszewskiego (1986), Olszewskiego i in. (2003), Boczonina (2006) oraz Malzahn i in. (2014, 2018).

Cennym źródłem informacji o środowisku wodnym obszaru badań są ekspertyzy i opracowania hydrologiczne wykonane na potrzeby planu ochrony Białowieskiego Parku Narodowego (Pierzgałski i in. 2010; Ksepko i in. 2021; Grygoruk i in. 2022). Analiza hydrograficzna była istotną częścią dwóch dokumentów: „Propozycja działań renaturyzacyjnych w korycie rzeki Narewki na odcinku Białowieża (granica państwa)–Narewka oraz rzeki Łutowni” opracowanego na zlecenie Polskiego Towarzystwa Ochrony Ptaków (Grygoruk i in. 2021) oraz „Wdrażanie małej retencji w Puszczy Białowieskiej w świetle zapisów planu zadań ochronnych Natura 2000 dla obszaru Puszcza Białowieska PLB200004 oraz przegląd istniejących urządzeń piętrzących” opracowanego przez Fundację Dzika Polska (Bohdan i in. 2019).

Celem badań było określenie wieloletnich charakterystyk termiczno-opadowych oraz hydrologicznych w zlewniach rzecznych odwadniających obszar Natura 2000 Puszcza Białowieska w aspekcie obserwowanej zmiany klimatu. Jest to szczególnie cenne w kontekście ich wpływu na funkcjonowanie siedlisk przyrodniczych i gatunków będących przedmiotem ochrony na analizowanym obszarze.

## Obszar badań

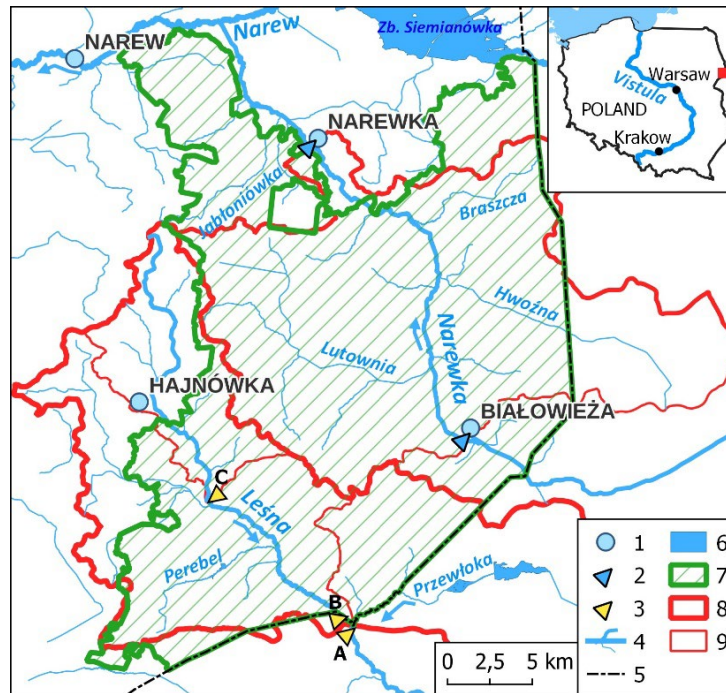
Obszar Natura 2000 Puszcza Białowieska leży w północno-wschodniej Polsce, w obrębie klimatu umiarkowanego kontynentalnego chłodnego, z wpływami klimatu atlantyckiego (Okołowicz, Martyn 1979). W bardziej szczegółowym podziale

klimatycznym Polski (Wiszniewski, Chełchowski 1987) teren ten usytuowany jest w strefie przejściowej pomiędzy mazursko-białostockim a mazowiecko-podlaskim regionem klimatycznym.

Dominujący udział powierzchni leśnych na badanym terenie (96,7%) wpływa łagodząco na zmienność poszczególnych elementów klimatu. W odróżnieniu od bezleśnych terenów sąsiednich w rejonie Białowieży obserwuje się stosunkowo małe wahania temperatury powietrza (wyższe minima, niższe maksima), zwiększoną wilgotność powietrza, wydłużony okres zalegania pokrywy śnieżnej i mniejszą sumę opadu (Stopa-Boryczka i in. 2013). Olszewski (1986) stwierdził, że średnia temperatura powietrza w okresie zimowym oraz jej roczna amplituda są podobne do panujących w południowej Finlandii lub polskich górach na wysokości 700 m n.p.m.

Obszar Natura 2000 Puszcza Białowieska leży w dorzeczu Narwi i odwadniany jest przez dwie główne rzeki: Narewkę i Leśną (rys. 1). Część północna leży prawie w całości w obszarze zlewni tej pierwszej (III rząd) – lewobrzeżnego dopływu Narwi, a część południowa – w zlewni rzeki Leśnej (IV rząd). Ta ostatnia jest nazywana także Leśną Prawą, która odpływa na terytorium Białorusi, gdzie po połączeniu z rzeką Leśną Lewą tworzy prawostronny dopływ Bugu. Zlewnie Narewki oraz Leśnej są na ogół równinne o dobrze uformowanych terasach zalewowych, w większości przykrytych torfami. Powierzchnia zlewni Narewki po przekrój wodowskazowy Narewka wynosi 609,8 km<sup>2</sup>, powierzchnia zlewni Leśnej po przekrój zlokalizowany na granicy Polski i Białorusi (tzw. przekrój graniczny – wraz ze zlewnią Przewłoki) wynosi 411,9 km<sup>2</sup>. Wody gruntowe występują tu zwykle płytko (0–2 m) i są związane hydraulicznie z wodami Narewki i Leśnej Prawej oraz w ich dopływów (Kaznowska 2006).

Najdłuższe ciek przepływające w zasięgu badanego obszaru to Narewka (25,7 km), Leśna (20,1 km), Łutownia (18,6 km), Braszcza (12,4 km), Perebel (12,1 km) i Jabłoniówka (9,5 km). Poza siecią naturalnych, stałych cieków (o łącznej długości 274,4 km i gęstości 0,43 km·km<sup>-2</sup>) istotną rolę odgrywa tu gęsta sieć cieków epizodycznych, rowów technicznych i melioracyjnych (całkowita długość – 1695,1 km; gęstość – 2,68 km·km<sup>-2</sup>), prowadzących wodę jedynie okresowo, które miejscami wzajemnie się przecinają (Ksepko i in. 2021). Wody stojące stanowią jedynie 0,05% powierzchni analizowanego obszaru. Największym zbiornikiem o łącznej powierzchni 14,7 ha jest zbiornik Topiło. Poza zbior-



Rys. 1. Lokalizacja zlewni i przekrojów wodowskazowych w obszarze Natura 2000 Puszcza Białowieska  
 1 – posterunek opadowy IMGW, 2 – posterunek wodowskazowy IMGW, 3 – przekroje pomiarowe rzeki Leśnej (A – graniczny, B – do Przewłoki, C – do Chwiszczej), 4 – rzeki, 5 – granica państwa, 6 – zbiorniki wodne, 7 – obszar Natura 2000 Puszcza Białowieska, 8 – zasięg zlewni Narewki i Leśnej, 9 – zasięg zlewni różnicowych

Location of catchments and gauging stations in the Natura 2000 Puszcza Białowieska area  
 1 – IMGW rain station, 2 – IMGW water gauge station, 3 – measurement cross-sections of the Leśna River (A – to border, B – to Przewłoka, C – to Chwiszczej), 4 – rivers, 5 – national border, 6 – water bodies, 7 – Natura 2000 area Puszcza Białowieska, 8 – Narewka and Leśna catchments, 9 – range of differential catchments

nikami istnieje tu duża powierzchnia terenów podmokłych, występujących w obniżeniach terenu. Zajmują one aż około 232 km<sup>2</sup>, to jest prawie 37% obszaru Natura 2000 Puszcza Białowieska.

## Material i metody opracowania

Podstawowe charakterystyki klimatyczne obszaru badań określono na podstawie danych meteorologicznych (temperatury powietrza: średniej rocznej i półrocznych oraz średniej dobowej <0°C, liczby dni upalnych, liczby dni z pokrywą śnieżną) zaobserwowanych na stacji klimatologicznej w Białowieży w latach hydrologicznych 1951–2022. W zasięgu lub bezpośrednim sąsiedztwie analizowanego terenu znajduje się aktualnie sześć posterunków opadowych zlokalizowanych w Hajnówce, Narwi, Narewce, Nowosadach, Bondarach i Zamoszu (Hydro 2023). Niestety, ze względu na zbyt krótkie ciągi pomiarowe lub duże luki obserwacyjne w kilku z nich, w analizie uwzględniono sumy miesięczne i roczne opadu pochodzące z posterunków Hajnówka i Narew z wielolecia 1951–2022. Dodatkowo w opracowaniu wykorzysta-

tano dane pluwiograficzne zarejestrowane na stacji synoptycznej w Białymstoku (1966–2022). Na ich podstawie wyznaczono wskaźnik natężenia opadów ( $P_n$ ), wyrażany jako stosunek całkowitej sumy opadu do skumulowanego czasu jego trwania.

Charakterystyki odpływu oszacowano dla dwóch zlewni: Narewki i Leśnej. W tej pierwszej wykorzystano dane pochodzące z dwóch wodowskazów: w Białowieży (lata hydrologiczne: 1961–2021) oraz Narewce (1950–2020). Z kolei Leśna nie jest kontrolowana hydrometrycznie, ale jej zlewnia bezpośrednio sąsiaduje ze zlewnią Narewki i jej zasoby wodne oszacowano w oparciu o korelacje wynikające z zastosowania analogii hydrologicznej, powszechnie stosowanej w praktyce (Byczkowski, Mandes 1993), przyjmując identyczną wartość średniego odpływu jednostkowego dla obu zlewni. Obliczenia wykonano w przekrojach: na granicy z Białorusią, do Przewłoki i do Chwiszczej.

Zasoby wodne badanych zlewni określono za pomocą średniego przepływu  $SQ$  (m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>) oraz średniego odpływu jednostkowego  $Sq$  (dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>·km<sup>-2</sup>). Są to wielkości, które najdokład-

niej określają wielkość zasobów wodnych, w tym również tych, które są możliwe do zagospodarowania (Michalczyk 2017). Obliczono również przepływy charakterystyczne główne II stopnia (w  $\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ) w wieloleciu: WWQ – wysoki wielki, SWQ – średni wysoki, SSQ – średni ze średnich, SNQ – średni niski, NNQ – najniższy niski. Na ich podstawie obliczono charakterystyczne odpływy jednostkowe (w  $\text{dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$ ).

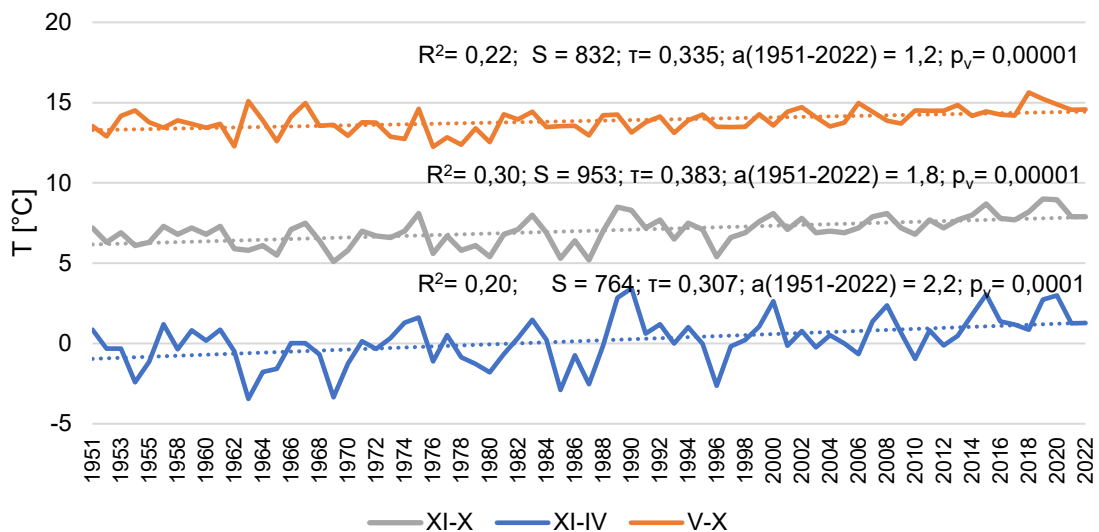
Do wykrycia i zbadania istotności tendencji zmian w szeregach czasowych charakterystyk meteorologicznych oraz hydrologicznych zastosowano regresję liniową oraz test istotności trendu Manna-Kendalla (Hamed 2008). Wyznaczono w nim statystykę S, nieparametryczny współczynnik korelacji ( $\tau$ ), a w sytuacji wystąpienia tendencji określono jej zmianę przy pomocy współczynnika kierunkowego ( $a$ ) wyrażonego estymatorem Sena. Jako istotną przyjmowano zmianę na poziomie istotności powyżej 99% (statystyka testowa  $p_v < 0,01$ ). Do wykonania obliczeń wykorzystano pakiet statystyczny R w wersji 4.3.3 (R Core Team 2017).

## Wyniki

### Uwarunkowania klimatyczne – temperatura powietrza

Na stacji meteorologicznej w Białowieży w wieloleciu 1951–2022 stwierdzono zwiększanie się zarówno średniej rocznej, jak i półrocznych temperatur powietrza (rys. 2). Test Manna-Kendalla wykazał tendencje na bardzo wysokim poziomie istotności 99,9%. W całym analizowanym okresie nastąpił tu znaczący wzrost średniej rocznej temperatury o  $1,8^\circ\text{C}$ . Jeszcze większy wzrost obliczono dla półrocza zimowego (o  $2,2^\circ\text{C}$ ), natomiast w półroczu letnim wyniósł on  $1,2^\circ\text{C}$ . Warto zauważyć, że począwszy od 2013 roku średnia temperatura powietrza w półroczu zimowym była większa od  $0^\circ\text{C}$  (rys. 2).

Potwierdzeniem uzyskanych wyników jest graficzna reprezentacja 30-letniej średniej ruchomej rocznej temperatury powietrza, która wzrosła z  $6,5^\circ\text{C}$  – w okresie 1951–1980 do  $7,4^\circ\text{C}$  – w okresie 1991–2020, a więc o  $0,9^\circ\text{C}$  (rys. 3). Na wzrost

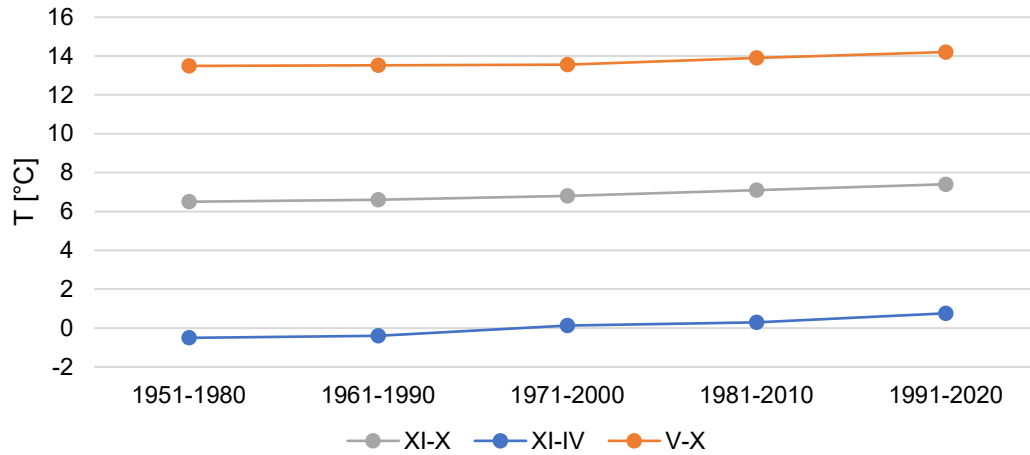


Rys. 2. Średnia roczna i średnie półroczne temperatury powietrza na stacji meteorologicznej w Białowieży w latach 1951–2022

$R^2$  – współczynnik determinacji, S – statystyka testu Manna-Kendalla,  $\tau$  – współczynnik korelacji rangowej Kendalla,  $a(1951-2022)$  – współczynnik kierunkowy linii trendu (w okresie 1951–2022) wyrażony estymatorem Sena,  $p_v$  – statystyka testowa

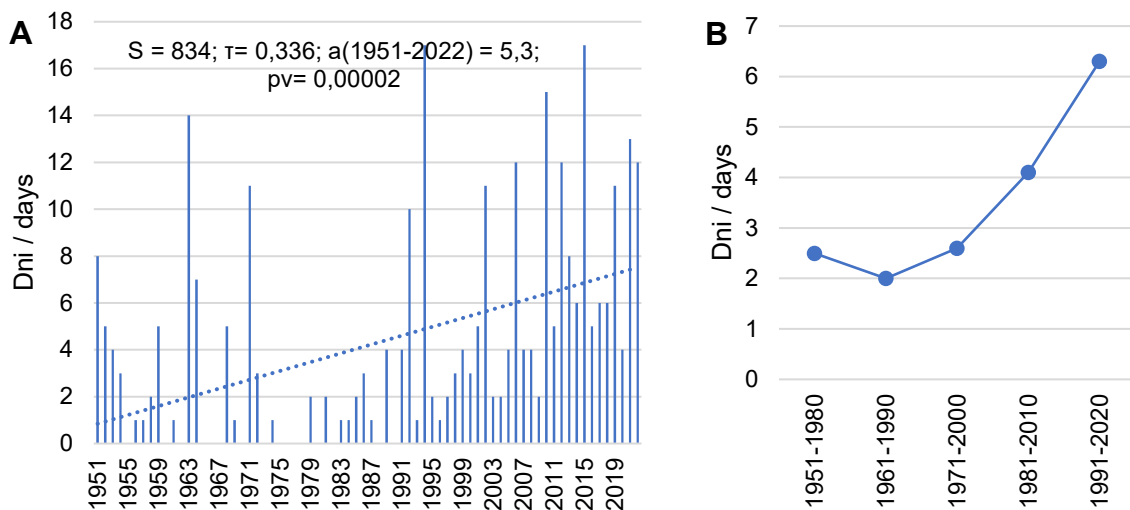
Mean annual and mean seasonal air temperatures at the meteorological station in Białowieża in the years 1951–2022

$R^2$  – coefficient of determination, S – Mann-Kendall test statistic,  $\tau$  – Kendall rank correlation coefficient,  $a(1951-2022)$  – slope of the linear trend (in period 1951–2022) – Sen's slope,  $p_v$  – probability value



Rys. 3. Średnia roczna i średnie półroczne temperatury powietrza na stacji meteorologicznej w Białowieży w kolejnych 30-letniach

Mean annual and mean seasonal air temperatures at the meteorological station in Białowieża in consecutive 30-year periods



Rys. 4. Liczba dni upalnych ( $T_{sr} > 30^{\circ}\text{C}$ ) na stacji meteorologicznej w Białowieży w latach 1951–2022 (A) oraz w kolejnych 30-letniach (B)

Objaśnienia symboli jak na Rysunku 2

Number of hot days ( $T_{sr} > 30^{\circ}\text{C}$ ) at the meteorological station in Białowieża in the years 1951–2022 (A), and in consecutive 30-year periods (B)

Explanation of symbols as in Figure 2

średniej rocznej temperatury powietrza większy wpływ miało zwiększenie wartości średniej temperatury w półroczu zimowym.

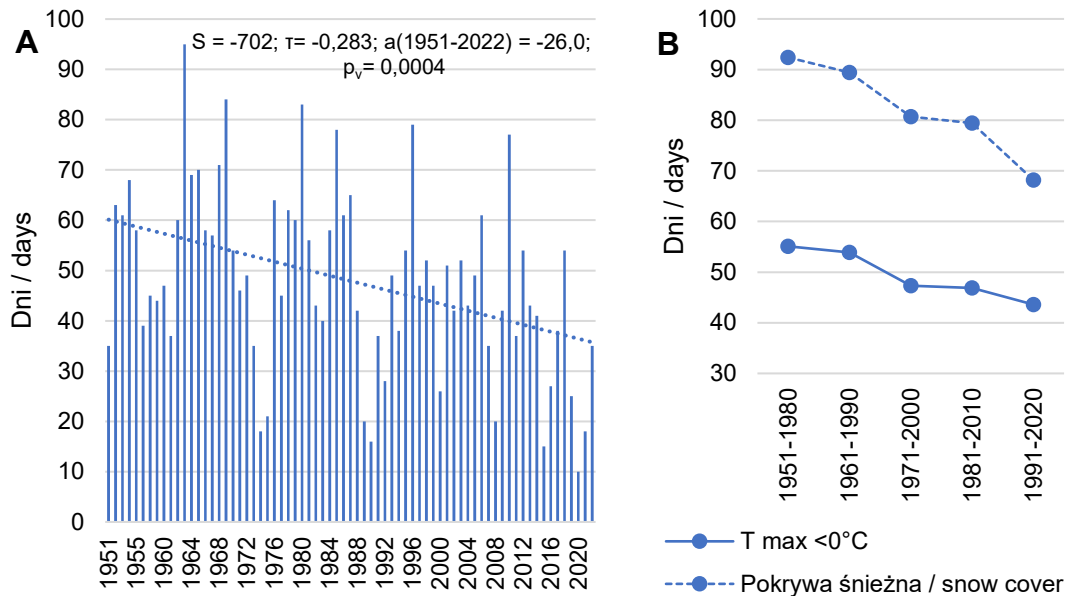
Średnia roczna liczba dni upalnych ( $T_{sr} > 30^{\circ}\text{C}$ ) w wieloleciu 1951–2022 na stacji w Białowieży wynosiła 4,2. W badanym okresie zaznaczyła się silna tendencja rosnąca tej zmiennej (poziom istotności większy od 99%), szczególnie widoczna od początku lat 90. XX wieku

(rys. 4A). Liczba dni upalnych w roku w całym wieloleciu zwiększyła się wyraźnie i według testu Manna-Kendalla wzrosła o 5,3 dnia. Wykres 30-letniej średniej ruchomej ukazuje jej wzrost od minimum wynoszącego średnio 2 dni upalne w roku w okresie 1961–1990 do 6,3 dnia w okresie 1991–2020 (rys. 4B).

Wraz z wzrostem średniej temperatury powietrza w analizowanym wieloleciu zmalała licza

ba dni w roku ze średnią dobową temperaturą powietrza  $<0^{\circ}\text{C}$  (rys. 5A). Poziom istotności zmian był większy niż 99% dla testu Manna-Kendalla, zatem można je uznać za istotne statystycznie. Analizując 30-letnią średnią ruchomą tej zmiennej, można stwierdzić, że liczba dni z temperaturą powietrza  $<0^{\circ}\text{C}$  zmniejszyła się z 55,1 w okresie 1951–1980 do 43,6 dni w okresie 1991–2020, a więc o ponad 11 dni (rys. 5B).

Obserwowany spadek liczby dni ze średnią temperaturą powietrza  $<0^{\circ}\text{C}$  potwierdza analiza 30-letniej średniej ruchomej liczby dni z pokrywą śnieżną na stacji w Białowieży, która wskazała na tendencję malejącą – od 92,4 dni w okresie 1951–1980 do 68,2 dni w okresie 1991–2020 (ryc. 5B). Wyniki te potwierdzają coraz mniejszą zdolność retencji opadu w pokrywie śnieżnej w półroczu zimowym.



Rys. 5. Liczba dni z temperaturą powietrza  $<0^{\circ}\text{C}$  na stacji meteorologicznej w Białowieży w latach 1951–2022 (A) oraz średnia liczba dni z temperaturą powietrza  $<0^{\circ}\text{C}$  i średnia liczba dni z pokrywą śnieżną w kolejnych 30-letniach (B)  
Objaśnienia symboli jak na Rysunku 2

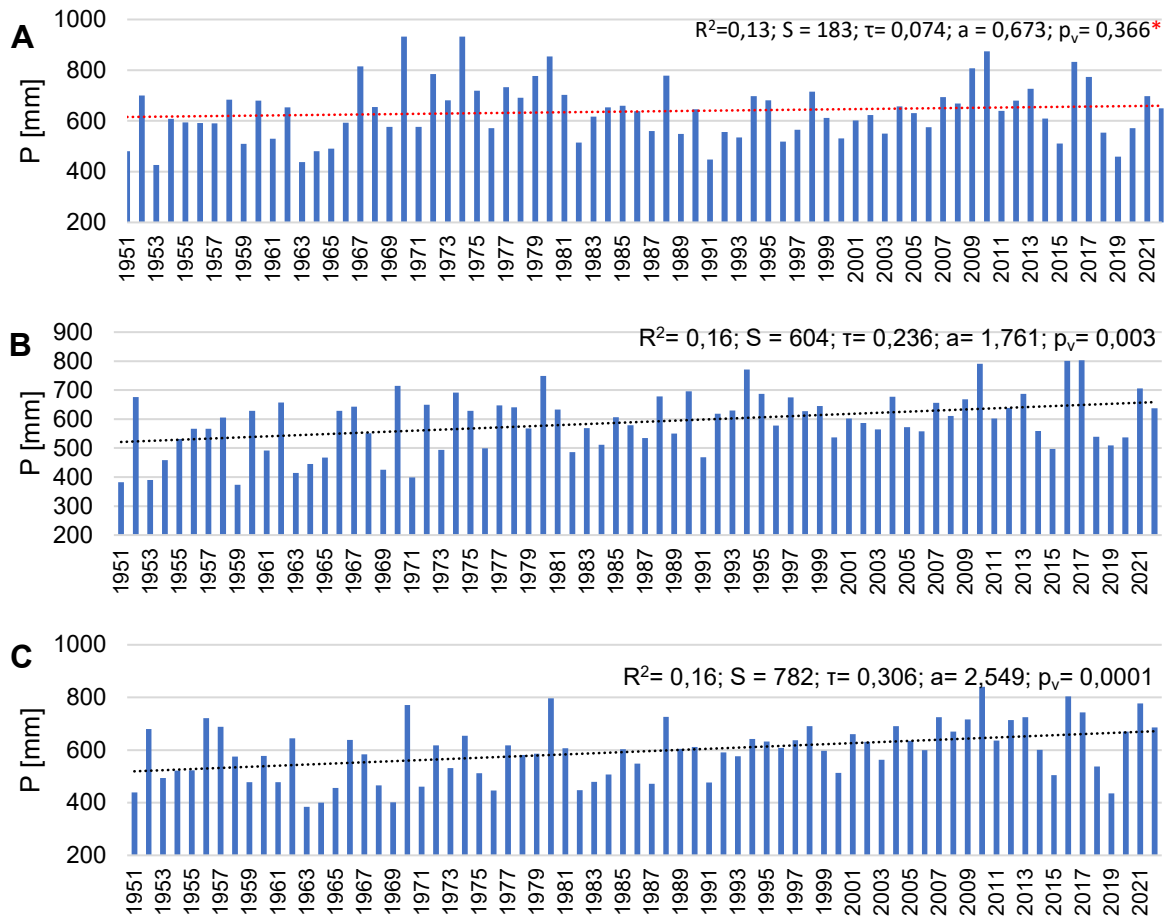
Number of days with air temperature  $<0^{\circ}\text{C}$  at the meteorological station in Białowieża in the years 1951–2022 (A) and average number of days with air temperature  $<0^{\circ}\text{C}$  and average number of days with snow cover in the consecutive 30 years periods (B)  
Explanation of symbols as in Figure 2

## Opady atmosferyczne

W wieloleciu 1951–2022 średnia roczna suma opadu zarejestrowana na posterunku opadowym w Białowieży wyniosła  $P = 637,7$  mm. W okresie 72 lat roczna suma opadu wzrosła na tej stacji o około 50 mm, ale wyniki testu Manna-Kendalla wskazują, że nie była ona istotna statystycznie (rys. 6A). Nieco niższe wartości średnich rocznych sum opadu w analizowanym wieloleciu zarejestrowano na posterunkach opadowych Hajnówka – 589,8 mm (rys. 6B) i Narew – 595,4 mm (rys. 6C), przy czym wyniki zastosowanego testu

nieparametrycznego na poziomie istotności  $\alpha = 0,01$  jednoznacznie potwierdzają trend wzrostu rocznej sumy opadu na tych posterunkach, odpowiednio o 1,8 mm oraz 2,5 mm (rys. 6B, C).

Dodatnia tendencja średnich rocznych sum opadu zaznaczyła się w obrazie graficznym 30-letniej średniej ruchomej na tych posterunkach opadowych (rys. 7). W Hajnówce jej wartość wzrastała nieprzerwanie od okresu 1951–1980 (552,8 mm) do wielolecia 1991–2020, w którym była o ponad 70 mm większa i osiągnęła 623,3 mm. Podobna tendencja zmian tej średniej wystąpiła w Narwi, gdzie średnia roczna suma



Rys. 6. Roczne sumy opadu zarejestrowane w latach 1951–2022 na posterunkach:

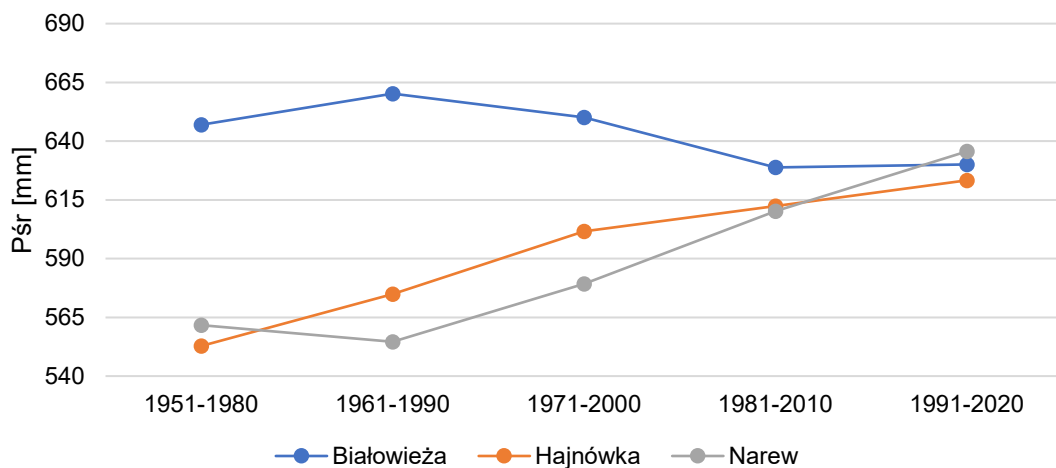
A – Białowieża, B – Hajnówka, C – Narew

Objaśnienia symboli jak na Rysunku 2. Linia czerwona oraz gwiazdka oznaczają trend nieistotny na poziomie 0,01

Annual precipitation totals recorded in the years 1951–2022 at the rainfall stations:

A – Białowieża, B – Hajnówka, C – Narew

Explanation of symbols as in Figure 2. Red line and an asterisk indicate a non-significant trend (level 0.01)



Rys. 7. Średnia roczna suma opadu na posterunkach: Białowieża, Hajnówka i Narew, w kolejnych 30-letniach

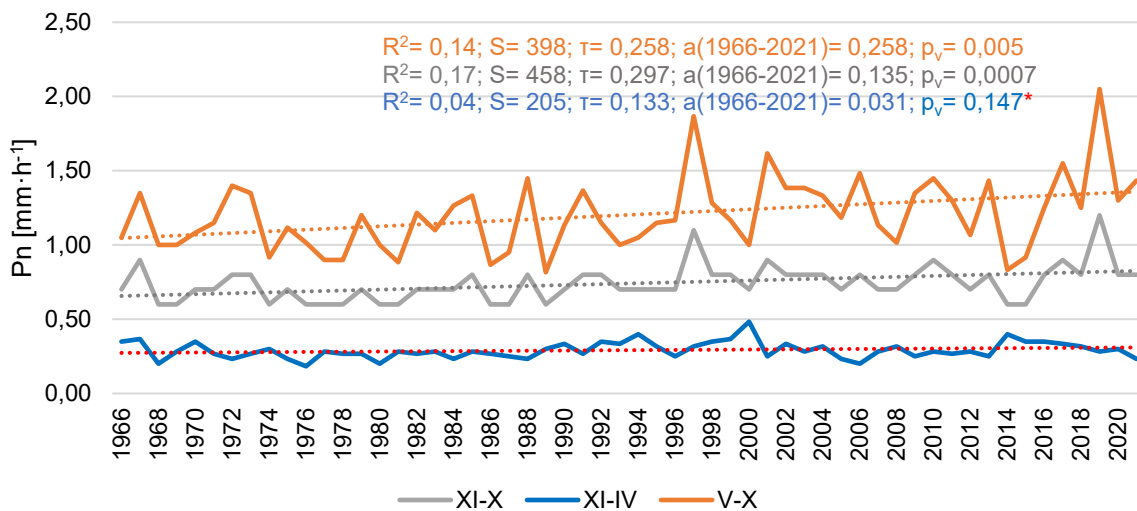
Mean annual precipitation totals at the Białowieża, Hajnówka and Narew rain stations in the consecutive 30-year periods

opadów w wieloleciu zwiększała się nieprzerwanie od okresu 1961–1990.

We wszystkich rozpatrywanych stacjach dominowały opady półrocza letniego. W Białowieży stanowiły one 62,3% średniej rocznej sumy opadu (Pśr w półroczu zimowym – 240,5 mm, w półroczu letnim – 397,8 mm), w Hajnówce – 63,3% (odpowiednio: 216,2 mm i 373,6 mm), a w Narwi – 63,6% (216,7 mm, 378,7 mm).

Analiza obliczonych wartości wskaźnika natężenia opadów (Pn) na stacji IMGW Białystok

w wieloleciu 1966–2021 wskazała, że nastąpił tu wyraźny wzrost rocznych jego wartości, istotny statystycznie na poziomie  $\alpha = 0,01$  w odniesieniu do całego roku i półrocza letniego (rys. 8). Stosunek całkowitej sumy opadu do skumulowanego czasu jego trwania w roku hydrologicznym zwiększył się w całym analizowanym wieloleciu o  $0,135 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ . Wartości wskaźnika Pn w półroczu zimowym były stabilne i nie ulegały istotnym zmianom.



Rys. 8. Wskaźnik średniego rocznego oraz półrocznego natężenia opadu (Pn) na stacji meteorologicznej w Białymstoku w latach 1966–2021

Objaśnienia symboli jak na Rysunku 2. Linia czerwona oraz gwiazdka oznaczają trend nieistotny na poziomie 0,01

Index of the mean annual and seasonal rainfall intensity (Pn) at the meteorological station in Białystok in the years 1966–2021

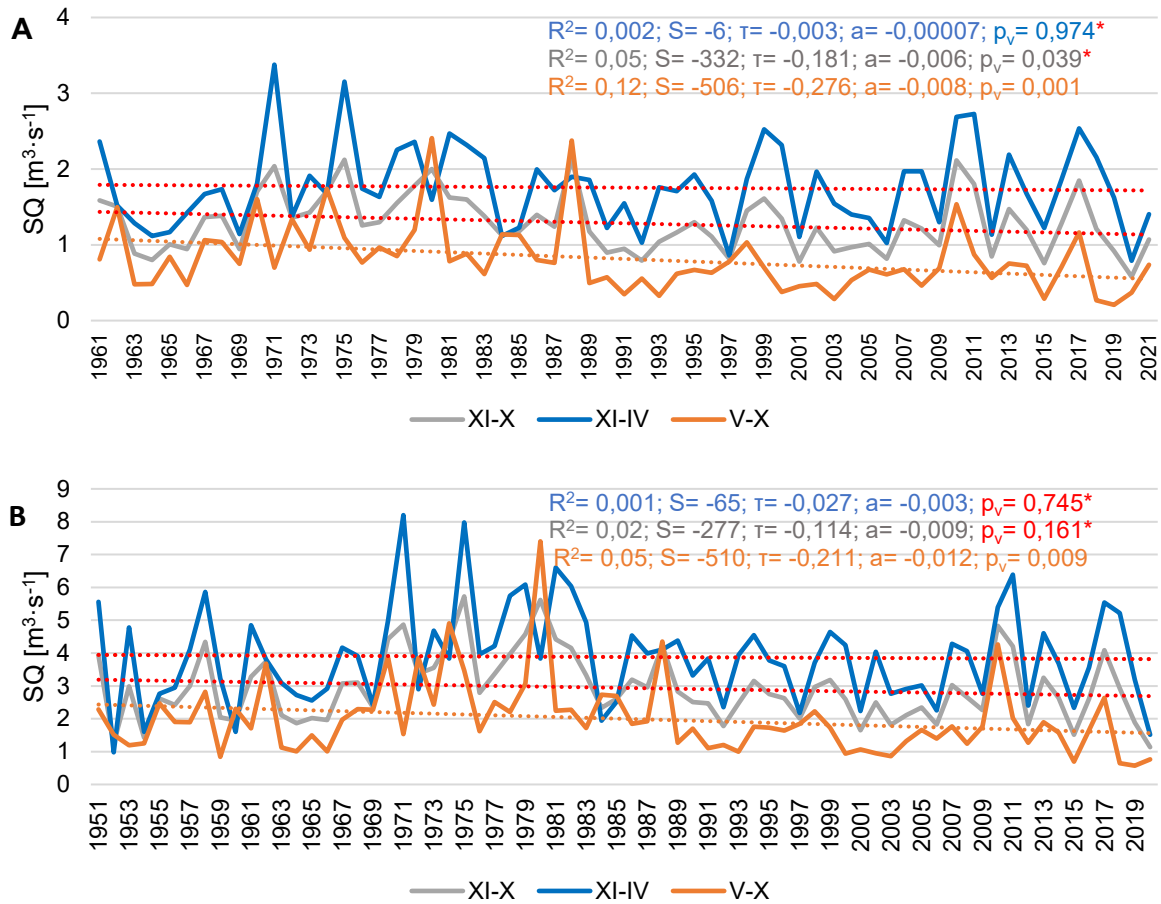
Explanation of symbols as in Figure 2. Red line and an asterisk indicate a non-significant trend (level 0.01)

## Uwarunkowania hydrologiczne

Na posterunkach wodowskazowych w Białowieży (w wieloleciu 1961–2021) oraz w Narewce (1951–2020) zaznaczyła się malejąca tendencja średnich rocznych oraz sezonowych przepływów Narewki, przy czym istotna statystycznie (na poziomie 0,01) okazała się ona jedynie w odniesieniu do szeregu przepływów w półroczu letnim (rys. 9A). Wówczas obliczony (w obu przekrojach Narewki) spadek wartości średniego rocznego przepływu wynosił w przekroju Białowieża –  $0,008 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  w ciągu roku, a w Narewce –  $0,012 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (rys. 9). Analiza 30-letniej średniej ruchomej tej charakterystyki także uwidacznia jej tendencję spadkową (rys. 10). Średni roczny prze-

pływ Narewki w Białowieży w wieloleciu zmniejszył się o około 18%: z  $1,41 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  w latach 1961–1990, do  $1,16 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  w okresie 1991–2020, natomiast w analogicznym okresie w Narewce – o 25,4% (odpowiednio:  $3,42 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  oraz  $2,55 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ). Z kolei średni przepływ w półroczu zimowym zmniejszył się w okresie 1991–2020 (w stosunku do okresu 1961–1990) o 6,1% w Białowieży i o 17,0% w Narewce, natomiast w półroczu letnim odpowiednio o: 39,2% i 40,9% (rys. 10). Niepokojącym jest fakt największego spadku wartości przepływów w półroczu letnim, a więc sezonie wegetacyjnym, co jest sygnałem zmniejszającej się objętości wody dostępnej dla roślin.



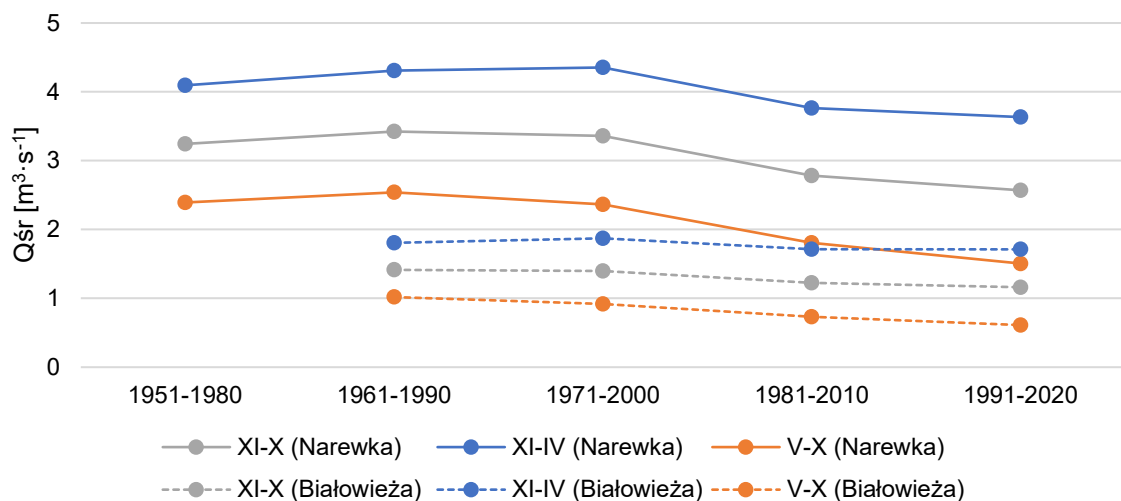


Rys. 9. Średni roczny oraz średnie półroczne przepływy Narewki w przekrojach: Białowieża w latach 1961–2021 (A) i Narewka w latach 1951–2020 (B)

Objaśnienia symboli jak na Rysunku 2. Linia czerwona oraz gwiazdka oznaczają trend nieistotny na poziomie 0,01

Mean annual and mean seasonal discharges of the Narewka outlets: Białowieża in 1961–2021(A) and Narewka in 1951–2020 (B)

Explanation of symbols as in Figure 2. Red line and an asterisk indicate a non-significant trend (level 0.01)



Rys. 10. Średnie roczne oraz średnie półroczne przepływy Narewki w przekrojach Białowieża i Narewka, w kolejnych 30-letniach

Mean annual and mean seasonal discharges of the Narewka outlets: Białowieża and Narewka in 1951–2020 in consecutive 30-year periods

Wartość przepływu średniego ze średnich rocznych (SSQ) Narewki w Białowieży wyniosła  $1,28 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a w Narewce  $2,94 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , natomiast SSq odpowiednio:  $5,62$  i  $4,82 \text{ dm}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{km}^{-2}$  (tab. 1). Są to wartości zbliżone do ustalonych przez innych autorów w zasięgu analizowanego obszaru (Stachy, Biernat 1987). Z kolei SSQ rzeki Leśnej w przekroju granicy państwa wyniósł  $2,32 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , w przekroju do ujścia Przewłoki –  $1,40 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  oraz w przekroju do ujścia

Chwiszczej –  $0,85 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (tab. 1).

Z uwagi na fakt, iż kwietniowe kulminacje SQ w obu rzekach przekraczają wartość średniego rocznego przepływu o 180%, rzeki te posiadają reżim śnieżny silnie wykształcony (Wrzesiński 2017). Najwyższe przepływy występują tam w miesiącach zimowych, natomiast miesiące letnie narażone są na występowanie niżówek (Boczoń i in. 2018).

Tabela 1

## Przepływy charakterystyczne Narewki i Leśnej

## Characteristic discharges of the Narewka River and Leśna outlets

Rzeka/ River	Przekrój (wielolecie)/ Cross-section (multiannual period)	A	WWQ	SWQ	SSQ	SNQ	NNQ	WWq	SWq	SSq	SNq	NNq
		[km <sup>2</sup> ]	[m <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ]					[dm <sup>3</sup> ·s <sup>-1</sup> ·km <sup>-2</sup> ]				
Narewka	Narewka (1951–2020)	609,8	50,70	5,90	2,94	1,49	0,22	94,46	10,68	5,62	3,03	0,18
	Białowieża (1961–2021)	227,6	21,50	2,43	1,28	0,69	0,04					
Leśna	Graniczny (zlewnia razem z Przewłoką)	411,9	38,91	4,40	2,32	1,25	0,07					
	Do Przewłoki	249,7	23,59	2,67	1,40	0,76	0,04					
	Do Chwiszczej	79,2	7,48	0,85	0,45	0,24	0,01					

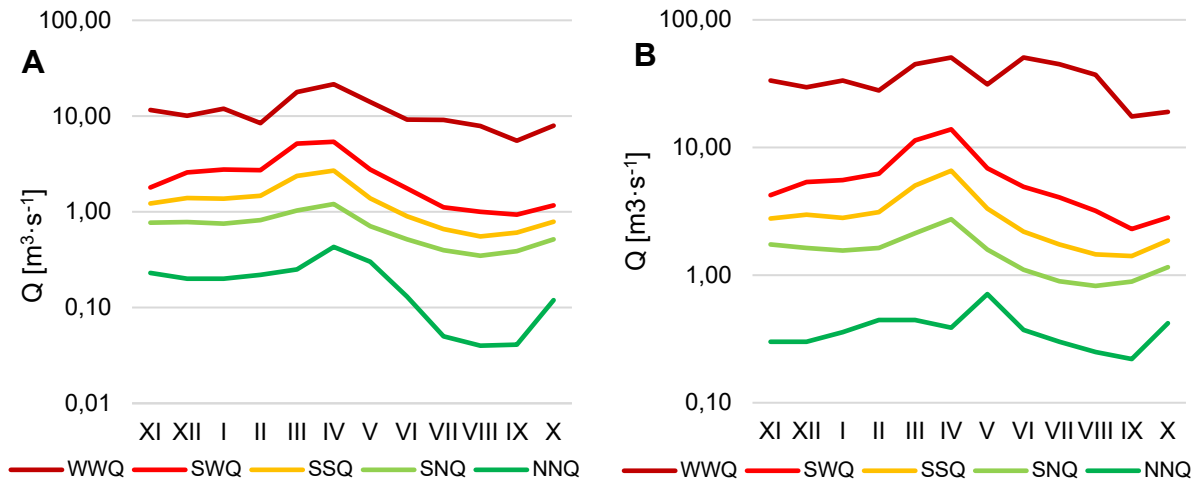
A – powierzchnia zlewni, WWQ – wysoki wielki przepływ, SWQ – średni wysoki przepływ, SSQ – średni przepływ, SNQ – średni niski przepływ, NNQ – najniższy niski przepływ, WWq – wysoki wielki odpływ jednostkowy, SWq – średni wysoki odpływ jednostkowy, SSq – średni odpływ jednostkowy, SNq – średni niski odpływ jednostkowy, NNq – najniższy niski odpływ jednostkowy

A – catchment area, WWQ – high of maximum discharge, SWQ – mean of maximum discharge, SSQ – average discharge, SNQ – mean of minimum discharge, NNQ – low of minimum discharge, WWq – high of maximum specific runoff, SWq – mean of maximum specific runoff, SSq – mean of average specific runoff, SNq – mean of minimum specific runoff, NNq – low of minimum specific runoff

Reżim hydrologiczny Narewki dobrze ilustrują wykresy miesięcznych przepływów charakterystycznych (rys. 11A, B). Wyraźnie widoczne są na nich kulminacje przepływów występujące w kwietniu, które wywołane były wiosennymi roztopami. Wtedy także obserwowano najwyższe wysokie przepływy (WWQ) – w Białowieży  $21,5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a w Narewce –  $50,7 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Najniższe niskie przepływy (NNQ) na obu posterunkach występowały w miesiącach letnich (głównie w sierpniu) oraz we wrześniu, osiągając w Białowieży  $0,04 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a w Narewce  $0,22 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ . Przepływy średnie w półroczu zimowym były na ogół dwukrotnie wyższe niż w letnim. W Białowieży

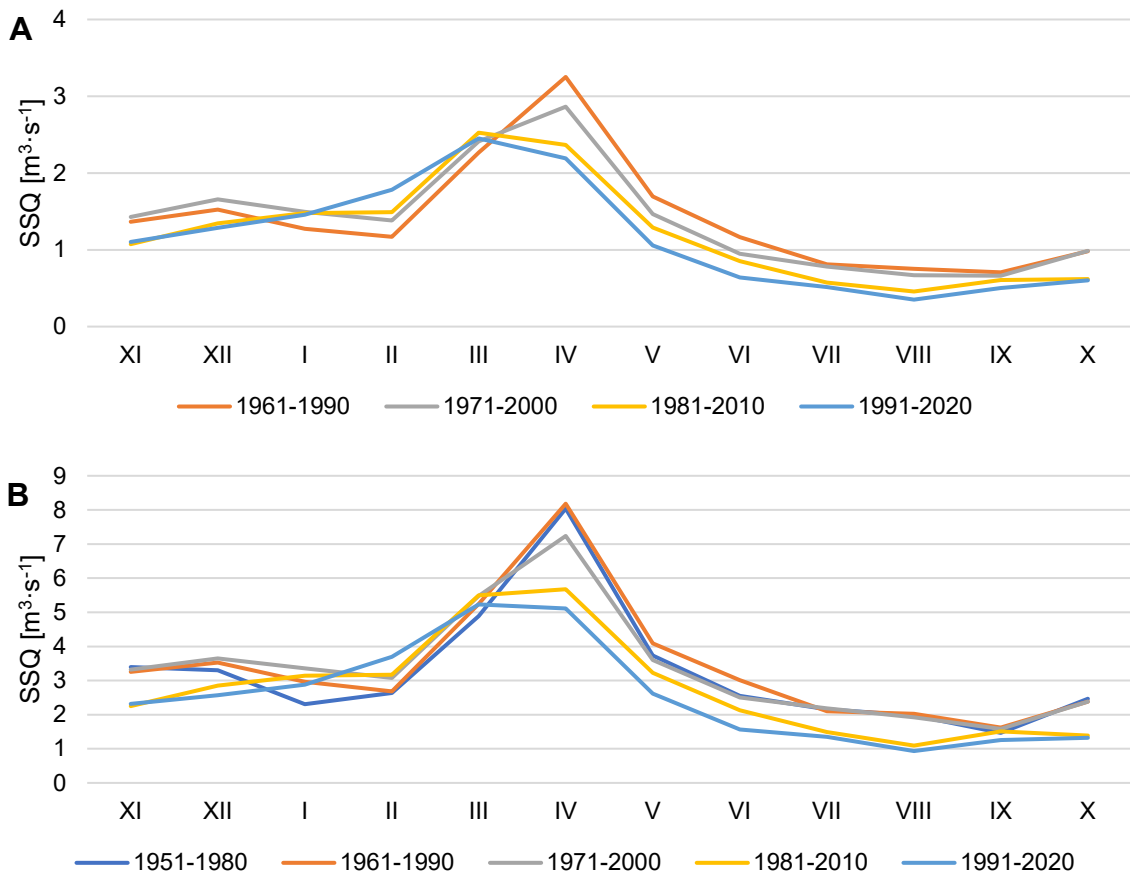
wyższe wynosiły on odpowiednio:  $1,75 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  i  $0,81 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , a w Narewce były większe:  $3,88 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  i  $2,00 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ .

Analiza 30-letniej średniej ruchomej miesięcznych wartości SSQ odzwierciedla postępujące obniżanie się przepływu rzeki Narewki niemal we wszystkich miesiącach roku na obu analizowanych posterunkach wodowskazowych (rys. 12A, B). Począwszy od wielolecia 1981–2010 wyraźne jest przesunięcie wiosennej kulminacji przepływów z kwietnia na marzec świadczące o wcześniejszym topnieniu pokrywy śnieżnej. W latach 1991–2000 wystąpił wzrost przepływów w lutym, co najprawdopodobniej spowodowane



Rys. 11. Miesięczne przepływy charakterystyczne Narewki w przekrojach: Białowieża w latach 1961–2021 (A) i Narewka w latach 1951–2020 (B)

Monthly characteristic discharges of the Narewka outlets: Białowieża in the years 1961–2021 (A) and Narewka in the years 1951–2020 (B)



Rys. 12. Średnie miesięczne przepływy (SSQ) Narewki w przekrojach: Białowieża (A) i w Narewka (B) w kolejnych 30-letniach

Mean monthly of average discharges (SSQ) of the Narewka River outlets: Białowieża (A) and Narewka (B) in consecutive 30-year periods

dowane było dodatnimi temperaturami powietrza w zlewni i roztopami śródzimowymi. Na obu posterunkach w ostatnich podokresach (1981–2010, 1991–2020) nastąpiło też dosyć wyraźne przesunięcie z września na sierpień okresu z najmniejszymi przepływami średnimi. Należy zaznaczyć, że poza styczniem i lutym wyraźne jest postępujące obniżanie się średnich przepływów w całym roku hydrologicznym.

## Dyskusja

Uzyskane wyniki w zakresie warunków termicznych obserwowanych w punktach pomiarowych w Puszczy Białowieskiej wskazują na ocieplenie klimatu na tym obszarze. Tendencja ta jest zgodna z trendami obserwowanymi w ostatnich dziesięcioleciach przez wielu klimatologów w Europie (WMO 2022) oraz w Polsce (między innymi Dęgimendź i in. 2004; Owczarek, Filipiak 2016; Graczyk i in. 2017; Kundzewicz i in. 2018). Stwierdzony w pracy wzrost średniej rocznej temperatury powietrza na stacji meteorologicznej w Białowieży o 1,8°C w wieloleciu 1951–2022 był większy niż uzyskany w pracy Boczonias i in. (2018), ale bardzo zbliżony do wartości 2,0°C ustalonej dla Polski przez Marosza i in. (2023) w podobnym wieloleciu (1951–2021). Stwierdzone tempo zmian tej charakterystyki było już znacznie większe od obliczonego dla drugiej połowy XX wieku (0,8°C) (Fortuniak i in. 2001; Kożuchowski, Żmudzka 2001) oraz istotnego statystycznie dla obszaru nizin polskich (1,2°C) w wieloleciu 1951–2010 (Wójcik, Miętus 2014). Średnia temperatura powietrza na Ziemi określona przez Międzyrządowy Panel ds. Zmian Klimatu (IPCC 2023) w dwóch pierwszych dekadach XXI wieku wzrosła o około 1,0°C (w stosunku do średniej w wieloleciu 1850–1900). Wyraźna tendencja wzrostowa średniej temperatury powietrza w półroczu zimowym w Białowieży (o 2,2°C) ma odzwierciedlenie w Raporcie IPCC (2023) oraz w wynikach badań Wójcika i Miętusa (2014), którzy stwierdzili w okresie 1951–2010 najszybsze ocieplenie w sezonie zimowym (w lutym – o 3,0°C).

Wyznaczona silna tendencja rosnąca średniej rocznej liczby dni upalnych ( $T_{sr} > 30^{\circ}\text{C}$ ) w Białowieży wynosząca 5,3 dnia w całym 72-leciu nawiązuje do wyników przedstawionych przez Wibig (2018) dotyczących obserwowanej w Polsce dodatniej tendencji w zakresie częstotliwości i natężenia fal upałów w Suwałkach oraz do udokumentowanego przez Szwed (2019) wzrostu

o 2–3 dni liczby dni z temperaturą maksymalną powyżej 30°C w latach 1991–2013 w odniesieniu do okresu 1961–1990.

Dobrym wskaźnikiem zmian klimatycznych jest pokrywa śnieżna, która jest bardzo wrażliwa na zmiany temperatury. Przeprowadzona analiza wykazała tendencję malejącą liczby dni z pokrywą śnieżną w Białowieży. Zaprezentowane zmiany dotyczące czasu jej zalegania są zgodne z tendencjami obserwowanymi na całej półkuli północnej, gdzie od początku lat 70. XX wieku długość sezonu śnieżnego skraca się o 5 dni na dekadę (Choi i in. 2010). Uzyskane wyniki potwierdzają również badania przeprowadzone w Polsce. Tomczyk i in. (2021) odnotowali istotne statystycznie zmniejszenie czasu zalegania pokrywy śnieżnej w północno-wschodniej Polsce (Suwałki) – o 4,6 dnia na dekadę (w wieloleciu 1966–2018), Falarz i Bednorz (2021) – o około 4,8 dni na dekadę (w wieloleciu 1951–2018), a Szwed i in. (2017) – o około 3 dni na dekadę w Białymstoku (w wieloleciu 1952–2013). Ostatni z cytowanych autorów wskazali na silną ujemną korelację między liczbą dni z pokrywą śnieżną, a wskaźnikiem NAO. Stosunkowo wysokie zmniejszenie czasu zalegania pokrywy śnieżnej na północnym wschodzie Polski – o 6 dni na dekadę udokumentowały Wibig i Jędruszkiewicz (2023).

Wraz ze zmianami średniej temperatury powietrza w cyklu rocznym następowały zmiany wartości sumy opadów atmosferycznych. Stwierdzona w pracy, statystycznie istotna, dodatnia tendencja wzrostu rocznych sum opadu w wieloleciu 1951–2022 na posterunkach w Hajnówce i Narwi odzwierciedla ogólną tendencję obserwowaną w identycznym 72-leciu w większości stacji Polski (Klimat Polski 2023), a szczególnie w jej północnej części (Szwed 2019). Oszacowane tempo zmian tej charakterystyki na posterunkach opadowych położonych w Puszczy Białowieskiej należało do największych w kraju. Na pozostałych stacjach klimatycznych w Polsce tempo zmian było zdecydowanie mniejsze i skutkowało wzrostem o 28,1 mm w skali 72 lat (Klimat Polski 2023). Warto zwrócić uwagę, że tendencję wzrostową rocznych sum opadów (choć nieistotną statystycznie) w tej części Polski już w II połowie XX wieku potwierdziła Żmudzka (2002). Średnia roczna suma opadu zarejestrowana na posterunku opadowym w Białowieży w okresie 1951–2022 wprawdzie wzrosła na tej stacji o około 50 mm, ale wyniki testu Manna-Kendalla wskazały, że tendencja ta nie była istotna statystycznie. Podobny wynik uzyskali Hejduk i in. (2021). Brak istotności statystycznej dla wielu stacji w Polsce w tym za-

kresie udokumentowała Łupikasza i Małarzewski (2021).

Wyraźny wzrost średnich rocznych wartości wskaźnika natężenia opadów (Pn) na stacji IMGW Białymstok, istotny statystycznie na poziomie  $\alpha = 0,01$  w odniesieniu do całego roku, wskazuje w pośredni sposób na zwiększenie się intensywności opadów. Wyraźny, bo 24% wzrost liczby dni z bardzo intensywnymi opadami atmosferycznymi (równymi lub większymi od 20 mm) na tej stacji w okresie 1991–2015 w porównaniu do lat 1961–1990 stwierdził Pińskwar i in. (2019). Dodatkowo na szybciej rosnące sumy opadów niż ich częstotliwość w Polsce północnej zwrócili uwagę Łupikasza i Małarzewski (2021). Ponadto analiza maksymalnych opadów dobowych w Polsce zaobserwowanych w latach 1959–2018 przeprowadzona przez Pińskwar (2021) potwierdza skrócenie okresów ich powtarzalności w wieloleciu 1989–2018 w porównaniu z okresem 1959–1988.

Na posterunkach wodowskazowych położonych w Puszczy Białowieskiej zaznaczyła się spadkowa tendencja średnich rocznych oraz sezonowych przepływów Narewki. Piniewski i in. (2018) stwierdzili podobną, choć słabą dominację negatywnego trendu średniego rocznego przepływu tej rzeki w dwóch wieloleciach: 1956–2016 oraz 1981–2016. Przeważające tendencje spadkowe przepływów rzek stwierdzone w niniejszym badaniu potwierdzają publikacje innych autorów dla rzek położonych na Nizinie Wschodnioeuropejskiej (na przykład Stonevicius i in. 2014; Somorowska 2017), choć trendy rosnące (statystycznie istotne na poziomie 0,05) średnich rocznych przepływów rzek w dorzeczu Narwi stwierdził Wrzesiński (2009). Mogą one jednak wynikać z przyjęcia do testowania serii przepływów pochodzących z innego wielolecia, ze zróżnicowanych powierzchniowo zlewni pozostających pod wpływem antropopresji.

Tendencja rosnąca średnich przepływów miesięcznych Narewki wystąpiła w analizowanych przekrojach rzecznych jedynie w styczniu i lutym. Trend ten został dobrze udokumentowany w rzekach tego regionu przez Stanisławczyk (2020), która wśród jego przyczyn wymienia wzrost udziału sum opadów półrocza zimowego oraz częstsze występowanie odwilży śródzimowych (Degirmendzić i in. 2004). Obserwowany wzrost wartości tych przepływów pośrednio potwierdzają wyniki badań Hejduka i in. (2021) ukazujące, że na Narewce począwszy od 2006 roku nie wystąpiły niżówki zimowe. Z kolei tendencja spadkowa średnich przepływów Narewki w miesiącach półrocza letniego może być efektem

wzrostu średniej temperatury powietrza, a w konsekwencji ewapotranspiracji, co udokumentowała dla tego regionu między innymi Radzka (2014).

## Wnioski

Wyniki badań potwierdzają postępującą zmianę warunków termicznych, opadowych oraz odpływu rzek na obszarze Natura 2000 Puszcza Białowieska. Przeprowadzona analiza pozwala na sformułowanie trzech najważniejszych wniosków dotyczących analizowanego obszaru:

- zmianę warunków termicznych odzwierciedlał wzrost średniej rocznej i sezonowych temperatur powietrza oraz silna tendencja rosnąca średniej rocznej liczby dni upalnych;
- w zakresie zasilania atmosferycznego zlewni pojawiła się dodatnia tendencja rocznych sum opadu, wyraźny wzrost średnich rocznych wartości wskaźnika natężenia opadu, a także malejąca liczba dni z pokrywą śnieżną;
- zmianie uległy cechy reżimu rzek odwadniających ten teren. Obserwowano w nich tendencję spadkową średnich rocznych przepływów, obniżenie średnich miesięcznych przepływów (z wyjątkiem stycznia i lutego), przesunięcie wiosennej kulminacji przepływów z kwietnia na marzec, a także przyspieszenie występowania minimalnych średnich przepływów z września na sierpień.

Wszystkie opisane zjawiska mogą potencjalnie wpływać niekorzystnie na stabilność ekosystemów i zbiorowisk roślinnych funkcjonujących w zasięgu obszaru Natura 2000 Puszcza Białowieska. Weryfikacja tej tezy wymaga jednak podjęcia i realizacji szczegółowych, interdyscyplinarnych badań na styku nauk o Ziemi i środowisku oraz nauk biologicznych.

## Literatura

- Bielecka J., Hardej M., Kozłowska E., Stepaniuk W. 2006. Walory przyrodnicze i hydrologiczne małych zbiorników wodnych wybudowanych w Puszczy Białowieskiej. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 6: 17-27.
- Boczoń A. 2002. Wody gruntowe Puszczy Białowieskiej w suchym 2000 roku. *Sylwan* 7: 93-105.
- Boczoń A. 2006. Charakterystyka warunków termiczno-pluwialnych w Puszczy Białowieskiej w latach 1950–2003. *Leśne Prace Badawcze* 1: 57-72.

- Boczoń A. 2008. Położenie lustra wód gruntowych w północnej części Puszczy Białowieskiej w okresie po napełnieniu zbiornika Siemianówka. *Leśne Prace Badawcze* 69(4): 355-363.
- Boczoń A. 2022. Problem suszy glebowej w lasach. W: I. Skrzecz, K. Sikora (red.) *Wpływ zmian klimatu na środowisko leśne*. Materiały z XII sesji Zimowej Szkoły Leśnej przy Instytucie Badawczym Leśnictwa, Sękocin Stary: 437-446.
- Boczoń A., Kowalska A., Ksepko M., Sokołowski K. 2018. Climate warming and drought in Białowieża Forest from 1950-2015 and their impact on the dieback of Norway Spruce stands. *Water* 19: 1502. DOI:10.3390/w10111502.
- Bohdan A., Kaźmierczak D., Książek M. 2019. Wdrażanie małej retencji w Puszczy Białowieskiej w świetle zapisów planu zadań ochronnych Natura 2000 dla obszaru Puszcza Białowieska PLB200004 oraz przegląd istniejących urządzeń piętrzących. Fundacja Dzika Polska.
- Byczkowski A., Mandes B. 1993. Obiektywna metoda oceny analogii hydrologicznej przy określaniu charakterystyk odpływu ze zlewni niekontrolowanych. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 6(1): 33-41.
- Choi G., Robinson D.A., Kang S. 2010. Changing Northern Hemisphere snow seasons. *Journal of Climate* 23(19): 5305-5310
- Chojnacka-Ożga L., Lorenc H. (red.). 2019. Współczesne problemy klimatu Polski. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa.
- Chomutowska H., Wilamowski K. 2014. Analiza czystości wód rzek Łutownia na terenie Puszczy Białowieskiej. *Inżynieria Ekologiczna* 38: 117-128.
- Ciepielowski A., Kaznowska E. 2007. A Description of Hydrological Droughts in the Białowieża Primeval Forest in the Years 2003–2005. *Geographia Polonica* 80(2): 125-136.
- Degirmendźić J., Kożuchowski K., Żmudzka E. 2004. Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951–2000 and their relationship to atmospheric circulation. *International Journal of Climatology* 24(3): 291-310. <https://doi.org/10.1002/joc.1010>.
- Falarz M., Bednorz E. 2021. Snow Cover Change. W: M. Falarz (red.) *Climate Change in Poland*. Springer Climate. Cham: 375-390. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8\\_14](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8_14).
- 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.
- Graczyk D., Pinskwar I., Kundzewicz Z.W, Hov Ø., Eirik J. Førland E.J., Szwed M., Choryński A. 2017. The heat goes on—changes in indices of hot extremes in Poland. *Theoretical and Applied Climatology* 129(1–2): 459-471. <https://doi.org/10.1007/s00704-016-1786-x>.
- Grygoruk M., Grumno D., Osuch P. 2022. Wizja renaturyzacji hydrologicznej dla Puszczy Białowieskiej. Ekspertyza hydrologiczna. Opracowano na zlecenie Ogólnopolskiego Towarzystwa Ochrony Ptaków (OTOP).
- Grygoruk M., Michałowski R., Osuch P., Stachowicz M., Trandziuk P. 2021. Propozycja działań renaturyzacyjnych w korycie rzeki Narew na odcinku Białowieża (granica państwa)–Narewka oraz rzeki Łutowni. Polskie Towarzystwo Ochrony Ptaków, Warszawa.
- Hamed K. 2008. Trend Detection in Hydrologic Data: The Mann-Kendall Trend Test under the Scaling Hypothesis. *Journal of Hydrology* 349: 350-363. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2007.11.009>.
- Hejduk L., Kaznowska E., Wasilewicz M., Hejduk A. 2021. Hydrological droughts in the Białowieża Primeval forest, Poland, in the years 1951–2020. *Forests* 12: 1744. <http://dx.doi.org/10.3390/f12121744>.
- Hydro (Serwis internetowy Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – Państwowy Instytut Badawczy). 2023. Online: [hydro.imgw.pl](http://hydro.imgw.pl) (data ostatniego dostępu: 15.10.2023).
- IPCC. 2023. Climate Change 2023. IPCC, Geneva, Switzerland. DOI:10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001.
- Janek M. 2016. Zmiany jakości wód w rzekach Łutownia i Perebel w Puszczy Białowieskiej. *Leśne Prace Badawcze* 77(4): 380-388.
- Kaznowska E. 2006. Charakterystyka susz hydrologicznych na przykładzie wybranych rzek północno-wschodniej części Polski. *Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich* 4(2): 51-59.
- Klimat Polski 2022. 2023. IMGW-PIB, Warszawa.

- wa. [https://www.imgw.pl/sites/default/files/inline-files/klimat-polski-2022\\_raport-koncowy-3.pdf](https://www.imgw.pl/sites/default/files/inline-files/klimat-polski-2022_raport-koncowy-3.pdf).
- Koop S.H.A., van Leeuwen C.J. 2015. Assessment of the Sustainability of Water Resources Management: A Critical Review of the City Blueprint Approach. *Water Resources Management* 29: 5649-5670. <https://doi.org/10.1007/s11269-015-1139-z>.
- 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.
- Ksepko M., Kolendo Ł., Boczoń A., Koźniewski M., Wojtas K., Chmur S. 2021. Opracowanie hydrologiczne dla zlewni Puszczy Białowieskiej. Biuro Urządzania Lasu i Geodezji Leśnej Oddział w Białymstoku (maszynopis).
- Kundzewicz Z. 2014. Konsekwencje zmian klimatu dla zasobów wodnych. W: K. Banasik, L. Hejduk, E. Kaznowska (red.) *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN XX: 7-16.
- Kundzewicz Z.W., Piniewski M., Mezghani A., Okruszko T., Pińskwar I., Kardel I., Hov Ø., Szcześniak M., Szwed M., Benestad R.E., Marcinkowski P., Graczyk D., Döbler A., Førland E.J., O’Keefe J., Choryński A., Parding K.M., Haugen J.E. 2018. Assessment of climate change and associated impact on selected sectors in Poland. *Acta Geophysica* 66: 1509-1523. <https://doi.org/10.1007/s11600-018-0220-4>.
- Łupikasza E., Małarzewski Ł. 2021. Precipitation Change. W: M. Falarz (red.) *Climate Change in Poland*. Springer Climate, Cham: 349-373. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8_13).
- Majewski W., Walczykiewicz T. (red.). 2012. Zrównoważone gospodarowanie zasobami wodnymi oraz infrastrukturą hydrotechniczną w świetle prognozowanych zmian klimatycznych. Wyd. IMGW-PIB, Warszawa.
- Malzahn E., Pierzgałski E., Tyszka J., Janek M., Fronczak E., Stolarek A. 2014. Zmiany warunków klimatycznych i wodnych w środowisku lasów naturalnych Puszczy Białowieskiej. Instytut Badawczy Leśnictwa (maszynopis).
- Malzahn E., Zin E., Kudlewski A., Borowski K. 2018. Ocena wpływu zmian czynników abiotycznych na środowisko lasów naturalnych Puszczy Białowieskiej. Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Lasów Naturalnych, Białowieża (maszynopis).
- Marcinkowski P., Kardel I., Płaczowska E., Giełczewski M., Osuch P., Okruszko T., Venegas-Cordero N., Ignar S., Piniewski M. 2022. A high-resolution simulated water balance and streamflow data set for 1951–2020 for the territory of Poland. *Geoscience Data Journal* 10: 195-207. <https://doi.org/10.1002/gdj3.152>.
- Marosz M., Miętus M., Biernacik D. 2023. Features of multiannual air temperature variability in Poland (1951–2021). *Atmosphere* 14: 282. <https://doi.org/10.3390/atmos14020282>.
- 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. <https://doi.org/10.14746/quageo-2022-0033>.
- Michalczyk Z. 2017. Odpyływ rzeczny w Polsce. W: P. Jokiel, W. Marszelewski, J. Pociask-Karteczka (red.) *Hydrologia Polski*. PWN, Warszawa.
- Miniuk V. 1998. Chemizm wód powierzchniowych w różnych typach zagospodarowania zlewni na terenie Puszczy Białowieskiej. *Parki Narodowe i Rezerваты Przyrody* 17(1): 93-115.
- Obmiński Z. 1960. Badania nad wahaniami poziomu wód gruntowych w niektórych biotopach Białowieskiego Parku Narodowego. *Prace Instytutu Badań Leśnictwa* 201.
- Okołowicz W., Martyn D. 1979. Regiony klimatyczne Polski. W: Atlas Geograficzny Polski. PPWK, Warszawa.
- Olszewski J.L. 1986. Rola ekosystemów leśnych w modyfikacji klimatu lokalnego Puszczy Białowieskiej. Wyd. Ossolineum, Wrocław.
- Olszewski J., Szałach G., Żarnowiecki G. 2003. Klimat Białowieży 1984–1992. W: Konferencja Jubileuszowa z okazji 80-lecia Białowieskiego Parku Narodowego. Białowieża, 11-14.03.2002. *Polskie parki narodowe – ich rola w rozwoju nauk przyrodniczych* 64, Białowieża.
- Osuch M., Romanowicz R. 2014. Ocena wpływu zmian klimatu na zasoby wodne – wyniki z projektu KLIMADA. W: K. Banasik, L. Hejduk, E. Kaznowska (red.) *Hydrologia w inżynierii i gospodarce wodnej*. Monografie Komitetu Gospodarki Wodnej PAN XX: 201-212.

- Owczarek M., Filipiak J. 2016. Contemporary changes of thermal conditions in Poland, 1951-2015. *Bulletin of Geography – Physical Geography Series* 10: 31-50.
- Pierzgalski E., Boczoń A., Tyszka J. 2002. Zmienność opadów i położenia wód gruntowych w Białowieskim Parku Narodowym. *Kosmos* 51(4): 415-425.
- Pierzgalski E., Tyszka J., Boczoń A., Janek M., Wróbel M., Stolarek A., Pachuta K., Oglecki P., Frąk M., Sikorski P., Komecka L., Czachorowski S., Pietrzak L., Ksepko M. 2010. Operat zarządzania wodami i ochrony ekosystemów wodnych do planu ochrony Białowieskiego Parku Narodowego. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary (maszynopis).
- 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>.
- Pińskwar I. 2021. Complex changes of extreme precipitation in the warming climate of Poland. *International Journal of Climatology* 42(2): 817-833.  
<https://doi.org/10.1002/joc.7274>.
- Pińskwar I., Choryński A., Graczyk D., Kundzewicz Z. 2019. Observed changes in extreme precipitation in Poland: 1991–2015 versus 1961–1990. *Theoretical and Applied Climatology* 135: 773-787.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2372-1>.
- R Core Team. 2017. A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Online: <https://www.R-project.org/> (data ostatniego dostępu: 13.09.2023).
- Radzka E. 2014. Klimatyczny bilans wodny okresu wegetacyjnego (według wzoru Iwanowa) w środkowo-wschodniej Polsce. *Woda–Środowisko–Obszary Wiejskie* 14(1): 67-76.
- Skorbiłowicz M., Skorbiłowicz E., Wojciuk Z., Winiarek P. 2008. Wpływ źródeł antropogenicznych i naturalnych na jakość wód rzeki Narewka. *Ochrona Środowiska i Zasobów Naturalnych* 37: 58-63.
- Somorowska U. 2017. Climate-driven changes to streamflow patterns in a groundwater-dominated catchment. *Acta Geophysica* 65: 789-798.
- Stachy J., Biernat B. 1987. Odpływ rzeczny. Średni odpływ jednostkowy. W: J. Stachy (red.) *Atlas Hydrologiczny Polski*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- Stagl J., Mayr E., Koch H., Hattermann F.F., Huang S. 2014. Effects of Climate Change on the Hydrological Cycle in Central and Eastern Europe. W: S. Rannow, M. Neubert (red.) *Managing Protected Areas in Central and Eastern Europe Under Climate Change*. Springer, Dordrecht: 31-43.
- Stanisławczyk B. 2020. Sezonowość przepływu i sezony hydrologiczne wybranych rzek Polski (niepublikowana praca doktorska). Uniwersytet Łódzki, Łódź.
- Stonevicius E., Valiuškevičius G., Rimkus E.E., Kazys J. 2014. Climate induced changes of Lithuanian rivers runoff in 1960–2009. *Water Resources* 41(5): 592-603.
- Stopa-Boryczka M., Boryczka J., Wawer J., Grabowska K., Dobrowolska M., Osowiec M., Błażek E., Skrzypczuk J., Grzęda M. 2013. Klimat północno-wschodniej Polski według podziału fizycznogeograficznego J. Kondrackiego i J. Ostrowskiego. W: K. Błażejczyk, M. Stopa-Boryczka, J. Boryczka, J. Wawer, W. Żakowski (red.) *Atlas współzależności parametrów meteorologicznych i geograficznych w Polsce*. Wydział Geografii i Studiów Regionalnych UW, Warszawa: 114-125.
- Szwed M. 2019. Variability of precipitation in Poland under climate change. *Theoretical and Applied Climatology* 135: 1003-1015.  
<https://doi.org/10.1007/s00704-018-2408-6>.
- Szwed M., Pińskwar I., Kundzewicz Z.W., Graczyk D., Mezghani A. 2017. Changes of snow cover in Poland. *Acta Geophysica* 65: 65-76.
- Tomczyk A.M., Bednorz E., Szyga-Pluta K. 2021. Changes in air temperature and snow cover in winter in Poland. *Atmosphere* 12: 68.  
<https://doi.org/10.3390/atmos12010068>.
- Tyszka J., Pierzgalski E., Janek M., Stolarek A. 2011. Określenie przyczyn zmniejszania się zasobów wodnych w zbiorniku Topiło. Instytut Badawczy Leśnictwa, Sękocin Stary (maszynopis).
- Vetter T., Reinhardt J., Flörke M., van Griensven A., Hattermann F., Huang S., Koch H., Pechlivanidis I.G., Plötner S., Seidou O., Su B., Vervoort R.W., Krysanova V. 2017. Evaluation of sources of uncertainty in projected hydrological changes under climate change in 12 large-scale river basins. *Climatic Change* 141: 419-433.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-016-1794-y>.
- Wibig J. 2018. Heat waves in Poland in the period 1951–2015: trends, patterns and driving



- factors. *Meteorology Hydrology and Water Management* 6(1): 37-45.
- Wibig J., Jędruszkiewicz J. 2023. Recent changes in the snow cover characteristics in Poland. *International Journal of Climatology* 43(15): 6925-6938. <https://doi.org/10.1002/joc.8178>.
- Wiszniewski W., Chełchowski W. 1987. *Regiony klimatyczne*. W: J. Stachy (red.) *Atlas Hydrologiczny Polski*. Wyd. Geologiczne, Warszawa.
- WMO. 2022. State of the Climate in Europe 2021. WMO-No. 1304. Geneva, Switzerland.
- Wójcik R., Miętus M. 2014. Niektóre cechy wieloletniej zmienności temperatury powietrza w Polsce (1951–2010). *Przegląd Geograficzny* 86(3): 339-364.
- Wróbel M. 2018. Zmiany warunków wodnych wskutek zmniejszenia odpływu w zlewni rzeki Łutowni w Puszczy Białowieskiej (niepublikowana praca doktorska). Szkoła Główna Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.
- Wróbel M., Boczoń A., Gawryś R., Kowalska A. 2016. The Effect of Beaver Activity on Artificial Impoundment on the Braszcza River in the Białowieża Primeval Forest. *Baltic Forestry* 22(1): 46-50.
- Wrzesiński D. 2009. Tendencje zmian przepływu rzek Polski w drugiej połowie XX wieku. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna* 60: 147-162.
- Wrzesiński D. 2017. Reżimy rzeczne. W: P. Jokić, W. Marszelewski, J. Pociąg-Karteczka (red.) *Hydrologia Polski*. PWN, Warszawa: 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 Nature: 163-180.
- Yang D., Yang Y., Xia J. 2021. Hydrological cycle and water resources in a changing world: A review. *Geography and Sustainability* 2(2): 115-122. <https://doi.org/10.1016/j.geosus.2021.05.003>.
- Żmudzka E. 2002. O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. *Wiadomości Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej* 25(4): 23-38.

## Summary

The aim of the research was to determine long-term thermal, precipitation and hydrological characteristics of two river catchments (Narewka and Leśna) draining the Natura 2000 Puszcza Białowieska area, in the aspect of observed climate change. The study area is located in NE Poland, in the upper parts of the Narew and Bug drainage basins, near the Polish–Belarusian border.

The course of selected climate elements (air temperature, number of hot days and number of days with temperature below 0°C, number of days with snow cover, precipitation total and rainfall intensity) and hydrological characteristics (average discharge, characteristic discharges and specific runoff) were analysed. The research was based on at least 60-year-old observation sequences recorded at IMGW (Polish Institute of Meteorology and Water Management – National Research Institute) stations. The basic cli-

matic characteristics of the study area were determined on the basis of data from the climatological station in Białowieża and precipitation stations in Hajnówka, Narew and Narewka. To determine the runoff characteristics in the Narewka and Leśna catchments, data from water gauges on the Narewka River in the Białowieża and Narewka hydrological sections were used. The hydrologic analogy method was adopted to estimate water resources in the Leśna River catchment. Linear regression and the Mann–Kendall test were used to detect and test the significance of trends in changes in the time series of the analysed meteorological and hydrological characteristics.

At the meteorological station in Białowieża, in the period 1951–2022, there was a significant increase in the average annual temperature of 1.8°C. An even greater increase was determined for the winter half-year (of 2.2°C), while in the summer half-year it amounted to 1.2°C.

Starting from 2013, the average air temperature in the winter half-year was greater than 0°C. The Mann–Kendal test showed trends at a very high significance level of 99.9%.

The average annual number of hot days in the period 1951–2022 at the station in Białowieża was 4.2. During the period under study, there was a strong increasing tendency for this variable (significance level greater than 99%), especially visible since the beginning of the 1990s. The number of hot days per year has increased significantly over the years and it increased by 5.3 days. At the same time, the number of days with air temperature <0°C decreased from 55.1 in the period 1951–1980 to 43.6 days in the period 1991–2020. The analysis indicated a constant decreasing trend in the number of days with snow cover – from 92.4 days in the period 1951–1980 to 68.2 days in the period 1991–2020. These results confirm the decreasing ability to retain precipitation in the snow cover in the winter half-year.

At all the analysed stations, a slight upward trend in annual precipitation totals was noticed, which was most pronounced and statistically significant at the significance level of  $\alpha=0.01$  in Hajnówka and Narew. In Hajnówka, the average annual precipitation has been growing continuously since the period 1951–1980, when it was 552.8 mm, and is currently more than 70 mm higher and reaches 623.3 mm. A similar tendency of changes existed in Narew, where the average annual precipitation totals has been increasing continuously since the period 1961–1990.

In the period 1966–2021, at the station in Białystok, there was a significant increase in the average annual values of the precipitation intensity index, mainly caused by an increase in the intensity of precipitation in the summer half-year of ~30%.

At the water gauge stations: in Białowieża (in the 1961–2021 period) and in Narewka (1951–2020), there was a decreasing tendency in the average annual and seasonal discharge (SSQ) of the Narewka River, although it turned out to be statistically significant (at the 0.01 level) only in the summer half-year. The average annual discharge of the Narewka River in Białowieża decreased by ~18% from 1.41 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in the years 1961–1990, to 1.16 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in the period 1991–2020, while in the corresponding period in Narewka it increased by 25.4% (3.42 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> and 2.55 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively). In turn, the average discharge in the winter half-year decreased in the period 1991–2020 compared to the period 1961–1990 – by 6.1% in Białowieża and by 17.0% in

Narewka, while in the summer half-year it decreased by 39.2% and 40.9%, respectively. The average annual discharge of the Narewka River in Białowieża was 1.28 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, and in Narewka it was 2.94 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, and the specific runoff (SSq) was 5.62 and 4.82 dm<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> km<sup>-2</sup>, respectively. The calculated average discharge (SSQ) of the Leśna river in the outlet to the country border was 2.32 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, 1.40 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in the outlet to the mouth of the Przewłoka River and 0.85 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in the cross-section to the mouth of the Chwiszcza River.

Flow peaks caused by spring thaws occurred in April at the beginning of the studied period and in March in later years. At that time, the highest observed discharges (WWQ) were also recorded – in Białowieża 21.5 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> and in Narewka 50.7 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. The lowest discharges (NNQ) at both stations occurred in the summer months, mainly in August and September, reaching 0.04 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in Białowieża and 0.22 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> in Narewka. Average discharges in the winter half-year were generally twice as high as those in the summer half-year. In Białowieża, the average discharge in the winter half-year was 1.75 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, and in the summer half-year 0.81 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>. In Narewka, these values were 3.88 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup> and 2.00 m<sup>3</sup>·s<sup>-1</sup>, respectively.

The research results confirm the progressive change in thermal, rainfall and river runoff conditions in the Puszcza Białowieska Natura 2000 area. The analysis carried out allows for the formulation of two most important conclusions regarding the analysed area:

- the change in climatic conditions is reflected in: an increase in the average annual and seasonal air temperatures, a strong increasing tendency in the average annual number of hot days, a decreasing number of days with snow cover, a positive trend in annual precipitation totals, and a clear increase in the average annual values of the rainfall intensity index;
- the characteristics of the river regime that flow through this area are changing. There have been a downward trend in average annual discharges and specific runoff, a decrease in average monthly discharges (except January and February), a shift in the spring peak of flows (from April to March), and an acceleration in the occurrence of summer low flows (from September to August).

All these phenomena are unfavourable from the point of view of the stability of ecosystems and plant communities within the Puszcza Białowieska Natura 2000 area.