

# WSPÓLZALEŻNOŚĆ WYSTĘPOWANIA SUSZ NA OBSZARZE BESKIDZKO-POGÓRSKIM KARPAT ZACHODNICH NA PRZYKŁADZIE ZLEWNI BYSTRZANKI W OKRESIE INTENSYWNYCH ZMIAN KLIMATU NA POCZĄTKU XXI WIEKU

**Interdependencies among droughts in the Beskid-foothill area of the Western Carpathians on the example of the Bystrzanka catchment during intense climate change at the beginning of the 21st century**

WITOLD BOCHENEK<sup>1</sup> , SABINA WÓJCIK<sup>1</sup> 

**Zarys treści.** Celem badań było określenie zmian natężenia suszy w przebiegu rocznym (okresy 5-dniowe) i w przebiegu wieloletnim (1994–2023) oraz identyfikacja współzależności susz i niżówek na przykładzie zlewni Bystrzanki położonej w beskidzko-pogórskiej części Karpat Zachodnich. W pracy wyznaczono między innymi progowe wartości dla suszy atmosferycznej, glebowej i hydrologicznej, określono czas trwania susz z podziałem na dwa 15-letnie podokresy oraz zidentyfikowano okresy współwystępowania badanych rodzajów suszy. W badaniach użyto dane z dobowych pomiarów w Stacji Badawczej Instytutu Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk w Szymbarku. W wieloletniu 1994–2023 stwierdzono wystąpienie 824 pentad z suszą atmosferyczną, 712 pentad z suszą glebową i 1067 pentad z niżówką rzeczną. Susze atmosferyczne charakteryzowały się krótkim czasem trwania (maksymalnie 9 pentad), w odróżnieniu od susz hydrologicznych, trwających maksymalnie przez 45 pentad. Synchroniczność występowania susz atmosferycznych, glebowych i hydrologicznych stwierdzono podczas 262 pentad, a ich czas trwania zwiększył się w drugiej połowie okresu badań (zanotowano równoczesne wystąpienie badanych susz w 32 pentadach więcej niż w pierwszym podokresie).

**Słowa kluczowe:** susza meteorologiczna, susza glebowa, susza hydrologiczna, zmiana klimatu, Karpaty Zachodnie

**Abstract.** The aim of the study was to determine changes in the intensity of drought in the annual course (5-day periods) and in the multi-year course (1994–2023) and to identify the co-occurrence of droughts and low-flows on the example of the Bystrzanka catchment located in the Beskid-foothill part of the Western Carpathians. In the study, among other things, the threshold values for different types of droughts (meteorological, soil, hydrological), as well as their duration with division into two 15-year sub-periods, and the co-occurrence periods of studied types of droughts was identified. The study used data from daily measurements at the Research Station of the Institute of Geography and Spatial Organization Polish Academy of Sciences at Szymbark. In the multi-year period 1994–2023, 824 pentads with meteorological drought, 712 pentads with soil drought and 1,067 pentads with hydrological droughts were found. Meteorological droughts were characterised by short duration (maximum nine pentads), while hydrological droughts were characterised by long duration (maximum 45 pentads). The synchronous occurrence of meteorological, soil and hydrological droughts was found in the period of 262 pentads and their duration increased in the second half of the study period (co-occurrence of the studied droughts was recorded with 32 more pentads than in the first sub-period).

**Key words:** meteorological drought, soil drought, hydrological drought, climate change, Western Carpathians

## Wstęp

Zjawisko suszy atmosferycznej występuje coraz częściej i dotyczy coraz większych obszarów w umiarkowanej strefie klimatycznej (Dai 2013). W największym stopniu narastanie częstości zja-

wiska suszy jest uwarunkowane czynnikami klimatycznymi: wzrostem temperatury powietrza i parowania terenowego (Sheffield, Wood 2008), zmniejszeniem częstości opadów i coraz rzadszym występowaniem kilkudniowych opadów rozlewnych. Wszystkie te czynniki powodujące występowanie susz są uwarunkowane przez cyr-

<sup>1</sup> Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania Polskiej Akademii Nauk, Zakład Badań Geośrodowiska, Stacja Badawcza im. E. Gila, Szymbark 430, 38-311 Szymbark; e-mail: [witold.bochenek@zg.pan.krakow.pl](mailto:witold.bochenek@zg.pan.krakow.pl), ORCID: 0000-0001-8156-6310; e-mail: [sabina.wojcik@zg.pan.krakow.pl](mailto:sabina.wojcik@zg.pan.krakow.pl), ORCID: 0000-0002-3813-2629

kulację atmosferyczną (Kingston i in. 2015). Konsekwencją susz atmosferycznych są susze głębokie. Wielkoobszarowe oceny suszy glebowej dla obszaru Europy (Samaniego i in. 2018; Grillakis 2019) wskazują na wyjątkowo wysokie narażenie obszaru Europy Wschodniej i obszaru śródziemnomorskiego na występowanie ekstremalnych susz glebowych obejmujących coraz większą populację mieszkańców. Deficyt wody w glebie powoduje obniżenie się poziomu zwierciadła wody (Bloomfield i in. 2015) i drastyczne zmniejszenie zasilania cieków, szczególnie na obszarach umiarkowanej strefy klimatycznej (Van Lanen i in. 2016). Susze (niżówki) hydrologiczne występują coraz częściej, a ich czas trwania jest uwarunkowany czynnikami klimatycznymi i środowiskowymi (Barker i in. 2016). Badania zmian w odpływie rzek europejskich w latach 1962–2017 wskazują na zmniejszanie się odpływu w półroczu ciepłym oraz narastanie częstości i surowości susz w krajach Europy Południowej i Środkowej (Peña-Angulo i in. 2022). Na 2/3 obszaru Polski w latach 1989–2020 stwierdzono znaczący wzrost czasu trwania niżówek rzecznych spowodowany zmianami natężenia cyrkulacji termohalinowej w Północnym Atlantyku (Wrzesiński i in. 2022). Również w skali małych zlewni w środkowej Polsce obserwowane jest zmniejszenie odpływu korytowego w okresie ostatnich 30 lat (Banasik i in. 2022). Prognozy klimatyczne wskazują na nasilanie się susz hydrologicznych w Karpatach Zachodnich i ich reperkusji dla środowiska przyrodniczego i działalności człowieka (Bochenek, Wierjaczka 2023).

## Cel badań

Głównym celem podjętych badań było określenie zmian natężenia zjawiska suszy w przebiegu rocznym (okresy 5-dniowe/pentady) i w przebiegu wieloletnim (30 lat, 1994–2023). Do realizacji głównego celu posłużono się zastosowaniem różnych typów susz: atmosferycznej, glebowej i hydrologicznej, z określeniem synchroniczności ich występowania. Założono, że najbardziej ekstremalnym zdarzeniem będzie równoczesne wystąpienie wszystkich wyróżnionych typów suszy (niżówki).

Główny cel badań zrealizowano poprzez cele cząstkowe:

- wyznaczenie progowych wartości dla różnych kategorii (rodzajów) zjawiska suszy;

- identyfikacja susz w okresach 5-dniowych (pentadowych);

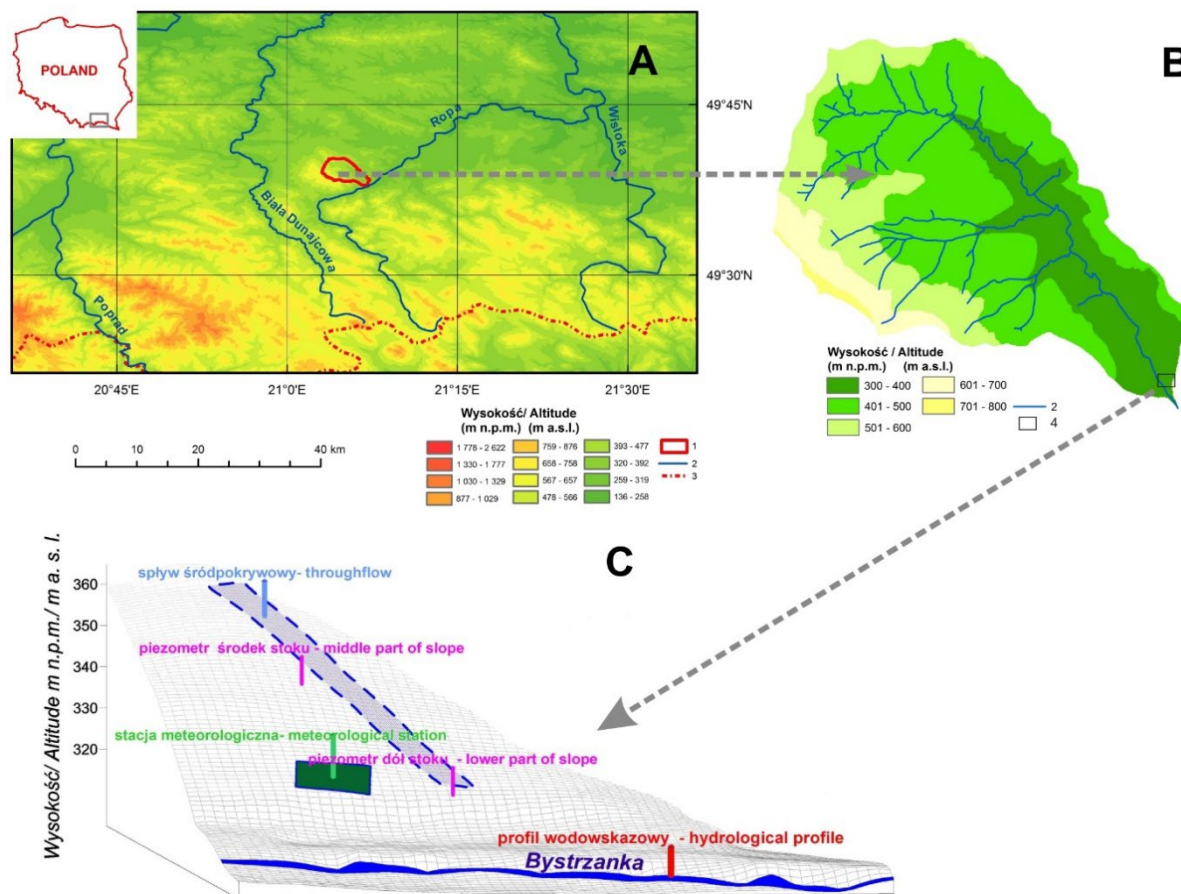
- określenie czasu trwania (liczby pentad) dla każdego typu suszy, z podziałem na dwa 15-letnie podokresy (1994–2008 i 2009–2023);

- identyfikacja równoczesnego występowania różnych typów suszy i wskazanie natężenia tego zjawiska w czasie: w poszczególnych latach i w przebiegu rocznym.

Przyjęto hipotezę badawczą zakładającą, że w okresie wyraźnego wzrostu temperatury powietrza nastąpi wzrost czasu trwania wszystkich typów susz i wzrost ich dotkliwości, przejawiający się równoczesnym występowaniem wszystkich kategorii omawianego zjawiska.

## Obszar badań

Badania były prowadzone na stoku doświadczalnym Stacji Badawczej IGiPZ PAN w Szymbarku, gdzie znajduje się stacja meteorologiczna (325 m n.p.m.), w której mierzona jest między innymi wysokość opadu wykorzystana w niniejszych badaniach (rys. 1). Na fliszowym stoku w pobliżu stacji meteorologicznej znajduje się sieć płytkich piezometrów (320 m n.p.m.). Dane pomiarowe z jednego z nich (150 cm głębokości) uwzględniono w prezentowanym opracowaniu. Nieopodal zlokalizowany jest przekrój wodowskazowy (303 m n.p.m) zamykający zlewnię Bystrzanki (13 km<sup>2</sup>). Wszystkie stanowiska są odległe od siebie nie więcej niż 200 m i znajdują się w dolnej części beskidzko-pogórskiej zlewni Bystrzanki. Zlewnia ta położona jest na pograniczu Beskidu Niskiego i Pogórza Karpackiego (Pogórze Ciężkowickie i Doły Jasielsko-Sanockie) (Solon i in. 2018). W zlewni występują elementy rzeźby beskidzkiej – grzbiety beskidzkie sięgające wysokości 630–750 m n.p.m. (Maślana Góra 753 m n.p.m.), zbudowane z gruboławicowych piaskowcowo-łupkowych utworów magurskich oraz elementy rzeźby pogórskiej – garby pogórskie o wysokości 450–550 m n.p.m., zbudowane z cienko- i średnioławicowych warstw piaskowcowo-łupkowych, miejscami z przewagą łupków (Gil 1994). Szczegółowe opisy poszczególnych elementów środowiska znajdują się w wielu opracowaniach, na przykład: Dauksza i in. (1970), Starkła (1973), Starkła i Gila (1994), Kopciowskiego i in. (1997; Wójcika i in. (2003) czy Bochenka (2020).



Rys. 1. Obszar badań

Zlewnia Bystrzanki: A – na tle regionu, B – sieć rzeczna zlewni, C – stok doświadczalny IGiPZ PAN;  
1 – obszar badań, 2 – ciek, 3 – granica państwa, 4 – lokalizacja stoku doświadczalnego

#### Study area

The Bystrzanka river catchment: A – against the background of the region, B – river network of the catchment, C – the IG&SO PAS experimental slope; 1 – study area, 2 – streams, 3 – national border, 4 – experimental slope location

## Materiały i metody badań

W przeprowadzonych badaniach źródłowy materiał stanowiły codzienne serie pomiarów: sumy opadów atmosferycznych ze stacji meteorologicznej IGiPZ PAN, głębokości do wody w płytkim piezometrze o głębokości 150 cm w dolnej części stoku pogórskiego garbu fliszowego i średnie dobowe przepływy w przekroju wodowskazowym zamykającym zlewnię Bystrzanki, obliczone na podstawie zapisu limnigraficznego.

Badania przeprowadzono z podziałem na okresy 5-dniowe (pentady), rozpoczynające się w pierwszym dniu miesiąca, a kończące w ostatnim. Dla miesięcy liczących 31 dni ostatnia „pentada” liczyła 6 dni; w lutym ostatnia „pentada” liczyła 3 lub 4 dni. Taki podział spowodował wyróżnienie 72 pentad w roku. Obliczenie średnich

dobowych sum opadu, stanów wody w piezometrze oraz natężenia przepływu w korycie rzeczonym eliminowało wpływ liczby dni w „pentadzie” na wielkość zmiennej.

Dla każdej pentady obliczono średnią dobową sumę opadu, średni i minimalny dobowy przepływ oraz średni i minimalny stan wody w piezometrze. Jako granicę suszy atmosferycznej przyjęto 1/2 średniej pentadowej sumy opadu w okresie 1994–2023. Kryterium klasyfikacji względnej sumy opadu (Relative Precipitation Index – RPI) Tomaszewskiej (1994) dla miesiąca zakłada, że suma nieprzekraczająca 50% średniej wieloletniej odpowiada klasie „bardzo suchy” ( $25% < RPI \leq 49%$ ) lub „skrajnie suchy” ( $P \leq 25%$ ). Autorzy uznali, że przyjęta granica suszy atmosferycznej spełnia warunki zjawiska ekstremalnego.

Suszę glebową utożsamiono z niżówką gruntową wyznaczaną na podstawie wskaźnika zagrożenia niżówką gruntową  $k_n$  (Kazimierski i in. 2008), według wzoru:

$$k_n = 1 - \frac{G}{SNGW_{1994-2023}} \quad (1)$$

gdzie:

$k_n$  – wskaźnik zagrożenia niżówką gruntową,  
 $G$  – średnia głębokość do wody w piezometrze w okresie 5-dniowym [cm p.p.t.],  
 $SNGW_{1994-2023}$  – średnia niska głębokość do wody w okresie 5-dniowym w wieloleciu 1994–2023 [m].

Wskaźnik zagrożenia niżówką gruntową  $k_n$  przyjmuje wartości w przedziałach:

- brak zagrożenia niżówką gruntową:  
 $k_n > 0,10$
- zagrożenie wystąpienia niżówki gruntowej:  
 $0,10 \geq k_n > -0,10$
- niżówka gruntowa:  
 $k_n \leq -0,10$ .

Do wyznaczenia niżówki rzecznej posłużono się przepływami charakterystycznymi II stopnia z wielolecia 1994–2023. Celowo zrezygnowano z wykorzystania metod kwantylowych, które „sztucznie” dzielą populację wyników. Wykorzystano założenia Ozgi-Zielińskiej i Brzezińskiego (1994), którzy proponują zastosowanie do obliczeń wieloletnich charakterystyk przepływów (WNQ lub SNQ). W ocenie autorów nawet przepływ SNQ był zbyt wysoki dla wyznaczenia progów niżówki, gdyż średnio stanowił 46,8% objętości przepływu SSQ, a w poszczególnych pentadach udział ten kształtował się od 16,3% do 71,4%. Zdecydowano, by pentadowe progi niżówek rzecznych ( $Q_{gr}$ ) wyznaczyć według następującej formuły obliczeniowej:

$$Q_{gr} = 0,5 \cdot (NSQ + SNQ) \quad (2)$$

gdzie:

$Q_{gr}$  – przepływ graniczny niżówki [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  
 $NSQ$  – przepływ najniższy ze średnich w wieloleciu 1994–2023 [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ],  
 $SNQ$  – przepływ średni z najniższych w wieloleciu 1994–2023 [ $m^3 \cdot s^{-1}$ ].

Według zastosowanego kryterium  $Q_{gr}$  objętości niżówek stanowiły średnio 25,7% objętości przepływu SSQ, wykazując zróżnicowanie w pentadach w zakresie od 8,4% do 38,7%.

Rozrzut danych oceniono stosując współczynnik zmienności  $C_v$ , wyrażony w procentach, według formuły:

$$C_v = \frac{\sigma}{\bar{x}} \cdot 100 \quad (3)$$

gdzie:

$C_v$  – współczynnik zmienności [%],  
 $\sigma$  – odchylenie standardowe,  
 $\bar{x}$  – średnia.

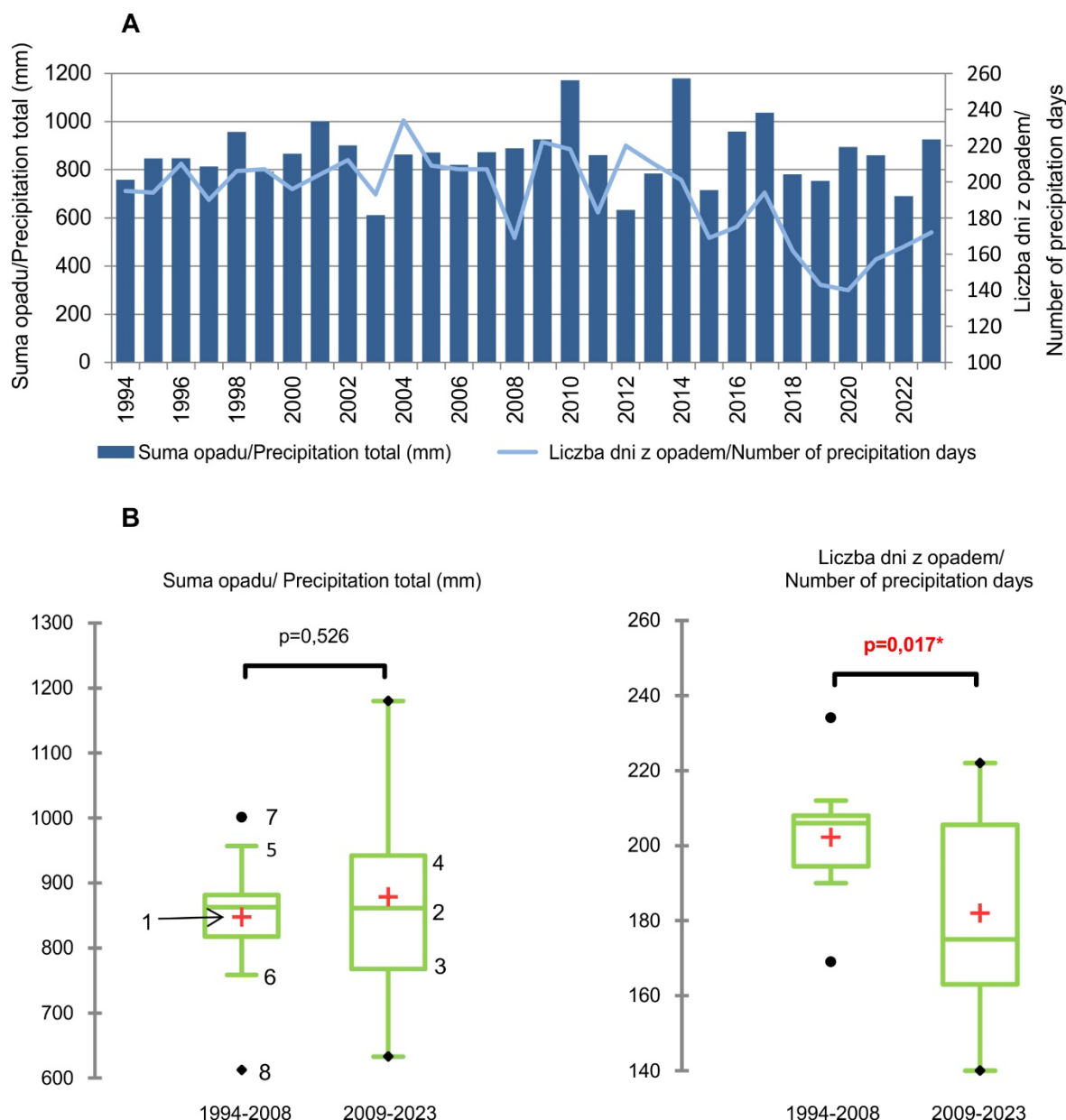
Z powodu dużej zmienności rocznych sum opadu i odpływu oraz średnich stanów wody gruntowej określenie kierunków ich zmian w wieloleciu byłoby niejednoznaczne (brak trendu w analizowanych danych). Zdecydowano zatem, że porównania zostaną przeprowadzone dla dwóch równych, 15-letnich przedziałów czasu: 1994–2008 i 2009–2023, z wykorzystaniem testu t-Studenta (test parametryczny), po uprzednim sprawdzeniu normalności rozkładów danych testem Shapiro-Wilka (S-W). Jeśli test S-W wykazuje brak normalności rozkładu, do oceny porównawczej wykorzystany zostanie nieparametryczny test Manna-Whitneya. Dla dwóch 15-elementowych zbiorów danych liczba stopni swobody (DF) w teście t-Studenta wyniosła 28, a krytyczna wartość  $|t|=|2,048|$ . Zatem wartości  $t$  z przedziału  $(-2,048; 2,048)$  będą świadczyć o braku istotnych statystycznie różnic między zbiorami danych.

Na podstawie przedstawionej powyżej metodyki zidentyfikowano występowanie 5-dniowych przypadków różnych typów suszy i przedstawiono je w układzie rocznym (30 lat) oraz pentadowym (72 pentady w roku). Obliczenia wykonano i wyniki badań zaprezentowano w układzie roku hydrologicznego. Do obliczeń wykorzystano narzędzia pakietu Microsoft Office Excel i jego nakładkę XLSTAT (Addinsoft).

## Wyniki badań i dyskusja

### Roczne i wieloletnie charakterystyki opadów, wód gruntowych i odpływu

Średnia roczna suma opadów atmosferycznych w latach 1994–2023 wyniosła 863,0 mm. W okresie badań nie stwierdzono trendu rocznych sum opadu (rys. 2A). Brak takiego trendu w Polsce dla okresów wieloletnich o różnej długości został potwierdzony w wielu publikacjach naukowych (m. in.: Żmudzka 2009; Michalska 2011; Bochenek 2020). Seria wyników pomiarów w Szymbarku wskazuje raczej na fluktuacje i nieregularne zmiany sum rocznych, obserwowane również na obszarze Polski (Kozuchowski 2004; Ziernicka-Wojtaszek 2006), a uwarunkowane czynnikami cyrkulacyjnymi (Twardosz i in. 2011). Uwzględ-



Rys. 2. Przebieg rocznych sum opadów i liczby dni z opadem (A) oraz ich rozkłady w podokresach (B)

B: 1 – średnia, 2 – mediana, 3 – pierwszy kwartyl, 4 – trzeci kwartyl, 5 – najwyższa wartość nieodstająca, 6 – najniższa wartość nieodstająca, 7 – wartość maksymalna, 8 – wartość minimalna

Course of annual precipitation total and number of days with precipitation (A) and their distributions in sub-periods (B)

B: 1 – average, 2 – median, 3 – 1st quartile, 4 – 3rd quartile, 5 – the highest non-outlier value, 6 – the lowest non-outlier value, 7 – maximum value, 8 – minimum value

niając podział na dwa podokresy, w pierwszym z nich (1994–2008) średnia roczna suma opadu wyniosła 847,7 mm, natomiast w drugim podokresie (2009–2023) – 878,4 mm (rys. 2B).

Średnia roczna liczba dni z opadem ( $P \geq 0,1$  mm) wyniosła 192, przy czym w pierwszej połowie okresu badań wartość ta osiągnęła 202 dni·rok<sup>-1</sup>, natomiast w drugiej połowie – 182 dni·rok<sup>-1</sup>, pomimo wyższej średniej rocznej sumy opadu w tym podokresie. Na zmniejszenie

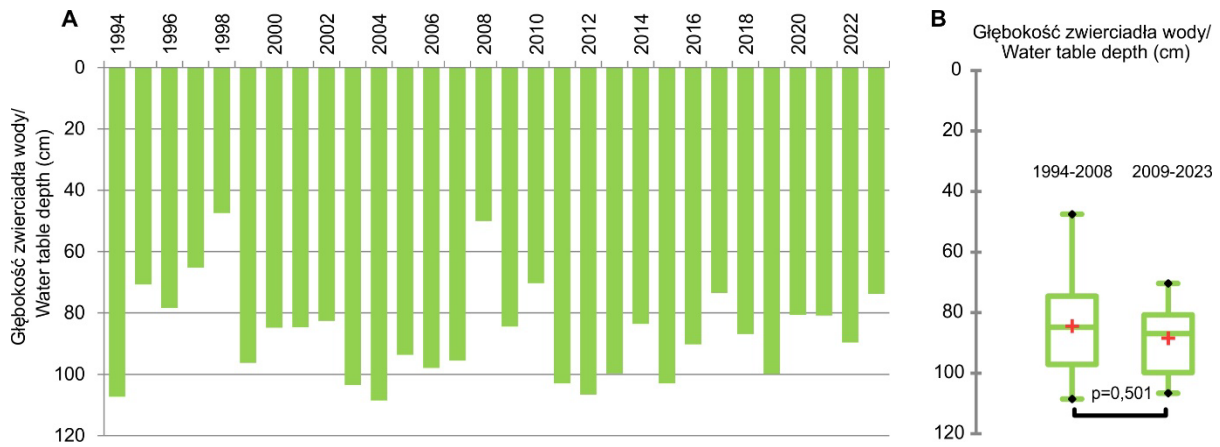
średniej liczby dni z opadem w drugim podokresie miał wpływ ujemny (istotny statystycznie) trend w latach 2012–2020.

Porównanie obydwu zbiorów danych z zastosowaniem testu t-Studenta (rozkłady danych normalne, sprawdzone testem Shapiro-Wilka) wskazuje na brak istotnych różnic między rocznymi sumami opadów ( $t=-0,642$ ) oraz występowanie istotnych różnic między liczbą dni z opadem w obydwu podokresach ( $t=2,531$ ) (rys. 2).



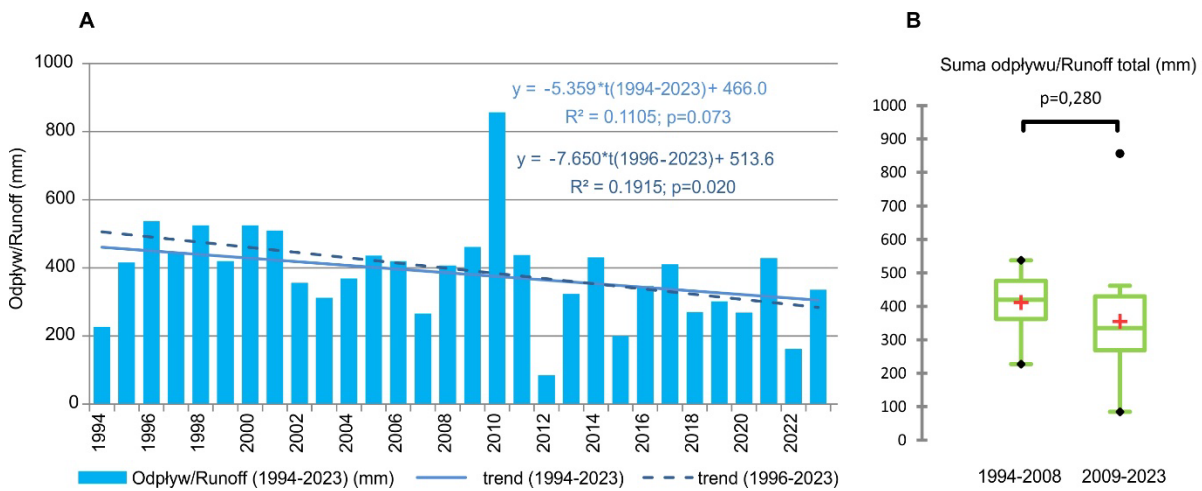
Średnia roczna głębokość do wody gruntowej w okresie badań wyniosła 86,5 cm, przy zakresie zmian od 108,5 cm (2004 rok) do 47,5 cm (1998 rok) (rys. 3). Pomimo stwierdzenia statystycznie istotnego dodatniego trendu średnich rocznych stanów wody w tym piezometrze w la-

tach 1971–2015 (Bochenek 2020), w ciągu ostatnich 30 lat zwierciadło wody gruntowej nie wykazywało istotnej statystycznie tendencji. Porównanie dwóch 15-letnich podokresów (test t-Studenta) wskazuje na brak istotnych różnic między zbiorami średnich rocznych stanów wody ( $=-0,682$ ).



Rys. 3. Przebieg średnich rocznych głębokości do wód gruntowych (A) oraz ich rozkłady statystyczne w podokresach (B; objaśnienia jak na Rysunku 2B)

Course of average annual groundwater depths (A) and their distributions in sub-periods (B; Explanations as in Figure 2B)



Rys. 4. Przebieg rocznych sum odpływu ze zlewni Bystrzanki i trendów ich zmian (A) oraz rozkłady odpływu w podokresach (B)

t – czas (rok),  $R^2$  – współczynnik determinacji, p – poziom istotności statystycznej, pozostałe objaśnienia jak na Rysunku 2

Course of annual totals of runoff from the Bystrzanka catchment and trends in their changes (A) and runoff distributions in sub-periods (B)

t – time (year),  $R^2$  – determination coefficient, p – level of statistical significance, other marks as in Figure 2

Średni roczny odpływ ze zlewni Bystrzanki w okresie 30 lat wyniósł 382,9 mm, wykazując zróżnicowanie średnich rocznych wartości w pierwszym i drugim podokresie, które wynosiły odpowiednio: 411,4 mm i 354,5 mm (rys. 4). W latach 1994–2023 nie stwierdzono statystycznie istotnego trendu, jednakże „odrzu-

cenie” rocznych sum odpływu z dwóch początkowych lat (1994 i 1995) skutkuje wystąpieniem ujemnego istotnego statystycznie trendu, potwierdzonego wynikami badań odpływu między innymi z dorzecza górnej Ropy (Bochenek, Wiejaczka 2023) oraz z małych zlewni pienińskich (Kowalczyk, Jaguś 2023). Kubiak-Wójcicka

(2020) twierdzi, że ujemna tendencja odpływu rzecznej dla większości obszaru Polski (dorzecze Wisły) w latach 1981–2015 jest spowodowana znaczącym wzrostem temperatury powietrza, którego nie zrekompensował niewielki wzrost sum opadów. Podobnie jak dla 15-elementowych zbiorów rocznych sum opadu nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic w odpływie ze zlewni Bystrzanki między dwoma podokresami ( $t=1,101$ ).

### Przebieg susz atmosferycznych, glebowych i hydrologicznych w ciągu roku i w wieloleciu 1994–2023

Według zastosowanych kryteriów wydzielenia susz wyróżniono 824 pentady z suszą atmosferyczną, 712 pentad z suszą glebową i 1067 pentad z suszą hydrologiczną, które stanowiły odpowiednio: 31,8%, 33,0% i 49,4% liczby pentad. Średnio w ciągu roku wystąpiło 27 pentad z suszą atmosferyczną, 24 pentady z suszą glebową i 36 pentad z suszą hydrologiczną (tab. 1; rys. 5). Poszczególne rodzaje susz w ujęciu rocznym wykazywały zróżnicowaną zmienność liczby pentad, opisaną współczynnikiem zmienności. Współczynnik zmienności ( $C_v$ ) przyjął najniższą wartość dla susz

atmosferycznych (14,8%), a najwyższą – dla susz glebowych (58,5%). Badanie rozkładu pentad z występowaniem susz w ciągu roku wskazuje na największą ich częstość między połową września a początkiem listopada (tab. 1; rys. 6). Recesja odpływu w okresie jesiennym (susze hydrologiczne) obserwowana jest również w zlewniach bieszczadzkich (Mostowik i in. 2019).

Duże zróżnicowanie czasu trwania susz (liczby pentad) w kolejnych latach uniemożliwia wyznaczenie trendu w okresie wielolecia. Porównanie dwóch 15-letnich podokresów (1994–2008 i 2009–2023) wskazuje na brak istotnych statystycznie różnic między liczbą pentad z suszą w ciągu roku dla wszystkich rodzajów susz. Wartości  $t$  testu  $t$ -Studenta dla porównań częstości pentad z suszą atmosferyczną, glebową i hydrologiczną w obydwu podokresach wyniosła odpowiednio: -0,622, -0,207 i -2,205. W przypadku suszy hydrologicznej, wartość  $t$  (-2,205) bliska wartości krytycznej  $|t|=2,048$  świadczy o znaczącym zróżnicowaniu obydwu zbiorów w badanych podokresach. Uwzględniając dłuższy okres badań (1971–2010) z wykorzystaniem wskaźnika hydrotermicznego Sielianinowa ( $K$ ), w ostatniej dekadzie w Polsce stwierdzono wzrost powierzchni obszaru o warunkach „dość suchych” ( $1,0 < K \leq 1,3$ ) z 14,4% do 44,3% (Skowera 2014).

Tabela 1

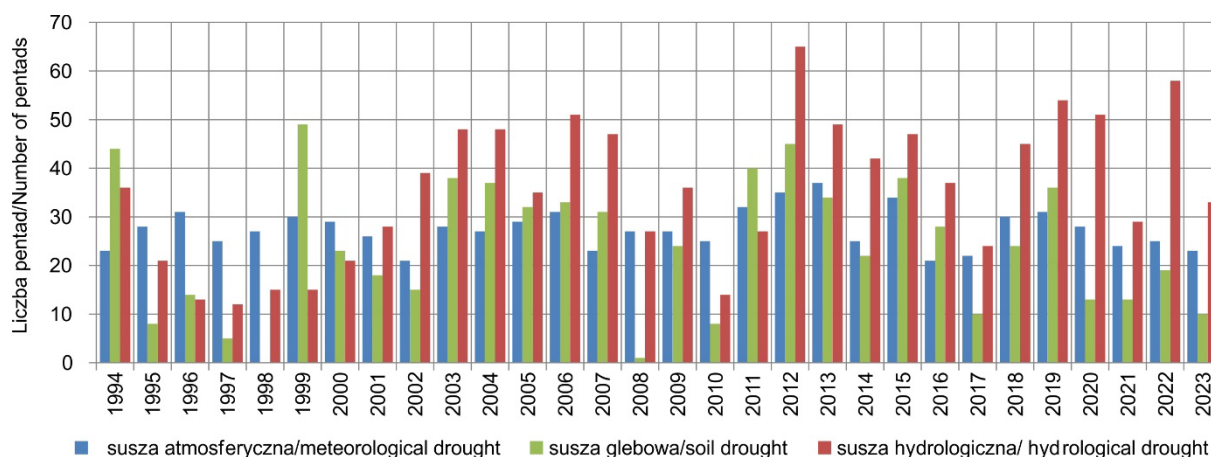
Charakterystyki statystyczne liczby pentad z suszą w latach 1994–2023

Statistical characteristics of the number of pentads with drought in 1994–2023

	Susza atmosferyczna/ <i>Meteorological drought</i> (A)	Susza glebowa/ <i>Soil drought</i> (S)	Susza hydrologiczna/ <i>Hydrological drought</i> (R)
	lata/ years		
Średnia/ <i>Average</i>	27	24	36
Minimum/ <i>Minimum</i> (rok/year)	21 (2002, 2016)	0 (1998)	12 (1997)
Maksimum/ <i>Maximum</i> (rok/year)	37 (2013)	49 (1999)	65 (2012)
$C_v$ (%)	14,8	58,5	41,3
	pentady/pentads		
Średnia/ <i>Average</i>	11	10	15
Minimum/ <i>Minimum</i> (rok/ year)	6 (11-4*)	6 (1-4, 2-1, 2-4, 8-6)	8 (3-4)
Maksimum/ <i>Maximum</i> (rok/year)	17 (10-3)	15 (11-1)	23 (9-2, 9-4)
$C_v$ (%)	20,4	22,5	22,7

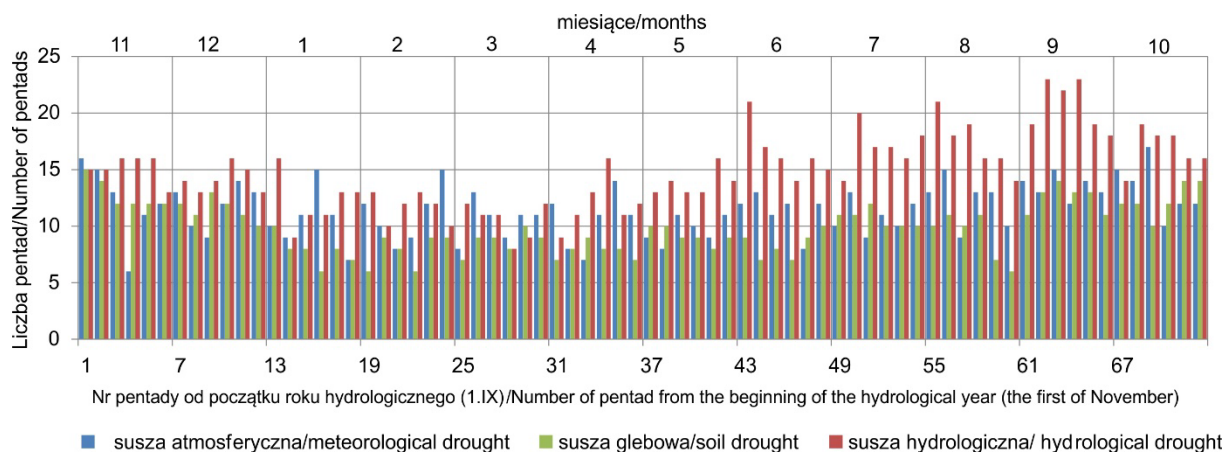
Uwagi: \* miesiąc-numer pentady

Notes: \* month-number of pentad



Rys. 5. Liczba pentad z występowaniem różnych rodzajów suszy w okresie badań

Number of pentads with the occurrence of different types of droughts during the study period



Rys. 6. Liczba pentad dla różnych rodzajów suszy w ciągu roku

Number of different types of droughts throughout the year

Poszczególne rodzaje suszy charakteryzują się nieco odmiennym przebiegiem w ciągu roku (rys. 6). Susze atmosferyczne wykazują w miarę równomierną liczebność w pentadach w ciągu roku, częstość susz glebowych wzrasta od września do listopada, natomiast wzrost liczebności susz hydrologicznych następuje od lipca do października.

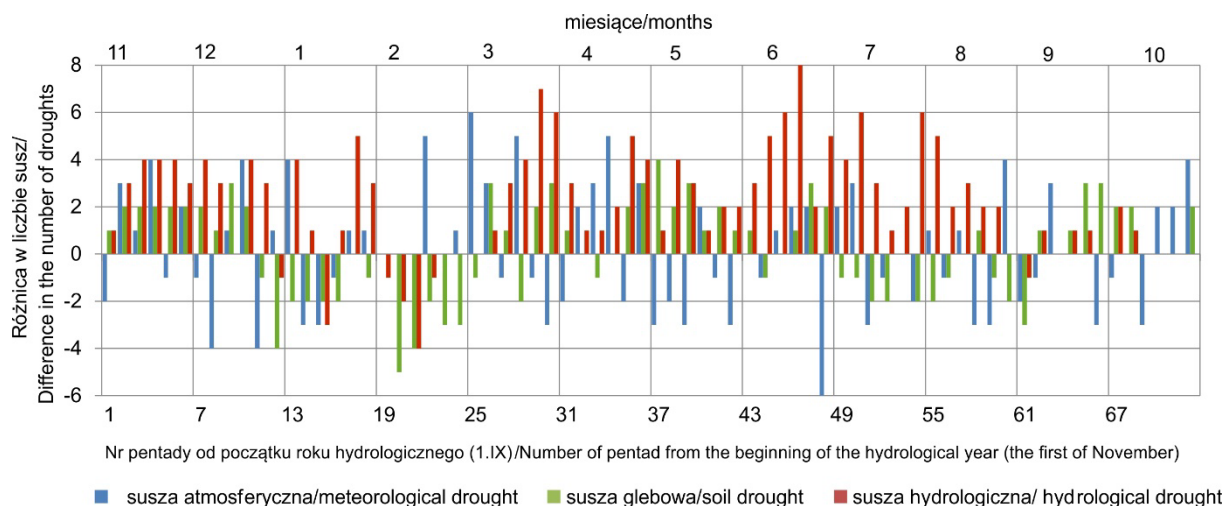
Porównanie zmian liczebności susz w przebiegu rocznym w dwóch podokresach (2. podokres – 1. podokres) wskazuje na nieregularne zmiany susz meteorologicznych (rys. 7). W drugiej połowie okresu badań (2009–2023) stwierdzono zmniejszenie liczebności susz glebowych w styczniu, lutym, lipcu i sierpniu oraz wzrost częstości w listopadzie, grudniu oraz w okresie od marca do czerwca. We wspomnianym podokresie badawczym zaobserwowano największy sumaryczny wzrost częstości susz hydrologicznych,

zwłaszcza w marcu i czerwcu; tylko w lutym liczba susz hydrologicznych uległa zmniejszeniu.

Z punktu widzenia funkcjonowania środowiska i gospodarki (rolnictwo, gospodarka komunalna) znaczącą rolę odgrywa długość susz przejawiająca się ich nieprzerwanym występowaniem. Badaniu poddano czasowe szeregi danych z występowaniem suszy przez dwie i więcej pentad.

W okresie 30 lat stwierdzono 189 przypadków suszy atmosferycznej trwającej powyżej jednej pentady (tab. 2). Aż 96% susz atmosferycznych charakteryzowało się czasem trwania nie dłuższym niż 5 pentad, a maksymalna długość suszy atmosferycznej wyniosła 9 pentad (w 2012 roku). Dla susz hydrologicznych stwierdzono 127 przypadków ich wystąpienia, z czego tylko 54% stanowiły susze trwające nie dłużej niż przez 5 pentad. Najdłuższa susza hydrologiczna trwała





Rys. 7. Zmiany liczby susz w przebiegu rocznym między pierwszym (1994–2008) a drugim (2009–2023) podokresem badań

Changes in the number of droughts in annual course between the first (1994–2008) and second (2009–2023) sub-period of the study

Tabela 2

Długość susz trwających przez dwie i więcej pentad (w pentadach)

Duration of droughts lasting for two or more pentads (in pentads)

	Susza atmosferyczna/ <i>Meteorological drought</i> (A)		Susza glebowa/ <i>Soil drought</i> (S)		Susza hydrologiczna/ <i>Hydrological drought</i> (R)	
	1994–2008	2009–2023	1994–2008	2009–2023	1994–2008	2009–2023
	1994–2023		1994–2023		1994–2023	
Ogółem/ <i>Total</i>	90	99	41	54	59	68
	189		95		127	
<=5	86	95	24	34	33	36
	181		58		69	
6–10	4	8	8	13	14	18
	8		21		32	
11–20	-	-	4	4	6	8
	-		8		14	
>20	-	-	5	3	6	6
	-		8		12	

45 pentad (w 2012 roku). Najmniejszą liczbę susz „wielopentadowych” stwierdzono dla susz glebowych – 95, z czego 61% stanowiły zdarzenia trwające nie dłużej niż 5 pentad. Maksymalna długość suszy glebowej wyniosła 44 pentady (1999 rok). Susza atmosferyczna ma zatem charakter względnie krótkotrwały, przerywany często przez pojedynczy opad o relatywnie (dla danej pory roku) wysokiej sumie. Susza hydrologiczna ma charakter długotrwały, przerywany długotrwałym opadem, powodującym wzrost zasobów wodnych

w zlewni. Podobne spostrzeżenia są prezentowane jako konkluzja z badań nad suszami w Wielkiej Brytanii (Barker i in. 2016). Intensywny opad ulewny, wywołujący powierzchniowe zasilanie cieków, przerywa niżówkę rzeczną, lecz przerwa ta ma charakter krótkotrwały i susza hydrologiczna jest kontynuowana. Dla każdego rodzaju suszy zauważalny jest wzrost częstości długotrwałego występowania tego zjawiska w drugiej połowie okresu badań (2009–2023).

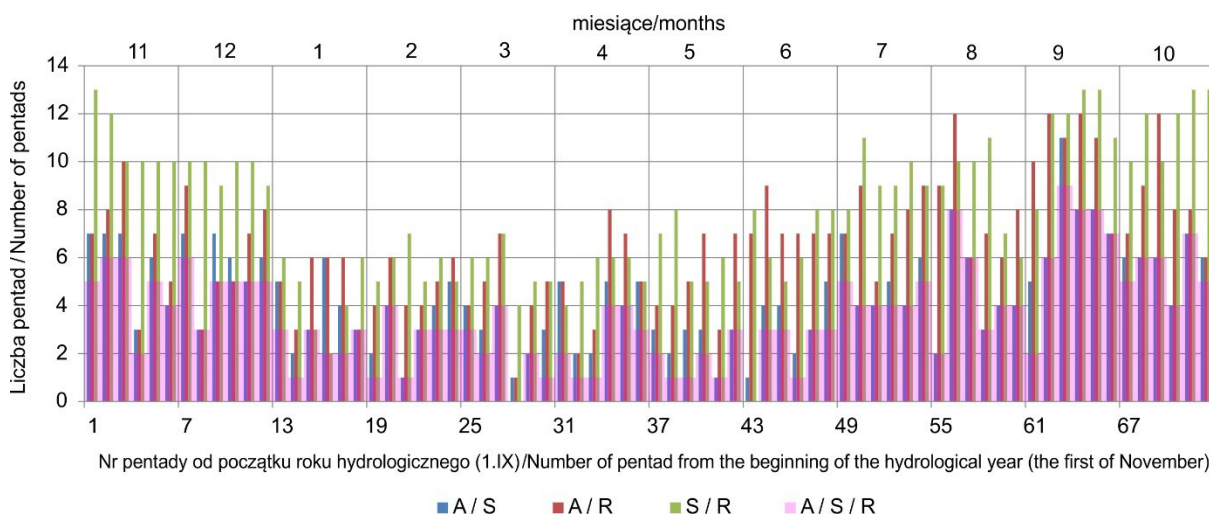
## Synchroniczność występowania różnych rodzajów suszy

Dotkliwość suszy to również jej równoczesne występowanie na różnych etapach obiegu wody. Badaniu poddano występowanie suszy atmosferycznej (A), glebowej (S) i hydrologicznej (R) (rys. 8). Równoczesne występowanie suszy atmosferycznej (A) i glebowej (S) zaobserwowano dla 321 pentad (14,9% okresu badań), najczęściej we wrześniu (3. pentada września – 11 przypadków w ciągu 30 lat). Porównanie dwóch podokresów wskazuje na wzrost częstości przypadków w latach 2009–2023 o 9 pentad (o 5,7%), lecz zbiory danych rocznych częstości pentad nie wykazują statystycznie istotnych różnic ( $t=-0,230$ ). Porównanie jednoczesnego występowania suszy atmosferycznej (A) i hydrologicznej (R) stwierdzono dla 471 pentad (21,8% okresu badań). Również we wrześniu wystąpiły pentady o najwyższej liczbie przypadków współwystępowania zjawiska suszy (10–12 przypadków na 30 lat). Wzrost częstości w drugim podokresie był już wyraźnie wyższy i wynosił 69 pentad (34,3%). Porównanie zbiorów danych również nie wykazało występowania różnic istotnych statystycznie ( $t=-1,883$ ). Jednoczesne występowanie suszy glebowej (S) i hydrologicznej (R) stwierdzono dla 573 pentad (26,5% okresu badań). Taka „kombinacja” susz występowała najczęściej we wrześniu, październi-

ku i na początku listopada (11–13 przypadków na 30 lat). W drugim podokresie wystąpił wzrost liczby pentad z jednoczesnym występowaniem suszy (65 pentad, 25,5%) w porównaniu z okresem 1994–2008. Zmiana ta nie była jednak statystycznie istotna ( $t=-0,944$ ).

Najbardziej dotkliwe susze wyznaczono poprzez jednoczesne występowanie suszy atmosferycznej (A), glebowej (S) i hydrologicznej (R) (rys. 8). W badanym okresie wystąpiły 262 pentady spełniające ten warunek (12,1% okresu badań). Jego realizacja najczęściej miała miejsce między trzecią a szóstą pentadą września, kiedy wystąpiło 7–9 przypadków na 30 lat. W drugiej połowie okresu badań (2009–2023) liczba pentad spełniających omawiane kryterium była o 32 (27,8%) większa w porównaniu z pierwszym podokresem. Porównanie częstości pentad wyróżnionych według tego kryterium nie wykazało występowania statystycznych różnic między podokresami ( $t=-0,896$ ).

Na podstawie przeprowadzonych badań można wnioskować, że w perspektywie kolejnych lat dalszy wzrost temperatury powietrza będzie skutkował narastaniem czasu trwania coraz dotkliwszych susz (występowania równocześnie różnych rodzajów suszy) i niekorzystnym wpływem na środowisko przyrodnicze oraz działalność człowieka.



Rys. 8. Przebieg współwystępowania różnych rodzajów susz w ciągu roku (oznaczenia literowe jak w Tabeli 2)

The course of co-occurrence of various types of droughts during the year (letter designations as in Table 2)

## Wnioski

1. W okresie 30 lat (1994–2023) wyróżniono 824 pentady z suszą atmosferyczną, 712 pentad z suszą glebową i 1067 pentad z suszą hydrologiczną. Nie stwierdzono statystycznie istotnych różnic między liczbą susz w pierwszym (1994–2008) i drugim podokresie (2009–2023) badań.
2. W ciągu roku susze atmosferyczne wykazują w miarę równomierną liczebność w pentadach, częstość susz glebowych wzrasta od września do listopada, natomiast wzrost liczebności susz hydrologicznych następuje od lipca do października.
3. W okresie badań susze atmosferyczne, mimo dużej liczebności, miały charakter krótkotrwały (maksymalnie 9 pentad), w odróżnieniu od susz hydrologicznych odznaczających się długim czasem trwania (maksymalnie 45 pentad).
4. W badanym okresie wystąpiły 262 pentady spełniające warunek równoczesnego wystąpienia suszy atmosferycznej (A), glebowej (S) i hydrologicznej (R). Najczęściej sytuację taką stwierdzano między trzecią a szóstą pentadą września, kiedy zanotowano 7–9 przypadków na 30 lat. W drugiej połowie okresu badań (2009–2023) liczba pentad spełniających omawiany warunek była o 32 większa w porównaniu z pierwszym podokresem.

## Literatura

- Banasik K., Kaznowska E., Letkiewicz B., Wasilewicz M. 2022. Analiza wybranych charakterystyk hydrologicznych dwóch małych zlewni nizinnych. *Acta Scientiarum Polonorum – Formatio Circumiectus* 21(1): 33-47.
- Barker L.J., Hannaford J., Chiveron A., Svensson C. 2016. From meteorological to hydrological drought using standardised indicators. *Hydrology and Earth System Sciences* 20(6): 2483-2505.
- Bloomfield J.P., Marchant B.P., Bricker S.H., Morgan R.B. 2015. Regional analysis of groundwater droughts using hydrograph classification. *Hydrology and Earth System Sciences* 19(10): 4327-4344.
- Bochenek W. 2020. Prawidłowości obiegu wody na obszarze beskidzko-pogórskim Karpat Zachodnich na przykładzie zlewni Bystrzanki w świetle zmian klimatu i działalności człowieka (vol. 271). Wyd. IGiPZ PAN.
- Bochenek W., Wiejaczka Ł. 2023. Current and future variability of water supply to a mountain reservoir (Polish Carpathians). *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment* 37(12): 5051-5069.
- Dai A. 2013. Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature climate change* 3(1): 52-58.
- Dauksza L., Gil E., Kotarba A., Kramarz K., Niemirowska J., Słupik J., Starkel L. 1970. Badania fizyczno-geograficzne otoczenia stacji naukowo-badawczej Instytutu Geografii PAN w Szymbarku. *Dokumentacja Geograficzna* 1: 1-65.
- Gil E. 1994. Monitoring obiegu wody i spłukiwania na stokach. W: *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe)*. PIOŚ, Warszawa: 66-87.
- Grillakis M. G. 2019. Increase in severe and extreme soil moisture droughts for Europe under climate change. *Science of the Total Environment* 660: 1245-1255.
- Kazimierski B., Cabalska J., Mikołajczyk A., Pili-chowska-Kazimierska E. 2008. Ocena zagrożenia suszą hydrogeologiczną (gruntową) na obszarze Polski. W: W. Bochenek, M. Kijowska (red.) *Materiały XVIII Ogólnopolskiego Sympozjum Zintegrowanego Monitoringu Środowiska Przyrodniczego*, 40-41. Szymbark, IGiPZ PAN.
- Kingston D.G., Stage J.H., Tallaksen L.M., Hannah D.M. 2015. European-scale drought: understanding connections between atmospheric circulation and meteorological drought indices. *Journal of Climate* 28(2): 505-516.
- Kopciowski R., Zimnal Z., Chrzastowski J., Jan-kowski L., Szymakowska F. 1997. Szczegółowa mapa geologiczna Polski w skali 1: 50 000, arkusz Gorlice. Wyd. Państwowego Instytutu Geologicznego.
- Kowalczyk A. W., Jaguś A. 2023. The water outflow from neighbouring mountain catchments in the Polish Carpathians: A comparative analysis. *Journal of Water and Land Development* 58 (VII-IX): 148-157.
- Kożuchowski K. 2004. Zmienność opadów atmosferycznych w Polsce w XX i XXI wieku. W: K. Kożuchowski (red.) *Skala, uwarunkowania i perspektywy współczesnych zmian klimatycznych w Polsce*. Wyd. Biblioteka, Łódź: 47-57.
- Kubiak-Wójcicka K. 2020. Variability of air temperature, precipitation and outflows

- in the Vistula Basin (Poland). *Resources* 9(9): 1-103.
- Michalska B. 2011. Tendencje zmian temperatury powietrza w Polsce. *Prace i Studia Geograficzne* 47: 67-75.
- Mostowik K., Siwek J., Kisiel M., Kowalik K., Krzysik M., Plenzler J., Rzonca B. 2019. Runoff trends in a changing climate in the Eastern Carpathians (Bieszczady Mountains, Poland). *Catena* 182: 104174.
- Ozga-Zielińska M., Brzeziński J. 1994. *Hydrologia stosowana*. PWN, Warszawa.
- Peña-Angulo D., Vicente-Serrano S.M., Domínguez-Castro F., Lorenzo-Lacruz J., Murphy C., Hannaford J., Allan R.P., Trambly Y., Reig-Gracia F., El Kenawy A. 2022. The complex and spatially diverse patterns of hydrological droughts across Europe. *Water Resources Research* 58(4): e2022-WR031976.
- Samaniego L., Thober S., Kumar R., Wanders N., Rakovec O., Pan M., Zink M., Sheffield J., Wood E.F., Marx A. 2018. Anthropogenic warming exacerbates European soil moisture droughts. *Nature Climate Change* 8(5): 421-426.
- Sheffield J., Wood E.F. 2008. Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations. *Climate dynamics* 31: 79-105.
- Skowera B. 2014. Zmiany warunków hydrotermicznych na obszarze Polski (1971–2010). *Fragmenta Agronomica* 31(2): 74-87.
- Solon J., Borzyszkowski J., Bidłasik M., Richling A., Badora K., Balon J., Brzezińska-Wójcik T., Chabudziński Ł., Dobrowolski R., Grzegorzczak I., Jodłowski M., Kistowski M., Kot R., Krąż P., Lechnio J., Macias A., Majchrowska A., Malinowska E., Migoń P., Myga-Piątek U., Nita J., Papińska E., Rodzik J., Strzyż M., Terpiłowski S., Ziaja W. 2018. Physico-geographical mesoregions of Poland: Verification and adjustment of boundaries on the basis of contemporary spatial data. *Geographia Polonica* 91(2): 143-170.
- Starkel L. 1973. Cel i zakres studiów nad środowiskiem geograficznym okolic Szymbarku. *Dokumentacja Geograficzna* 1: 7-14.
- Starkel L., Gil E. (red.). 1994. Zintegrowany monitoring środowiska przyrodniczego: Stacja Bazowa Szymbark (Karpaty Fliszowe). Biblioteka Monitoringu Środowiska.
- Tomaszewska T. 1994. Susze atmosferyczne na przestrzeni ostatniego czterdziestolecia. *XXV Zjazd Agrometeorologów*, Olsztyn-Mierki. Olsztyn, Wyd. ART.: 169-178.
- Twardosz R., Niedźwiedź T., Łupikasza E. 2011. The influence of atmospheric circulation on the type of precipitation (Kraków, southern Poland). *Theoretical and Applied Climatology* 104: 233-250.
- Van Lanen H.A., Laaha G., Kingston D.G., Gauster T., Ionita M., Vidal J.P., Vlnas R., Tallaksen L.M., Stahl K., Van Loon A.F. 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes* 30(17): 3097-3104.
- Wójcik A., Rączkowski W., Mrozek T., Gil E., Zabuski L., Bochenek W. 2003. *ALARM Project Final Report* (maszynopis): 1-10.
- Wrzesiński D., Marsz A.A., Sobkowiak L., Styszynska A. 2022. Response of low flows of Polish rivers to climate change in 1987–1989. *Water* 14(18): 2780.
- Ziernicka-Wojtaszek A. 2006. Zmienność opadów atmosferycznych na obszarze Polski w latach 1971–2000. W: J. Trepińska, Z. Olecki (red.) *Klimatyczne aspekty środowiska geograficznego*. IGiGP Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków: 139-148
- Żmudzka E. 2009. Współczesne zmiany klimatu Polski. *Acta Agrophysica* 13(2): 555-568.

## Summary

The phenomenon of meteorological drought is becoming more and more common, especially in the temperate climate zone. The increase in their frequency is mainly due to climatic factors, including increases in air temperature and field evaporation. The consequence of meteorological droughts is soil droughts. In turn, the water deficit in the soil causes a drop in the water table and a reduction in the supply of watercourses.

The aim of the research was to determine changes in drought intensity over an annual period – for 5-day/pentad periods and over a multi-year period – 30 years (1994–2023) and to identify the co-occurrence of various types of droughts in the Bystrzanka catchment, which is located in the Beskid-foothill part of the Western Carpathians. It was hypothesised that an increase in air temperature would extend the duration of all types of droughts and increase their co-occurrence.

The research used data from the Research Station of the Institute of Geography and Spatial Organization of the Polish Academy of Sciences in Szymbark. Daily rainfall totals, groundwater depths in a shallow piezometer with a depth of 150 cm and average daily discharges in the gauging cross-section closing the Bystrzanka catchment were analysed. For each pentad, the average daily rainfall, average and minimum daily discharge, and average and minimum water level in the piezometer were calculated. The threshold level for meteorological drought was assumed to be one half of the average rainfall over multi-years. Soil drought was determined on the basis of the ground drought risk index  $k_n$ . The hydrological drought was calculated on the basis of characteristic discharges of the 2nd degree for the period 1994–2023, proposing our own method for determining the threshold value.

Based on the research, 824 pentads with meteorological drought, 712 pentads with soil drought and 1,067 pentads with hydrological drought were estimated. The highest frequency of droughts was recorded between mid-September and early November. Comparison of the number

of pentads with drought per year in two 15-year subperiods (1994–2008 and 2009–23) indicates no statistically significant differences between data sets for all drought categories. Based on the research, it was found that meteorological droughts have a relatively even number in subsequent pentads, the frequency of soil droughts increases from September to November, and the increase in the number of hydrological droughts occurs from July to October.

Over the 30-year study period, 189 cases of meteorological drought lasting more than one pentad were found, while for hydrological droughts the number of occurrences was 127. The smallest number of "multi-pentad" droughts was recorded for soil droughts – 95. The conclusion of the conducted research is that meteorological drought is a short-lasting episode (maximum 9 pentads) interrupted by a single rainfall impulse. Hydrological drought is a long-term phenomenon (maximum 45 pentads) interrupted by long-term rainfall.

The co-occurrence of meteorological, soil and hydrological droughts was observed during 262 pentads, and their severity increased in the second half of the study period. Most often, such a situation was observed between the 3rd and 6th pentad of September, when 7–9 cases were recorded every 30 years. In the second half of the research period (2009–23), the number of pentads meeting the discussed condition was 32 higher than that in the first sub-period.

As a result of the research, it was found that in the Beskid-foothill area of the Western Carpathians, the increase in air temperature at the beginning of the 21st century resulted in an increase in the number and duration of droughts. In the coming years, a further increase in air temperature will result in an increase in the duration of increasingly severe droughts (co-occurrence of various types of drought) and an unfavourable impact on the natural environment and human activities.