

DYNAMIKA HYDROKLIMATU A DOSTĘPNOŚĆ WODY DLA LASU NA OBSZARZE PUSZCZY ZIELONKA OD POCZĄTKU XX WIEKU

Bernard Okoński✉

Katedra Inżynierii Leśnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
ul. Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań

ABSTRAKT

Nieklimatyczne warunki środowiskowe, głównie miększe warstwy piasków i żwirów, stanowiące skały macierzyste gleby, o relatywnie niskiej zdolności retencyjnej, a ponadto głębokie zaleganie wody gruntowej, sprawiają, że lasy Puszczy Zielonki są narażone na susze. Dostępność wody na obszarze Puszczy zależy głównie od przebiegu elementów pogody, decydujących o przychodach wody, będących rezultatem opadów atmosferycznych, oraz od rozchodów wody, wynikających z przebiegu parowania terenowego. Te uwarunkowania mają istotne konsekwencje dla środowiska leśnego i determinują warunki prowadzenia gospodarki leśnej, szczególnie w kontekście niestabilności klimatu. W pracy podjęto próbę oceny przebiegu elementów pogody oraz miar suszy istotnych dla dostępności wody dla środowiska leśnego w okresie 1901–2023 dla lat, miesięcy, pór roku a także okresu wegetacyjnego. Oceniano dynamikę temperatury, opadów, ewapotranspiracji potencjalnej, klimatycznego bilansu wodnego oraz rozkładu i natężenia suszy z wykorzystaniem jej miar, tj. standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego oraz wskaźnika suszy Palmera. Oceniano główne trendy elementów klimatu, w tym również okresy znaczących zmian tych trendów (tzw. punkty zmiany).

Słowa kluczowe: Puszcza Zielonka, dostępność wody, dynamika klimatu, susze

WSTĘP

Znaczenie wody dla lasu – ze względu na jego liczne funkcje – można rozpatrywać w wielu wymiarach. Spełnianie każdej z tych funkcji wiąże się z uwarunkowaniami hydrologicznymi. Najistotniejszy jest wymiar ekologiczny i gospodarczy roli wody w lesie, ponieważ woda stanowi zarówno czynnik środowiska, jak i zasób gospodarczy. Oba ujęcia znaczenia wody dla lasu są komplementarne, jeśli wziąć pod uwagę cele gospodarki leśnej. Woda to główny czynnik ekologiczny kształtujący warunki produkcji biomasy wszystkich komponentów roślinnych ekosystemów leśnych, w tym drewna, oraz czynnik determinujący stan siedlisk i przebieg procesów siedliskowych.

Dostępność wody kształtuje stan lasu oraz przebieg procesów roślinności leśnej i siedlisk leśnych. Dynamika dostępności wody dla lasu kształtuje podatność lasu na oddziaływanie różnych czynników środowiska, w tym również zagrażających trwałości ekosystemów leśnych oraz prowadzeniu gospodarki leśnej (m.in. Kozłowski i Pallardy, 1997; Allen i in., 2010; Lindner i in., 2010; Suliński i Starzak, 2019; Czerniak i in., 2020; Jones i in., 2020). Puszcza Zielonka o powierzchni ponad 10 tys. hektarów to jeden z większych i ważniejszych kompleksów leśnych Wielkopolski ze względów gospodarczych, a także przyrodniczych oraz społecznych. Puszcza Zielonka jest powiązana

✉ bernard.okonski@up.poznan.pl, <https://orcid.org/0000-0002-0457-4744>

z lasami Pomorza, Ziemi Lubuskiej i Dolnego Śląska, stanowi część dużych zwartych obszarów leśnych zachodniej Polski. Obszar Puszczy Zielonki ze względu na bezpośrednie położenie w sąsiedztwie aglomeracji poznańskiej podlega silnej presji antropogenicznej manifestujące się m.in. przez duże obciążenie rekreacyjne, zabudowę osiedlową w bezpośrednim sąsiedztwie i fragmentację korytarzy ekologicznych, zanieczyszczenie powietrza, zaśmiecanie.

Puszcza Zielonka to kompleks leśny specyficzny pod względem obiegu. Główną cechą środowiska decydującą o dostępności wody dla lasów w Puszczy Zielonce stanowią warunki glebowo-gruntowe, to jest gruba pokrywa przypowierzchniowych piasków i żwirów (Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1990a; 1990b; 1994; 1996; Objąsnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, 1993; 1996; 1997; 2004; Mapa hydrogeologiczna Polski, 2005a; 2005b; 2010a; 2010b; Objąsnienia do mapy hydrogeologicznej, Polski 2005a; 2005b; 2010a; 2010b). Relatywnie niskie zdolności retencjonowania wody gleb leśnych oraz na ogół głębokie zaleganie wody gruntowej ograniczają dostępność wody dla roślinności leśnej (Miler i in., 2001; Okoński, 2006).

Obieg wody w ekosystemach Puszczy Zielonki jest zatem kształtowany najsilniej przez czynniki środowiska, czyli rodzaj skały macierzystej gleby oraz dynamikę klimatu (głównie dynamikę opadów atmosferycznych i parowania terenowego), które w niewielkim zakresie mogą być kontrolowane za pomocą działań gospodarczych. Sposób prowadzenia gospodarki leśnej może w relatywnie niewielkim stopniu wpływać na poprawę warunków wodnych. Służą temu szczególnie wszelkiego rodzaju działania z zakresu inżynierii ekologicznej określane jako mała retencja. Efekty ekologiczne takich działań w warunkach przyrodniczych Puszczy Zielonki mogą być niestety bardzo ograniczone przestrzennie, niemniej istotne na przykład dla potrzeb zwiększenia bioróżnorodności lub walorów rekreacyjnych lasu. W pracy podjęto próbę oceny przebiegu elementów meteorologicznych oraz miar suszy w okresie 1901–2021 dla potrzeb określenia dynamiki warunków dostępności wody dla lasu w tym wieloleciu. Ocena tak może dać podstawę do objaśnienia procesów i zdarzeń dotyczących lasu, także zagrożeń, które występowały w Puszczy Zielonce i powiązane były z dynamiką dostępności wody.

Warunki obiegu wody w Puszczy Zielonce

Puszcza Zielonka jest zwartym kompleksem leśnym o powierzchni przekraczającej 12 tys. ha i zmiennej długości 9–15 km w linii prostej na kierunku wschód-zachód i szerokości 10–20 km, zaś na osi południowy zachód-północny wschód jej długość to blisko 30 km (Bank Danych o Lasach..., 2024). Puszcza położona jest na wysoczyźnie, w mezoregionie Pojezierze Gnieźnieńskie, w zachodniej marginalnej jego części granicząc z mezoregionem Poznański Przełom Warty (Kondracki, 2002; Macias i in., 2021). Obszar leśny bierze nazwę od miejscowości Zielonka, położonej w jego centralnej części (51°41'29.9"N, 14°56'22.7"E). Wierzchnie utwory skalne w Puszczy Zielonce stanowią głównie piaski i żwiry wodnolodowcowe, lodowcowe, a także rzeczne, niekiedy poddane procesom eolicznym w holocenie. Powierzchnia terenu jest na ogół płaska lub falista, a w obszarze kulminacji moreny czołowej poznańskiej fazy zlodowacenia Wisły pagórkowata i falista (Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1990a; 1990b; 1994; 1996; Objąsnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, 1993; 1996; 1997; 2004; Macias i in., 2021). W Puszczy dominują siedliska świeże na glebach w większości wytworzonych z piasków i żwirów (Bank Danych o Lasach..., 2024).

Klimat Puszczy Zielonki należy do grupy klimatów umiarkowanych przejściowych charakterystycznych dla niżu polskiego i niżowych obszarów Europy Centralnej (Kozuchowski, 2011). Według powszechnie stosowanej klasyfikacji klimatu Köppena-Geigera, uwzględniającej kryteria termiczne i opadowe, obszar Puszczy Zielonki leży w strefie klimatu Cfb (klimat łagodny, oceaniczny bez pory suchej z ciepłym latem). W warunkach tej grupy klimatów średnia temperatura miesięczna najcieplejszego miesiąca wynosi poniżej 22°C, występują relatywnie ciepłe zimy, o temperaturze miesięcznej najzimniejszego miesiąca powyżej –3°C, nie mniej niż cztery miesiące o temperaturze średniej powyżej 10°C, zaś opady są stosunkowo równomiernie rozłożonych w okresie roku. Zasięg strefy Cfb na obszarze Polski zwiększył się w XX wieku, a granica tej strefy przesunęła się z rejonu linii Wisły do rejonu na wschód od dorzecza tej rzeki. Ekspansja strefy Cfb wiązała się z postępującą regresją strefy klimatu wilgotnego kontynentalnego Dfb obejmującej szerokim pasem Europę Wschodnią

aż do syberyjskiej części Azji Centralnej (Köppen, 1936; Kottek i in., 2006; Rubel i Kottek, 2010; Chen i Chen, 2013). W przypadku okresów miarodajnych 1961–1990 i 1991–2020 na obszarze Puszczy Zielonki średnia temperatura powietrza najzimniejszego miesiąca to $-2,0^{\circ}\text{C}$ i $-0,4^{\circ}\text{C}$ (styczeń), najcieplejszego to $17,8^{\circ}\text{C}$ i $19,3^{\circ}\text{C}$ (lipiec), zaś miesiące o temperaturze powyżej 10°C w obu okresach miarodajnych to maj–wrzesień (łącznie 5 miesięcy). Opady miesięczne maksymalne i minimalne dla okresów miarodajnych to 25 mm i 71 mm w lutym i lipcu w okresie 1961–1990 oraz 29 mm i 83 mm w lutym i kwietniu (dwa miesiące) oraz lipcu w okresie 1991–2020. Średnie temperatury i opady roczne dla obu okresów miarodajnych wynosiły $8,2^{\circ}\text{C}$ i $9,3^{\circ}\text{C}$ oraz 530 mm i 531 mm.

Główne czynniki klimatotwórcze kształtujące obieg wody w rejonie Puszczy Zielonki to: (1) przewaga cyrkulacji atmosferycznej oraz przebiegu głównych tras układów barycznych na ogólnym kierunku wschód-zachód (Zveryaev i in., 2008; Kożuchowski, 2011; Gimeno i in. 2012; Degirmendźić i Kożuchowski, 2016), (2) przejściowość klimatu związana z dynamiką cech klimatu morskiego i kontynentalnego, to jest wpływem Oceanu Atlantyckiego oraz rozległych obszarów lądowych Eurazji na wschodzie, (3) wilgotne masy powietrza ogólnie związane z cyrkulacją z kierunku zachodniego w okresie całego roku oraz z kierunku południowego w cieplej porze roku (masy powietrza znad M. Czarnego i M. Śródziemnego), suche masy powietrza związane z cyrkulacją wschodnią. Przejściowość wpływa na dużą zmienność stanów pogody w różnych horyzontach czasowych: dobowych, sezonowych, rocznych i wieloletnich. Zmienność ta manifestuje się w przypadku wielu cech klimatu, m.in. rozkładu ilościowego opadów, wilgotności powietrza, pokrywy śnieżnej, temperatury i parowania terenu oraz warunków wietrznych. (m.in. Bednorz, 2001; Degirmendźić i in., 2004; Styszyńska, 2007; Zveryaev i in., 2008; Luterbacher i in., 2010; Wypych, 2010; Witek i in., 2015; Degirmendźić i Kożuchowski, 2016; Niedźwiedz i in., 2021; Tomczyk i in., 2021; Szyga-Pluta, 2022).

Główne cechy obiegu wody wyróżniające lasy Puszczy Zielonki to: (1) relatywnie niska pojemność wodna gleb, (2) dominująca gospodarka przemiana, tj. ruch pionowy wody pochodzącej z opadów w głąb profilu glebowo-gruntowego na zasadzie infiltracji

oraz filtracji wody, (3) silne parowanie wody opadowej z przypowierzchniowych warstw gleby, ścióły oraz relatywnie duży udział intercepcji i transpiracji, (4) głębokie zaleganie wody gruntowej pierwszego poziomu wodonośnego (ok. 75% obszaru 1 poziom wodonośny ponad 5 m p.p.t.), (5) relatywnie niewielki udział mikrosiedlisk bardziej zasobnych w wodę (ok. 10% obszaru woda 2 m p.p.t. i mniej). Siedliska mniej zasobne w wodę położone są na obszarach wysoczyznowych Puszczy Zielonki, zaś bardziej zasobne, z przypowierzchniowym zaleganiem wody to. rynny polodowcowe, niecki zgłębień bezodpływowych oraz źródłiska.

Znacznie ograniczona zdolność długotrwałego utrzymywania odpowiednio wysokich stanów retencji i buforowania wody przez siedliska leśne Puszczy Zielonki pociąga za sobą silne uzależnienie dostępności wody dla lasu od bieżącego przebiegu warunków meteorologicznych. Stąd rozkład opadów determinuje przychody wody w siedliskach leśnych, a rozchody są warunkowane przez rozkład parowania terenu, w szczególności przebieg wszystkich form ewaporacji oraz transpiracji roślin leśnych. Należy uznać, że możliwości poprawy warunków wodnych na obszarze Puszczy Zielonki za pomocą różnych działań gospodarczych są relatywnie niewielkie oraz przestrzennie ograniczone. Najbardziej efektywne z nich dotyczą niektórych mikrosiedlisk oraz ich bezpośredniego sąsiedztwa – dolin leżących w pobliżu cieków, gdzie istnieją warunki do piętrzenia wody i uzyskania trwałych efektów ekologicznych. Niemniej główny czynnik determinujący dostępność wody dla lasów Puszczy Zielonki to dynamika klimatu, niepodlegająca niestety kontroli za pomocą działań gospodarczych.

METODYKA

Ocena przebiegu elementów klimatu oraz miar suszy została przygotowana na podstawie danych dostępnych w bazach przestrzennych wysokiej rozdzielczości $0,5^{\circ}$ (w rejonie badań gęstość siatki $56\text{ km} \times 34\text{ km}$) dla okresu 1901–2023. Dane klimatyczne pochodzą z reanalizy meteorologicznych danych pomiarowych. Dane są szczególnie przydatne do analizy zmienności czasowej i przestrzennej warunków hydroklimatycznych w długich horyzontach czasowych (m.in. Kalnay i in., 1996; Domínguez-Castro i in., 2020, Kaspar i in., 2020; Muñoz-Sabater i in., 2021). Źródła danych to:

- baza CRU TS4.08 dla temperatury powietrza (T), opadów atmosferycznych (P), ewapotranspiracja potencjalnej (PET). Klimatyczny bilans wodny (CWB) obliczono na podstawie opadów i ewapotranspiracji potencjalnej (Mitchell i in., 2005; Harris i in., 2014; 2020; High-resolution gridded datasets..., 2024)
- baza scPDSI Global dla wskaźnika surowości suszy Palmera w wersji samokalibrującej (scPDSI) (Palmer, 1965; Wells i in., 2004; van der Schrier i in., 2013; Barichivich i in., 2021; Drought indices, 2024)
- baza SPEIbase v.2.10.1 dla standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego dla okresów miesięcznych (Vicente-Serrano i in., 2010; Vicente-Serrano i Beguería, 2016; Global SPEI database, 2024).

Miesięczny wskaźnik surowości suszy Palmera (scPDSI), w porównaniu z klimatycznym bilansem wodnym (SPEI), jest bardziej miarodajny do oceny wilgotności okresów wielomiesięcznych w tym wieloletnich, ponieważ oprócz parametrów meteorologicznych uwzględnia retencję gleby. Wskaźnik SPEI jest miarą powiązaną z przebiegiem klimatycznego bilansu wodnego (CWB). W pracy oceniano również składowe

klimatycznego bilansu wodnego – opady atmosferyczne (P) oraz ewapotranspirację potencjalną (PET), a także temperaturę powietrza (T) jako główny czynnik kształtujący ewapotranspirację, a ponadto klasyczny parametr klimatu. Podział na klasy natężenia suszy (uwilgotnienia), wykorzystany dla Standaryzowanego Klimatycznego Bilansu Wodnego (SPEI) oraz Wskaźnika Surowości suszy Palmera (scPDSI), zestawiono w tabeli 1 (van der Schrier i in., 2006; Nam i in., 2015; Somorowska, 2016). Klasyfikacja ta nawiązuje do rozwiązań proponowanych w bazach scPDSI Global i SPEIbase, klasy obejmują pełen zakres zmienności warunków wodnych od skrajnie mokrych do skrajnie suchych.

Dla okresów rocznych oraz pór roku agregowano dane miesięczne według kryteriów meteorologicznych. Okresy grudzień–luty, marzec–maj, czerwiec–sierpień, wrzesień–listopad to odpowiednio zima, wiosna, lato, jesień. Do analiz parametrów klimatu wykorzystywano środowisko R (R Core Team 2024), a do analizy serii czasowych parametrów klimatu pakiety – chron, tseries (James i Hornik, 2024; Trapletti i Hornik, 2024), do modelowania liniowej regresji założono wymuszenie jednego punktu zmiany i wykorzystano pakiet mcp (Lindeløv, 2020; 2024) oraz pakiety ze zbioru tidyverse (Wickham i in., 2019; 2023)

Tabela 1. Klasyfikacja uwilgotnienia dla Standaryzowanego Bilansu Wodnego (SPEI) i Wskaźnika Surowości Suszy Palmera w wersji samokalibrującej

Table 1. Moisture classification for Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) and Palmer Drought Severity Index (self-calibrating version) (scPDSI)

Klasa Class	SPEI Zakres Range	scPDSI Zakres Range
Skrajnie mokry (wilgotny) – Extremely wet	≥ 2	≥ 4
Wyjątkowo mokry (wilgotny) – Severely wet	1,5 do 1,99	3 do 3,99
Umiarkowanie mokry (wilgotny) – Moderately wet	1 do 1,49	2 do 2,99
Lekko mokry (wilgotny) – Slightly wet	0,5 do 0,99	1 do 1,99
Zbliżony do normalnego – Near normal	0,49 do 0,49	–0,99 do 0,99
Lekko suchy – Slightly dry	–0,99 do –0,5	–1,99 do –1,00
Umiarkowanie suchy – Moderately dry	–1,49 do –1	–2,99 do –2
Wyjątkowo suchy – Severely dry	–2 do –1,5	–3,99 do –3
Skrajnie suchy – Extremely dry	≤ -2	≤ -4

do importu, manipulacji oraz wizualizacji danych, a dodatkowo do wizualizacji danych pakiet gplots (Warnes i in., 2024). Testowanie hipotez statystycznych prowadzono na poziomie istotności $p < 0,05$.

WYNIKI

Dynamika klimatycznego bilansu wodnego i jego składowych

Na obszarze Puszczy Zielonki w wieloleciu 1901–2023 wystąpił wzrost temperatury powietrza. Zmiany kierunkowe temperatury miały miejsce w przypadku średnich temperatur okresów rocznych. W przypadku średniej temperatury rocznej wzrost wystąpił od ok. lat 70. XX w. Największe prawdopodobieństwo wystąpienia punktu zmiany to 1977 rok, zaś tempo wzrostu to ok. $5,6^{\circ}\text{C}/100$ lat, to jest $2,6^{\circ}\text{C}$ w okresie występowania trendu liniowego (rys. 1).

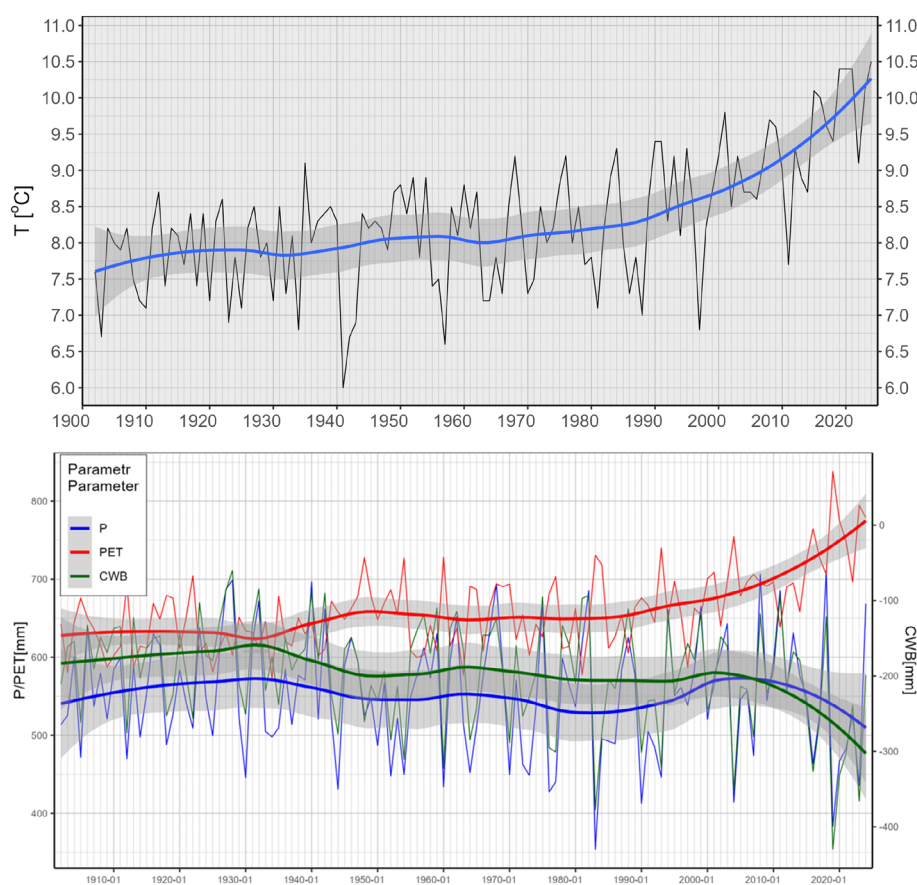
W przypadku dynamiki rocznych opadów atmosferycznych (P) w wieloleciu 1901–2023 według modelu regresji liniowej punkt zmiany był w 2011 roku, po tym okresie wystąpił trend malejący dla opadów rocznych. Tempo redukcji opadów rocznych w tym relatywnie krótkim okresie to ponad 40 mm. Dla rocznej ewapotranspiracji potencjalnej (PET), parametru silnie zależnego od przebiegu temperatury powietrza, liniowy trend rosnący w wieloleciu 1901–2023 wystąpił od 1983 roku. Tempo wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej w tym okresie wynosiło ok. 120 mm. Malejący trend klimatycznego bilansu wodnego według modelu regresji liniowej wystąpił od 1966 roku. Tempo zmiany klimatycznego bilansu wodnego dla tego okresu wynosiło ok. -110 mm (rys. 1).

W przypadku pór roku, zimy, wiosny, lata i jesieni, również wystąpił trend wzrostu temperatury. Największe prawdopodobieństwo wystąpienia punktu zmiany stanowiącego początek liniowego trendu wzrostu temperatury to lata 1961, 1956, 1984, 1923 dla zimy, wiosny, lata i jesieni. Warto zauważyć, że w przypadku średnich temperatur lata rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia punktu zmiany jest najbardziej skupiony, tj. punkt zmiany wystąpił w okresie między 1973 i 1994 rokiem, natomiast w przypadku innych pór roku rozkład ten jest bardziej rozproszony i obejmuje okres 50–60 lat. Stąd w przypadku temperatury lata zmiana tempa wzrostu zaznacza się silniej w znacznie krótszym okresie czasu (około 30 lat). Biorąc pod

uwagę tempo wzrostu temperatur po wystąpieniu punktu zmiany, wzrost ten wynosił dla zimy, wiosny, lata i jesieni $3,2$, $2,2$, $5,8$ i $1,5^{\circ}\text{C}/100$ lat, zaś wzrosty temperatury w tych okresach to $2,0^{\circ}\text{C}$, $1,5^{\circ}\text{C}$, $2,3^{\circ}\text{C}$ oraz $1,5^{\circ}\text{C}$. Średnia temperatura okresu zimy wzrosła od początku siódmej dekady XX wieku z ok. $-2,3^{\circ}\text{C}$ do $-0,3^{\circ}\text{C}$, co bez wątpliwości przekłada się znacznie na ograniczenie udziału retencji śnieżnej jako czynnika dostarczającego wodę dla ekosystemów leśnych w Puszczy Zielonce. Warto zauważyć, że w okresie poprzedzającym wystąpienie punktu zmiany, zmienności kierunkowej w ocenianym wieloleciu 1901–2023 nie stwierdzono (rys. 2).

W przypadku modelu regresji liniowej dla temperatury miesięcznej w wieloleciu 1901–2023, trend rosnący wystąpił dla wszystkich miesięcy. Najsilniejszy trend dotyczył miesięcy późnej wiosny i lata – czerwca, lipca i sierpnia oraz miesięcy zimowych – grudnia, stycznia i lutego. Tempo wzrostu temperatury dla tych miesięcy wynosiło $5,6^{\circ}\text{C}$, $3,4^{\circ}\text{C}$, $2,8^{\circ}\text{C}$ i $2,8^{\circ}\text{C}$, $2,9^{\circ}\text{C}$, $3,3^{\circ}\text{C}/100$ lat, natomiast w okresie zmian, którego początek to punkt zmiany (rok zmiany), tempo wynosiło $2,4^{\circ}\text{C}$, $1,9^{\circ}\text{C}$, $2,5^{\circ}\text{C}$ i $1,7^{\circ}\text{C}$ (grudzień i styczeń), $2,1^{\circ}\text{C}$. W przypadku innych miesięcy tempo wzrostu w przeliczeniu na 100 lat wynosiło od $1,1^{\circ}\text{C}$ (maj) do $2,3^{\circ}\text{C}$ (marzec). Punkt zmiany (rok zmiany) wystąpił najwcześniej w wieloleciu dla sierpnia, września, kwietnia, listopada i października, to jest w 1932, 1937, 1940 (kwiecień i listopad) i 1943 roku, najpóźniej w wieloleciu w 1980 roku (czerwiec). Dla innych miesięcy punkt zmiany położony był w przedziale lat od końca szóstej do połowy siódmej dekady XX w. (w okresie 1957–1966 roku). Warto zwrócić uwagę na to, że największe tempo wzrostu i jednocześnie największa gęstość rozkładu prawdopodobieństwa położenia punktu zmiany temperatury były dla miesięcy końca wiosny oraz lata czerwca, lipca oraz sierpnia (rys. 3, tab. 2).

Biorąc pod uwagę model regresji liniowej dla opadów miesięcznych w wieloleciu 1901–2023, trend malejący wystąpił dla kwietnia od 1939 roku. Tempo obniżania się opadów wynosiło -13 mm w okresie zmian oraz -15 mm/100 lat. W przypadku innych miesięcy trendy kierunkowe, o ile występowały, były bardzo słabe i nie ma prawidłowości rozkładu w porach roku miesięcznych trendów rosnących i malejących. Według tego modelu tempo wzrostu opadów dla tych



Rys. 1. Roczne: (górny wykres) temperatura powietrza (T), (dolny wykres) opady atmosferyczne (P), ewapotranspiracja potencjalna (PET) i klimatyczny bilans wodny (CWB) w Puszczy Zielonce w wieloleciu 1901–2023. Linia wyglądająca - model regresji lokalnej LOESS. Przedział ufności (szary)

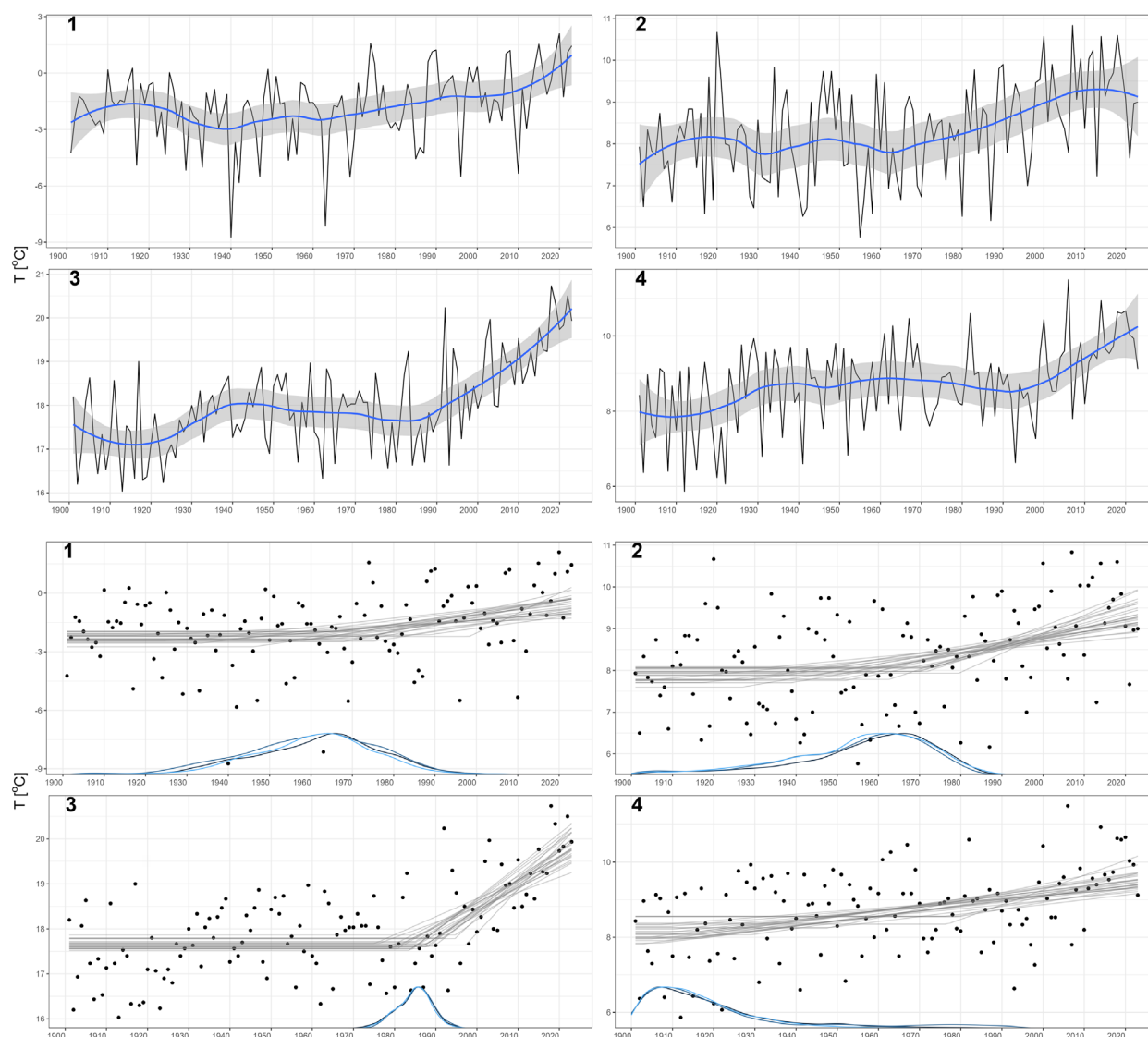
Fig. 1. Annual: (upper plot) air temperature (T), (lower plot) precipitation (P), potential evapotranspiration (PET) and climatic water balance (CWB) in Zielonka Forest in 1901–2023. Smoothing line - local regression model LOESS. The confidence interval (grey)

miesiący od -2 mm do 4 mm w okresie zmian, -4 mm do 7 mm/100 lat, natomiast punkt zmiany miesiący wystąpił w ósmej dekadzie XX wieku (tab. 2).

Dla regresji liniowej miesięcznej ewapotranspiracji potencjalnej w wieloleciu 1901–2023 silne trendy rosnące wystąpiły w przypadku czerwca, lipca, sierpnia, kwietnia oraz września. Tempo wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej dla tych miesięcy wynosiło 44 mm, 31 mm, 21 mm, 20 mm i 12 mm/100 lat oraz 16 mm, 20 mm, 19 mm, 18 mm i 10 mm w okresie zmian. Punkt zmiany (rok zmiany) dla tych miesięcy to lata 1986, 1957, 1932, 1935 i 1942. Słabe lub bardzo słabe trendy rosnące wystąpiły dla marca, maja

i października, 5 – 8 mm/100 lat, punkt zmiany dla tych miesięcy to lata 1956, 1978 i 1930. W przypadku stycznia, lutego, listopada i grudnia trendy dotyczące ewapotranspiracji nie występowały (tab. 2).

W przypadku modelu regresji liniowej miesięcznego klimatycznego bilansu wodnego w wieloleciu 1901–2023 silne trendy malejące wystąpiły dla miesięcy: kwiecień, sierpień, czerwiec, lipiec i wrzesień. Tempo zmiany klimatycznego bilansu wodnego dla tych miesięcy wynosiło -35 , -26 , -20 , -17 (dla lipca i września) i -11 mm/100 lat oraz -30 mm dla czerwca, -21 dla lipca oraz -9 mm dla września, jeśli wziąć pod uwagę okres zmian. Punkt zmiany (rok zmiany)

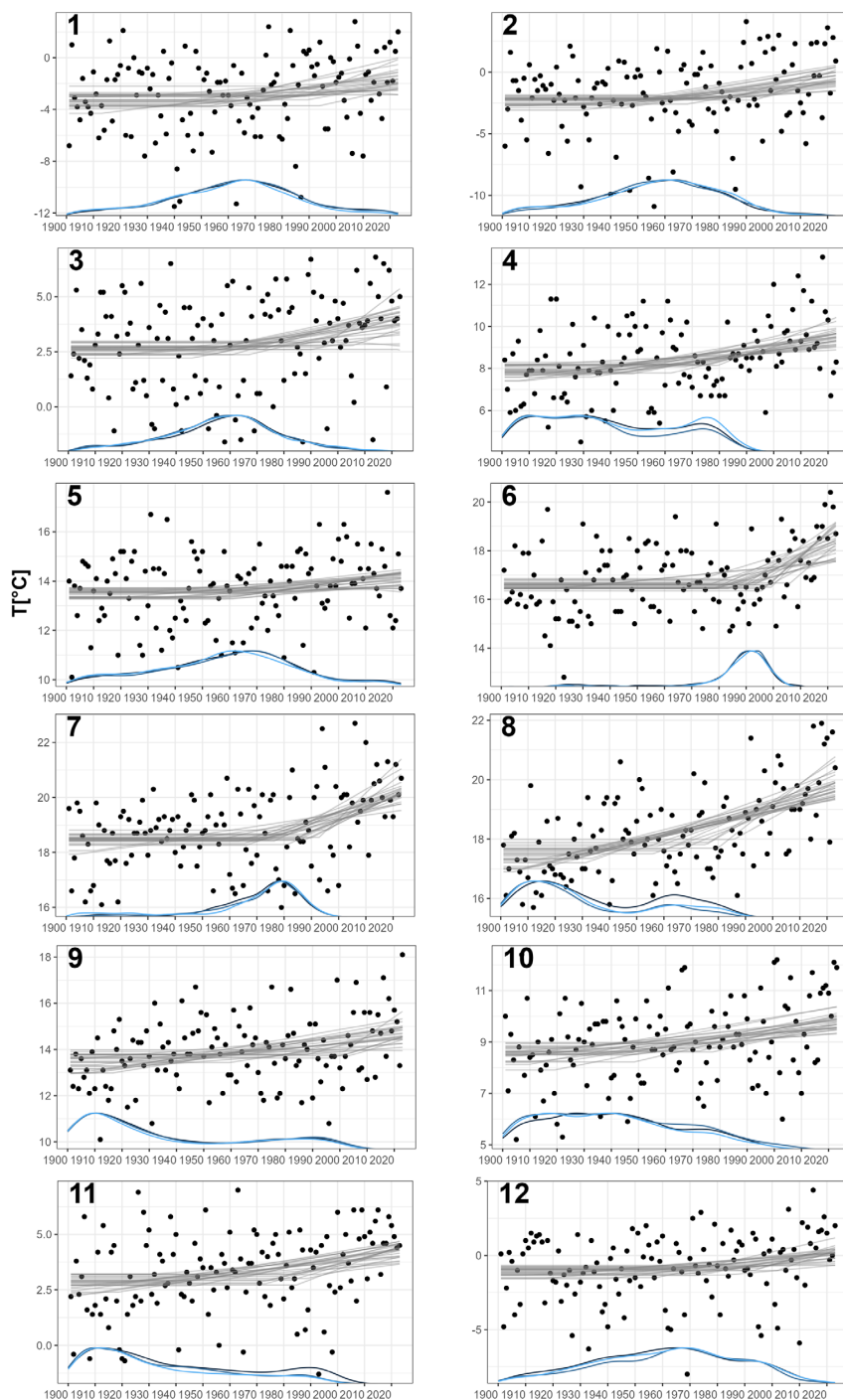


Rys. 2. Temperatura powietrza (T) w Puszczy Zielonce w wieloleciu 1901–2023 (górný wykres): 1 – zima, 2 – wiosna, 3 – lato, 4 – jesień; linia wygładzająca model regresji lokalnej LOESS (niebieski), przedział ufności (szary), (dolny wykres) analiza punktu zmiany modelu regresji liniowej, rozkład prawdopodobieństwa a posteriori punktu zmiany (niebieski)

Fig. 2. Air temperature in the Zielonka Forest in 1901–2023: (upper plot): 1 – winter, 2 – spring, 3 – summer, 4 – autumn, smoothing line – local regression model LOESS, the confidence interval (grey), (lower plots) change-point analysis for a linear regression model 1 – winter, 2 – spring, — summer, and 4 – autumn temperature, the posterior distribution probability of change-points (blue lines)

dla kwietnia, sierpnia, czerwca, lipca i września był w latach 1937, 1941, 1979, 1975 i 1970. Bardzo słabe trendy malejące wystąpiły dla marca oraz grudnia, -5 mm/100 lat, punkt zmian w przypadku tych miesięcy to lata 1978 i 1971. W przypadku lutego i listopada

trendy klimatycznego bilansu wodnego nie występowały. Jedynym miesiącem pojawienia się trendu rosnącego dla klimatycznego bilansu wodnego był styczeń (słaby trend rosnący od 1978 roku 8 mm/100 lat, to jest 4 mm w okresie zmian) (tab. 2).



Rys. 3. Model regresji liniowej z punktem zmiany miesięcznej temperatury powietrza (T) w Puszczy Zielonka w wieloleciu 1901–2023, rozkład prawdopodobieństwa *a posteriori* położenia punktu zmiany (niebieski)

Fig. 3. Linear regression model with a change point for monthly temperature (T) in Zielonka Forest in 1901–2023, the posterior distribution probability of change-point location (blue lines)

Tabela 2. Temperatura (T), opady (P), ewapotranspiracja potencjalna (PET), klimatyczny bilans wodny (CWB) na podstawie modelu regresji liniowej z punktem zmiany dla Puszczy Zielonki w wieloleciu 1901–2023

Table. 2. Temperature (T), precipitation (P), potential evapotranspiration (PET), climatic water balance (CWB) for linear regression model with a change point for Zielonka Forest in 1901–2023

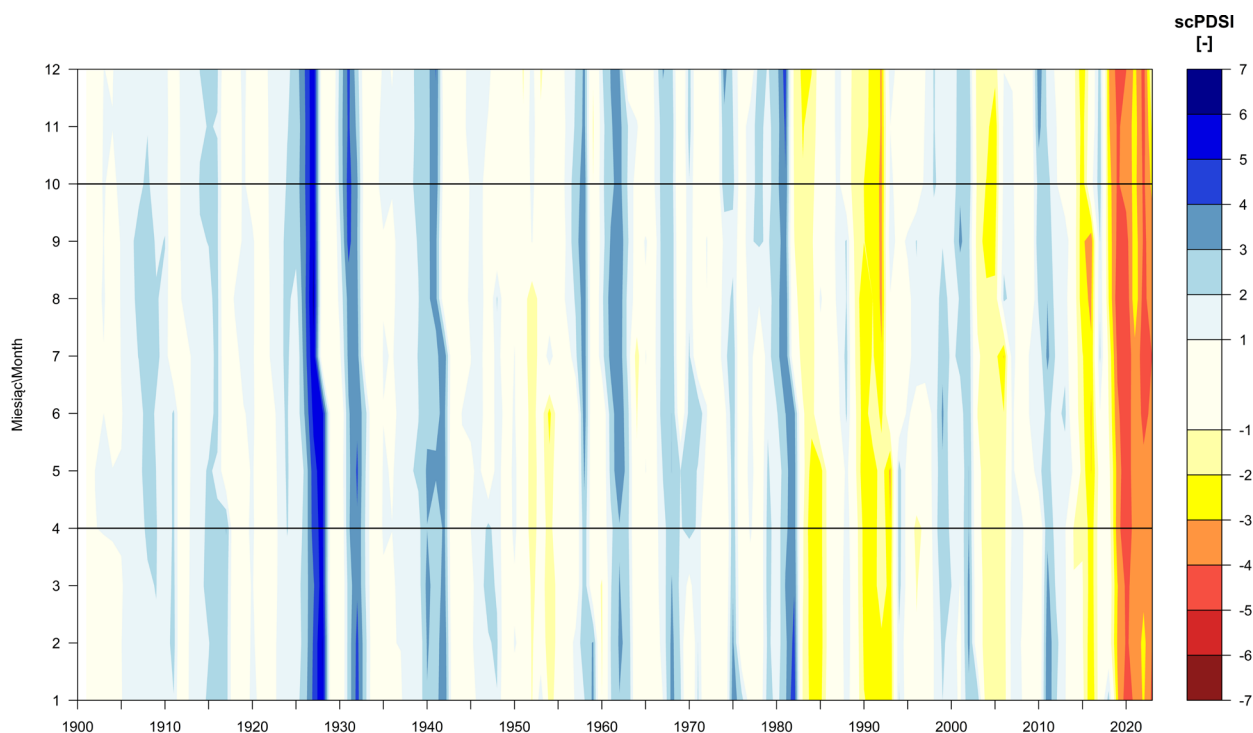
Miesiąc – Month	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Rok _T – Year _T	1963	1959	1957	1940	1959	1980	1966	1932	1937	1943	1940	1963
$\Delta T/100$ lat $\Delta T/100$ years	[°C] 2,9	3,3	2,3	2,2	1,1	5,6	3,4	2,8	1,7	1,9	2,2	2,8
$\Delta T/\text{okres}$ $\Delta T/\text{period}$	1,7	2,1	1,5	1,8	0,7	2,4	1,9	2,5	1,5	1,5	1,8	1,7
T ₂₀₂₃	-1,6	-0,2	4	9,7	14,1	19	20,4	20,4	14,9	10	4,6	0,6
T _{rok} T _{year}	-3,3	-2,3	2,5	7,9	13,4	16,6	18,5	17,9	13,4	8,5	2,8	-1,1
Rok _P – Year _P	1979	1979	1970	1939	1978	1976	1974	1972	1978	1979	1978	1975
$\Delta P/100$ lat $\Delta P/100$ years	[mm] 5	3	4	-15	-6	0	7	3	-4	4	0	-2
$\Delta P/\text{okres}$ $\Delta P/\text{period}$	2	1	2	-13	-3	0	4	1	-2	2	0	-1
P ₂₀₂₃	37	30	32	25	45	61	88	66	45	43	36	40
P _{rok} P _{year}	35	29	30	38	48	61	84	65	47	41	36	41
Rok _{PET} – Year _{PET}	1968	1967	1956	1935	1978	1986	1957	1932	1942	1930	1968	1974
$\Delta PET/100$ lat $\Delta PET/100$ years	[mm] -2	2	8	20	5	44	31	21	12	5	1	3
$\Delta PET/\text{okres}$ $\Delta PET/\text{period}$	-1	1	5	18	2	16	20	19	10	5	1	1
PET ₂₀₂₃	7	13	39	77	102	126	135	110	66	34	13	7
PET _{rok} PET _{year}	8	12	34	59	100	110	115	91	56	29	12	6
Rok _{CWB} – Year _{CWB}	1978	1978	1978	1937	1978	1979	1975	1941	1970	1973	1976	1971
$\Delta CWB/100$ lat $\Delta CWB/100$ years	[mm] 8	1	-5	-35	-11	-20	-17	-26	-17	-2	-1	-5
$\Delta CWB/\text{okres}$ $\Delta CWB/\text{period}$	4	0	-2	-30	-5	-9	-9	-21	-9	-1	0	-2
CWB ₂₀₂₃	31	17	-7	-51	-57	-58	-41	-48	-20	10	24	32
CWB _{rok} CWB _{year}	27	17	-5	-21	-52	-49	-32	-27	-11	11	24	34

Susze w Puszczy Zielonce

Rozkład miesięcznych miar suszy według wskaźnika surowości suszy Palmera (scPDSI) oraz klimatycznego bilansu wodnego (SPEI) wskazuje na zwiększenie się częstości oraz natężenia susz od dziewiątej dekady XX w., zaś zmniejszyła się częstość miesięcy

i okresów wielomiesięcznych zbliżonych do normalnych, a także lekko i umiarkowanie mokrych w Puszczy Zielonce (rys. 4–5).

Susze obejmujące wiele miesięcy wystąpiły w okresach od lipca 1983 do maja 1986, od grudnia 1989 do maja 1993 roku, od sierpnia 2003 do lipca

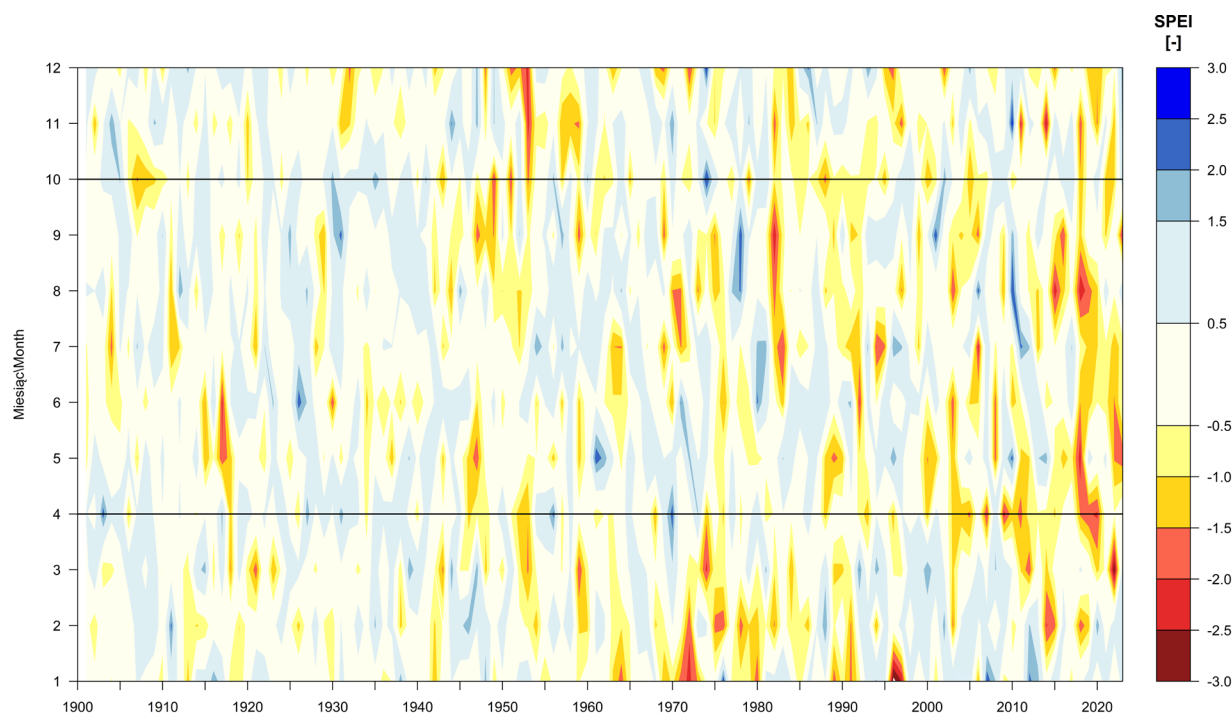


Rys. 4. Miesięczny wskaźnik surowości suszy Palmera (scPDSI) w wieloleciu 1901–2023 w Puszczy Zielonce
Fig. 4. Monthly Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in 1901–2023 in Zielonka Forest

2006 roku, od maja 2015 do września 2016 roku oraz od sierpnia 2018 do października 2023 roku. W okresie poprzedzającym, do dziewiątej dekady XX w., susze na ogół charakteryzowały się mniejszym natężeniem i wystąpiły dla okresu od stycznia do sierpnia 1952 i od stycznia do czerwca 1954. Okresy wyjątkowo suche i skrajnie suche, to jest najbardziej intensywne susze, w całym wieloleciu 1901–2023 wystąpiły w okresach od maja do sierpnia 1990 roku, od lipca 1992 roku do maja 1993 roku, od sierpnia 2015 roku do września 2016 roku, od grudnia 2018 do sierpnia 2021 roku oraz od marca 2022 roku do września 2023 roku. W wieloleciu od 1901 do 2023 roku wyjątkowo suche i skrajnie suche miesiące według Standaryzowanego Klimatycznego bilansu wodnego to styczeń 1917 roku, październik 1949 roku, listopad i grudzień 1953 roku, styczeń 1972 roku, wrzesień 1982 roku, lipiec 1983 roku, czerwiec i lipiec 1992 roku, lipiec 1994 roku, styczeń 1996 i 1997 roku, sierpień 2003 roku, lipiec 2006 roku, kwiecień 2007 i 2009 roku, listopad 2011 roku, luty i listopad 2014 roku, sierpień

2015, wrzesień 2016 roku, maj i sierpień 2018 roku, kwiecień 2019 i 2020 roku, marzec 2022 roku, wrzesień 2023 roku (rys. 5).

Według wskaźnika surowości suszy Palmera (scPDSI) wyjątkowo mokre i skrajnie mokre okresy w Puszczy Zielonka wystąpiły od czerwca 1926 roku do czerwca 1928 roku, od maja 1931 roku do października 1932 roku, od grudnia 1939 roku do września 1940 roku, od maja 1941 roku do lipca 1942 roku, od maja 1958 roku do lutego 1959 roku, od lipca 1961 roku do lutego 1963 roku, od grudnia 1967 roku do lipca 1968 roku, od grudnia 1974 roku do kwietnia 1975 roku, od lutego 1981 roku do czerwca 1982 roku, od września 2010 roku do kwietnia 2011 roku. Wyjątkowo mokre i skrajnie mokre miesiące w Puszczy Zielonce to kwiecień 1903 roku, luty 1911 roku, czerwiec 1926 roku, wrzesień 1931 roku, marzec i listopad 1944 roku, lipiec 1954 roku, kwiecień 1956 roku, maj 1961 roku, kwiecień i listopad 1970 roku, czerwiec 1971 roku, październik i grudzień 1974 roku, styczeń 1976 roku, sierpień i wrzesień 1978



Rys. 5. Miesięczny standaryzowany klimatyczny bilans wodny (SEPI) w wieloleciu 1901–2023 w Puszczy Zielonce
Fig. 5. Monthly Standardized Evapotranspiration-Precipitation Index (SPEI) in 1901–2023 in Zielonka Forest

roku, czerwiec 1980 roku, grudzień 1986 roku, luty 1988 roku, marzec 1992 roku, grudzień 1993 roku, maj 1996 roku, marzec 2000 roku, wrzesień 2001 roku, sierpień 2006 roku, styczeń 2007 roku, maj, sierpień i listopad 2010 roku, lipiec 2011 roku oraz styczeń 2012 roku (rys. 5).

Biorąc pod uwagę sumaryczny rozkład liczebności łącznie wszystkich miesięcy względem klas suszy dla miesięcznego wskaźnika Klimatycznego Bilansu Wodnego (SPEI) w trzech 41-letnich okresach 1901–1941 (okres 1), 1942–1982 (okres 2) oraz 1983–2023 (okres 3), można zauważyć, że liczebność wszystkich klas dla warunków suchych (od lekko suchych do skrajnie suchych) jest w okresie 2 i 3 o około 70% większa niż w okresie 1. Susze najsilniejsze, zakwalifikowane do klasy skrajnie suchych, były 2,5 razy bardziej liczne w okresie 3 niż w okresie 2 i 17 razy bardziej liczne w okresie 3 niż w okresie 1. Liczebność susz silnych, według klasyfikacji przypisanych do klasy wyjątkowo suche, była zbliżona w okresie 3 i 2 ok. 4 razy większa niż w okresie 1. Natomiast liczebność susz mniej intensywnych, należących do klasy

umiarkowanie suche, były o 40% większe w okresie 3 niż w okresie 2, a także 2 razy większa w okresie 3 niż w okresie 1. Susze najmniej intensywne, klasyfikowane jako lekkie, miały zbliżoną liczebność w okresie 1 i 3, natomiast w okresie 2 były o około 25% bardziej liczne. Biorąc pod uwagę klasę warunków wilgotnościowych zbliżonych do normalnych, najwyższa liczebność tej klasy była w okresie 1, a w okresach 2 i 3 liczebność dla tej klasy była zbliżona i mniejsza w porównaniu z okresem 1 o ok. 25%. Liczebność wszystkich klas mokrych były dla okresu 1 o ok. 10% większa niż dla okresu 2 i 3. Taki rozkład klas mokrych wiązał się z większą liczebnością w okresie 1 klas lekko mokrych i umiarkowanie mokrych o ok. 50% i 20% niż dla okresu 2 i 3. Natomiast w przypadku dwóch klas o największej wilgotności, to jest według klasyfikacji wilgotnościowej warunki wyjątkowo mokre, liczebność we wszystkich okresach była zbliżona, zaś dla klasy warunki skrajnie wilgotne liczebność w okresie 2 była ponad 3 razy większa niż w okresie 1 oraz 2,5 większa w okresie 3 niż w okresie 1 (tab. 3).

Tabela 3. Liczebność standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SPEI) w klasach wilgotności w okresach 1901–1941, 1942–1982 i 1983–2023 (każdy okres 41 lat)

Table 3. Quantity distribution of Standardized Climatic Water Balance in moisture classes in 1901–1941, 1942–1982 and 1983–2023 (each period equal 41 years)

Okres Period	Miesiąc Month	Klasa uwilgotnienia (SPEI) Moisture class (SPEI)								
		Skrajnie suchy Extremely dry	Wyjątkowo suchy Very dry	Umiarkowanie suchy Moderately dry	Lekko suchy Slightly dry	Zbliż. do normalnego Near normal	Lekko mokry Slightly wet	Umiarkowanie mokry Moderately wet	Wyjątkowo mokry Very wet	Skrajnie mokry Extremely wet
1983-2023	1	2	2	2	6	10	10	3	4	2
1942-1982		1	3	4	8	17	5	1	1	1
1901-1941		1	1	1	6	24	4	4	2	
1983-2023	2	1	4	3	4	10	12	3	4	
1942-1982		1	5	7	5	9	6	8	1	
1901-1941		1	1	5	5	20	3	6	1	1
1983-2023	3	1	1	7	3	16	6	3	3	1
1942-1982		1	3	2	12	14	3	3	3	
1901-1941		1	2	1	9	15	4	8	2	
1983-2023	4	3	4	8	4	17	4	1		
1942-1982		1	1	6	8	15	4	4	2	2
1901-1941		1	1	2	4	13	12	6	3	1
1983-2023	5	1	5	7	3	8	10	3	3	1
1942-1982		1	1	4	6	17	6	3	3	1
1901-1941		1	3	4	6	17	7	5	1	
1983-2023	6	1	3	6	5	9	4	12	1	
1942-1982		1	2	4	6	13	8	6		2
1901-1941		1	2	3	5	20	4	3	2	1
1983-2023	7	3	1	7	8	11	3	2	5	1
1942-1982		1	3	4	5	16	3	6	3	1
1901-1941		1	2	3	4	20	6	4	2	
1983-2023	8	2	3	5	6	19	1	3		2
1942-1982		1	5	4	5	15	6	2	3	1
1901-1941		1	4	4	3	12	14	6	2	
1983-2023	9	1	2	7	7	14	4	4	1	1
1942-1982		1	5	2	10	11	6	3	2	1
1901-1941		1	2	2	5	19	7	5	2	1
1983-2023	10	1	1	7	10	13	1	6	3	
1942-1982		1	4	5	7	12	4	4	3	1
1901-1941		1	1	3	6	10	15	2	4	
1983-2023	11	2	3	4	6	13	7	3	2	1
1942-1982		1	2	3	5	15	6	4	3	2
1901-1941		1	1	4	5	23	6	1	2	
1901-1941	12	3	3	5	6	17	3	3	3	1
1942-1982		2	3	4	6	15	6	2	2	1
1983-2023		1	1	2	6	15	10	6	1	
1983-2023	Razem	17	32	68	68	157	65	46	29	10
1942-1982		7	36	49	83	169	63	46	26	13
1901-1941		1	9	34	64	208	92	56	24	4

Biorąc pod uwagę rozkład liczebności poszczególnych miesięcy względem klas suszy dla miesięcznego wskaźnika Klimatycznego Bilansu Wodnego (SPEI) oraz porównując okres 1 i okres 3, można zauważyć, że w przypadku wielu miesięcy wystąpiła co najmniej ok. 50-procentowa redukcja liczebności klasy wilgotnościowej dla warunków zbliżonych do normalnych dla stycznia, lutego, maja, czerwca, lipca, listopada, a także redukcja liczebności klasy warunków mokrych dla kwietnia, lipca, sierpnia, września, października oraz grudnia. Redukcja liczebności w przypadku tych miesięcy wynosiła od ok. 50% do ponad 10-krotnej dla sierpnia i października. Wystąpił również wzrost liczebności bardzo intensywnych susz (klasy skrajnie suchy, wyjątkowo suchy) dla wszystkich miesięcy w okresie 3 lub w okresie 2 i 3 w porównaniu z okresem 1. Warto zauważyć, że w przypadku stycznia,

lutego, kwietnia, sierpnia, września oraz listopada skrajnie susze i wyjątkowe susze w okresie 1 nie występowały w ogóle. Podobnie okresy skrajnie mokre dla stycznia, marca, maja, lipca, sierpnia, października, listopada i grudnia w okresie 1 nie występowały, natomiast okresy skrajnie mokre były obecne w okresach 2 i 3. Zwiększenie liczebności klas suchych, szczególnie obejmujących najbardziej intensywne susze, przy jednoczesnej redukcji klas wilgotnych i normalnych w okresie 3 lub 3 i 2 w porównaniu z 1, jest bardzo widoczne w przypadku kwietnia, lipca, sierpnia, września i października. Styczeń i luty to miesiące, dla których liczebność w klasie wilgotnościowej lekko mokrej zwiększyła się ponaddwukrotnie w okresie 3 w porównaniu z okresem 2 i w porównaniu z okresem 1, dwuipółkrotnie dla stycznia oraz trzykrotnie dla lutego (tab. 3).

PODSUMOWANIE

W Puszczy Zielonce wystąpiły kierunkowe trendy rosnące temperatury rocznej oraz temperatur sezonowych i miesięcznych – wszystkich pór roku i miesięcy, natomiast początek tych trendów miał miejsce w wieloleciu 1901–2023. Siła trendów była największa w przypadku temperatury lata oraz wiosny. Zmienność ta wynikała głównie z silnych trendów rosnących temperatury miesięcznej czerwca, lipca, sierpnia oraz marca i kwietnia. Temperatura czerwca i lipca wyróżniała się nie tylko ze względu na siłę trendu, ale również odnośnie do dużej koncentracji prawdopodobieństwa wystąpienia punktu zmiany, to jest roku, który można uznać za początek zmian kierunkowych (1980 rok dla czerwca i 1966 rok dla lipca). Stąd również, w odniesieniu do okresu letniej pory roku, wystąpiła silna koncentracja rozkładu prawdopodobieństwa wystąpienia punktu zmiany, zaś największe prawdopodobieństwo wystąpienia punktu zmiany dla letniej pory roku to 1984 rok. Stosunkowo silne trendy wzrostu temperatury wystąpiły również dla miesięcy zimowych, jednak rozkład prawdopodobieństwa wystąpienia punktu zmiany był znacznie mniej skoncentrowany.

W przypadku miesięcznych opadów atmosferycznych relatywnie silny trend liniowy w wieloleciu 1901–2023 wystąpił wyłącznie dla kwietnia. Punkt zmiany dla tego trendu malejącego to 1940 rok. Prawdopodobieństwo rozkładu wystąpienia punktu zmiany było relatywnie skoncentrowane. Stąd można uznać, że ta zmienność opadów może mieć wpływ na kierunek zmian dostępności wody dla lasu. W przypadku ewapotranspiracji potencjalnej silne trendy rosnące wystąpiły dla czerwca, lipca, sierpnia i kwietnia oraz września. Dla marca, maja oraz listopada trendy rosnące ewapotranspiracji były bardzo słabe, a w przypadku miesięcy zimowych (grudzień, styczeń, luty) w zasadzie trendy liniowe nie wystąpiły. Punkty zmiany dla ewapotranspiracji potencjalnej występowały od czwartej do dziewiątej dekady XX wieku.

W przypadku klimatycznego bilansu wodnego relatywnie silne trendy spadku wystąpiły dla kwietnia, sierpnia, czerwca, lipca i września, relatywnie słabe lub bardzo słabe dla marca, maja i grudnia. Dla listopada w zasadzie brak trendów liniowych w przypadku klimatycznego bilansu wodnego, a dla stycznia

wystąpił słaby trend rosnący. Kwiecień to miesiąc, dla którego zmienność kierunkowa klimatycznego bilansu wodnego, oprócz zmienności temperatury i ewapotranspiracji potencjalnej (trendy rosnące), była również modulowana przez zmienność kierunkową opadów (trend malejący). Stąd w przypadku kwietnia tempo spadku klimatycznego bilansu wodnego było największe.

W Puszczy Zielonce głównym czynnikiem sprawnym decydującym o przekształceniu warunków dostępności wody w wieloleciu 1901–2023 jest dynamika temperatury. Parametr ten kształtuje ewapotranspirację. Stąd wzrost temperatury powietrza pociąga za sobą wystąpienie trendów rosnących ewapotranspiracji oraz trendów spadku klimatycznego bilansu wodnego. Wzrost temperatury powietrza to również podstawowa miara zmian klimatu obecnie obserwowanych w różnych jednostkach przestrzennych, w wymiarze lokalnym, regionalnym oraz globalnym (Maslin, 2014; World Meteorological Organization, 2016; Niedźwiedz i in., 2021).

Wielomiesięczne i wieloletnie susze w Puszczy Zielonka w wieloleciu 1901–2023 występują od dziewiątej dekady XX wieku. Liczebność silnych i bardzo silnych susz również zwiększyła się od dziewiątej dekady XX wieku, natomiast susze tej kategorii w okresie przed piątą dekadą XX wieku nie występowały w ogóle. Susze o absolutnie największym natężeniu w ocenianym wystąpiły pod koniec wielolecia w XXI wieku.

W Puszczy Zielonce normalne warunki wilgotnościowe oraz warunki lekko mokre dominowały pod względem liczebności (częstości) do piątej dekady XX wieku, redukcja liczebności warunków normalnych wystąpiła w okresie między piątą a dziewiątą dekadą XX wieku. Od dziewiątej dekady XX wieku pod względem liczebności (częstości) dominowały warunki normalne oraz lekko suche i umiarkowanie suche. Począwszy od piątej dekady XX wieku wystąpiło większe zróżnicowanie warunków wilgotnościowych manifestujące się większą liczebnością miesięcy skrajnie i wyjątkowo suchych oraz skrajnie i wyjątkowo mokrych.

W odniesieniu do miesięcy określanych jako półroczne ciepłe (kwiecień–wrzesień), to jest w okresie zbieżnym się w znacznej części z okresem aktywności drzew w rocznym cyklu fenologicznym, główna

tendencje dotyczące zmienności warunków wilgotnościowych to wzrost udziału susz bardzo silnych oraz wszystkich kategorii susz od dziewiątej dekady (dla września od piątej dekady) XX wieku. Redukcja udziału klas wilgotności zbliżonej do normalnej od piątej dekady XX wieku (za wyjątkiem kwietnia i sierpnia) i silna redukcja udziału klas mokrych dla kwietnia i sierpnia od piątej dekady XX wieku. Wzrost liczebności warunków o suszach skrajnych i wyjątkowych oraz warunków wyjątkowo wilgotnych i skrajnie wilgotnych wystąpił dla kwietnia od dziewiątej dekady XX wieku.

Biorąc pod uwagę wyniki oceny zmienności kierunkowych elementów bilansu wodnego oraz rozkładu częstości i natężenia susz w kontekście obiegu wody w środowisku, trendy rosnące ewapotranspiracji i trendy spadku klimatycznego przekładają się na pogarszanie warunków dostępności wody dla lasu. Tempo tych zmian było największe w przypadku czerwca, lipca, sierpnia, a przede wszystkim kwietnia. W przypadku kwietnia występowały w zbiegu trendy rosnące ewapotranspiracji oraz malejące opadów atmosferycznych. W przypadku miesięcy zimowych trendy dotyczące klimatycznego bilansu wodnego były bardzo słabe lub nie występowały w ogóle, a w przypadku stycznia wystąpił nawet słaby trend rosnący. Jednak biorąc pod uwagę relatywnie niskie zdolności retencyjne gleb w Puszczy Zielonce oraz obniżenie udziału retencji pokrywy śnieżnej ze względu na trendy rosnące temperatury, te stosunkowo korzystne warunki dotyczące okresu zimowego, mogą mieć niewielkie znaczenie w alimentacji siedlisk leśnych w wodę na początku okresu wegetacyjnego, dla których dostępność wody roztopowej ma znaczenie. W kontekście dostępności wody na początku okresu wegetacyjnego warto zwrócić uwagę na trendy dotyczące klimatycznego bilansu wodnego miesięcy okresu wczesnowiosennego, w przypadku kwietnia wystąpił najsilniejszy trend malejący klimatycznego bilansu wodnego, którego początek to przełom czwartej i piątej dekady XX w. Kwiecień wyróżnia się również pod względem rozkładu susz w wielolecie – w przypadku tego miesiąca zwiększyła się częstość i natężenie susz piątej dekady XX w., a od dziewiątej dekady XX w. również susz najsilniejszych. W okresach wilgotnych dla kwietnia zwiększyła się częstość okresów skrajnie i wyjątkowo wilgotnych,

a zmniejszyła lekko wilgotnych. Ogólnie ekstremalnie wilgotne i ekstremalnie suche warunki były częstsze dla tego miesiąca. Podobny kierunek zmian dotyczący rozkładu czasowego i jakościowego suszy wystąpił w przypadku większości miesięcy, w zasadzie prócz miesięcy zimowych. Redukcja częstości warunków zbliżonych do normalnych i okresów lekko suchych oraz lekko wilgotnych od piątej dekady XX w. i zwiększenie się udziału warunków skrajnie suchych oraz skrajnie wilgotnych szczególnie od dziewiątej dekady XX w. wskazuje na wzrost niestabilności w zakresie warunków wilgotnościowych w Puszczy Zielonce z różnymi tego konsekwencjami dla drzew, drzewostanów i siedlisk leśnych.

Zmiany kierunkowe temperatur w Puszczy Zielonce można również wiązać z wydłużeniem się okresu aktywności drzew i skrócenia fazy spoczynkowej. Proces wydłużenia trwania okresu aktywności dotyczy fazy początkowej i końcowej. Ze względów ekologicznych i gospodarczych bardzo istotna jest faza początkowa okresu wegetacyjnego. W tym dodatkowym okresie pozaspoczynkowym występuje potrzeba zachowania wystarczających stanów retencji wodnej w strefach gleby i gruntu penetrowanych przez korzenie pobierające wodę, aby zapewnić optymalne warunki do utrzymania aktywności drzew (Okoński i Dreger, 2022). Początek i koniec okresu wegetacyjnego jest dla lasu o tyle istotny, że głównie warunki hydrometeorologiczne związane z dostępnością wody w początkowych i końcowych miesiącach okresu wegetacyjnego decydują o przyrastaniu drzew i drzewostanów w roku bieżącym, a także latach kolejnych. Dla sosny zwyczajnej oraz dębu szypułkowego i bezszypułkowego, gatunków dominujących w Puszczy Zielonce, kluczowe dla przyrastania są głównie marzec, kwiecień, maj, czerwiec oraz sierpień i wrzesień, przy czym tworzenie się przyrostów w roku bieżącym zależy zarówno od warunków roku bieżącego, jak i lat poprzedzających (m.in. Zielski, 1997; Ważny, 2006; Wilczyński, 2013). W Puszczy Zielonce niekorzystne zmiany w zakresie dostępności wody dotyczyły każdego z wymienionych miesięcy, niemniej w przypadku kwietnia ze względu na siłę i kierunek zmian w wielolecie, a także znaczenie warunków wodnych tego miesiąca dla lasu, zmiany te mogą być uważane za najbardziej istotne.

WNIOSKI

Główne wnioski dotyczące uwarunkowań klimatycznych kształtujących dostępność wody dla lasu w Puszczy Zielonka w wieloletnim okresie 1901–2023 to:

1. Pogorszenie warunków decydujących o dostępności wody na początku okresu aktywności drzew w rocznym cyklu fenologicznym. Czynniki sprawczymi tych zmian są: (A) wzrost temperatury, a co za tym idzie wzrost ewapotranspiracji potencjalnej, zwłaszcza kwietnia, (B) obniżenie udziału wody roztopowej, pochodzącej z retencji śnieżnej, jako źródła wody dla lasu ze względu na wzrost temperatur zimowych i wczesnowiosennych, (C) silny spadek klimatycznego bilansu wodnego kwietnia ze względu na wystąpienie w zbiegu trendu malejącego opadów oraz trendu rosnącego ewapotranspiracji potencjalnej (od przełomu czwartej i piątej dekady XX w.), (D) wzrost niestabilności warunków wilgotności w siedliskach leśnych ze względu na redukcję częstości warunków normalnych oraz susz i warunków mokrych o słabym natężeniu od piątej dekady XX w. i zwiększenie się udziału warunków skrajnie suchych i skrajnie wilgotnych od dziewiątej dekady XX w., a wyjątkowo suchych i wilgotnych od piątej dekady XX w.
2. Pogorszenie się warunków decydujących o dostępności wody w pozostałych miesiącach okresu aktywności drzew w rocznym cyklu fenologicznym. Czynnikiem sprawczym są w tym przypadku: (A) wzrost temperatury (bardzo silny dla czerwca i lipca, silny dla pozostałych miesięcy tego okresu) i w konsekwencji wzrost ewapotranspiracji (bardzo silny dla czerwca i lipca i silny dla sierpnia oraz słaby dla września), co pociągało za sobą silną redukcję klimatycznego bilansu wodnego dla miesięcy od czerwca do września (dla miesięcy czerwiec, lipiec i wrzesień od ósmej, a dla sierpnia od piątej dekady XX w.), (B) wzrost niestabilności warunków wilgotności w siedliskach leśnych ze względu na redukcję częstości warunków zbliżonych do normalnych, a także susz i warunków mokrych o słabym natężeniu od piątej dekady XX w., a przy tym zwiększenie się udziału warunków skrajnie suchych i skrajnie wilgotnych od dziewiątej dekady XX w. oraz warunków wyjątkowo suchych i wilgotnych od piątej dekady XX w. (najsilniej dla czerwca i lipca).

3. Zmiana reżimów wilgotnościowych w zakresie rozkładu warunków mokrych i susz wskazujących na wzrost niestabilności dostępności wody dla lasu we wszystkich miesiącach oraz dominację udziału susz, w szczególności wystąpiły: (A) redukcja udziału warunków zbliżonych do normalnych, a także warunków lekko mokrych począwszy od piątej dekady XX w., (B) wzrost udziału susz bardzo silnych od dziewiątej dekady XX w. oraz silnych i umiarkowanych od piątej dekady XX w., (C) wzrost natężenia susz w okresie od dziewiątej dekady XX w. (najsilniejsze susze wystąpiły w XXI w.), (D) wzrost udziału warunków ekstremalnie wilgotnych od dziewiątej dekady XX w.

PIŚMIENNICTWO

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., Vennetier, M., ..., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecol. Manag.*, 259, 660–684. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.001> Get rights and content Bank Danych o Lasach. Pobrane 16 grudnia 2024 z: <https://www.bdl.lasy.gov.pl/portal/mapy>
- Barichivich, J., Osborn, T. J., Harris, I., van der Schrier, G., Jones, P. D. (2021). Monitoring global drought using the self-calibrating Palmer Drought Severity Index. W: R. J. H. Dunn, F. Aldred, N. Gobron, J. B. Miller, K. M. Willett... R. M. Zotta (red.), *State of the Climate in 2020* (s. 68–70). *Bulletin of the American Meteorological Society*, 102. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-21-0098.1>
- Bednorz, E. (2001). Pokrywa śnieżna a kierunki napływu mas powietrza w Polsce Północno-Zachodniej. Poznań: Wyd. UAM.
- Chen, D., Chen, H. W. (2013). Using the Köppen classification to quantify climate variation and change: an example for 1901–2010. *Environ. Dev.*, 6, 69–79. <https://doi.org/10.1016/j.envdev.2013.03.007>
- Czerniak, A., Grajewski, S., Krysztofiak-Kaniewska, A., Kurowska, E. E., Okoński, B., Górna, M., Borkowski, R. (2020). Engineering Methods of Forest Environment Protection against Meteorological Drought in Poland. *Forests*, 11(6), 614. <https://doi.org/10.3390/f11060614>
- Degirmendzić, J., Kożuchowski, K. (2016). Niże śródziemnomorskie jako czynnik klimatu Polski. Łódź: Wyd. UŁ.
- Degirmendzić, 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. *Int. J. Climatol.*, 24, 291–310. <https://doi.org/10.1002/joc.1010>
- Domínguez-Castro, F., Reig, F., Vicente-Serrano, S. M., Aguilar, E., Peña-Angulo, D., ..., El Kenawy A. M. (2020). A multidecadal assessment of climate indices over Europe. *Sci. Data*, 7(1), 125. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0464-0>
- Drought indices. Pobrane 12 grudnia 2024 z: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/#global>
- Gimeno, L., Stohl, A., Trigo, R. M., Dominguez, F., Yoshimura, K., ..., Nieto, R. (2012). Oceanic and terrestrial sources of continental precipitation. *Rev. Geophys.*, 50, RG4003. <https://doi.org/10.1029/2012RG000389>
- Global SPEI database. Pobrane 25 maja 2022 z: <https://spei.csic.es/database.html>
- Harris, I., Jones, P. D., Osborn, T. J., Lister, D. H. (2014). Updated high-resolution grids of monthly climatic observations – the CRU TS3.10 Dataset. *Int. J. Climatol.*, 34, 623–642. <https://doi.org/10.1002/joc.3711>
- Harris, I., Osborn, T. J., Jones, P., Lister, D. (2020) Version 4 of the CRU TS Monthly High-Resolution Gridded Multivariate Climate Dataset. *Sci. Data* 7, 109. <https://doi.org/10.1038/s41597-020-0453-3>
- High-resolution gridded datasets (and derived products). Pobrane 10 grudnia 2024 z: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>
- James, D., Hornik, K. (2024). *chron: Chronological Objects which Can Handle Dates and Times*. R package version 2.3-62. <https://CRAN.R-project.org/package=chron>
- Jones, J. A., Wei, X., Archer, E., Bishop, K., Blanco, J. A., ..., Creed, I. F. (2020). *Forest-Water Interactions Under Global Change*. W: D.F. Levia, D.E. Carlyle-Moses, S. Iida, B. Michalzik, K. Nanko, A. Tischer (red.), *Forest-Water Interactions. Ecological Studies (Analysis and Synthesis)*, 240. Cham: Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-030-26086-6_24
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., ..., Joseph, D. (1996). The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *Bull. Am. Meteor. Soc.* 77, 437–471. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1996\)077<0437:T-NYRP>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1996)077<0437:T-NYRP>2.0.CO;2)
- Kaspar, F., Niermann, D., Borsche, M., Fiedler, S., Keller, J., ..., Tinz, B. (2020). Regional atmospheric reanalysis activities at Deutscher Wetterdienst: review of evaluation results and application examples with a focus on renewable energy. *Adv. Sci. Res.*, 17, 115–128. <https://doi.org/10.5194/asr-17-115-2020>
- Kondracki, J. (2002). *Geografia regionalna Polski*. Warszawa: PWN.
- Köppen, W. (1936). *Das geographische System der Klimate*. W: W. Köppen, G. Geiger (red.), *Handbuch der Klimatologie* 1 (s. 1–44). Berlin: Borntraeger.
- Kottek, M., Grieser, J., Beck, C., Rudolf, B., Rubel, F. (2006). World Map of the Köppen-Geiger climate classification updated. *Meteorol Z.*, 15, 259–263. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0130
- Kozłowski, T. T., Pallardy, S. G. (1997). *Growth Control in Woody Plants. Physiological ecology*. London, New York, San Francisco: Academic Press.
- Kożuchowski, K. (2011). *Klimat Polski. Nowe spojrzenie*. Warszawa: PWN.
- Lindeløv, J. (2020). *mcp: An R Package for Regression with Multiple Change Points*. OSF Preprints DOI: 10.31219/osf.io/fzqxv.
- Lindeløv, J. (2024). *mcp: Regression with Multiple Change Points, version 0.3.4*. <https://CRAN.R-project.org/package=mcp>
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., ..., Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *Forest Ecol. Manag.*, 259, 698–709. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.09.023>
- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Küttel, M., Zorita, E., González-Rouco, ..., Przybylak, R. (2010). Climate Change in Poland in the Past Centuries and its Relationship to European Climate: Evidence from Reconstructions and Coupled Climate Models. W: R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), *The Polish climate in the European context: an historical overview* (s. 3–39). Dordrecht: Springer.
- Maslin, M. (2014): *Climate Change: A Very Short Introduction*. Oxford Univ. Press.
- Macias, A., Bródka, S., Kubacka, M. (2021). *Kotlina Gorzowska (315.33)*. W: A. Richling, J. Solon, A. Macias, J. Balon, J. Borzyszkowski, M. Kistowski (red.). *Regionalna geografia fizyczna Polski* (s. 191–198). Poznań: Bogucki Wyd. Naukowe..
- Mapa hydrogeologiczna Polski Ark. Murowana Goślina, Oborniki, Poznań, Swarzędz (2005, 2005, 2005, 2010). Warszawa: PIG-PIB.
- Miler, A., Grajewski, S., Okoński, B. (2001). *Stosunki wodne w wybranych ekosystemach Puszczy Zielonka*. Poznań: Wyd. UP.
- Mitchell, T.D., Jones, P.D., (2005). An improved method of constructing a database of monthly climate observations and associated high-resolution grids. *Int. J. Climatol.*, 25, 693–712. <https://doi.org/10.1002/joc.1181>
- Muñoz-Sabater, J., Dutra, E., Agustí-Panareda, A., Albergel, C., Arduini, G., ..., Thépaut, J.-N. (2021). ERA5-Land:

- A state-of-the-art global reanalysis dataset for land applications. *Earth Syst. Sci. Data*, 13, 4349–4383. <https://doi.org/10.5194/essd-13-4349-2021>
- Nam, W. H., Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Tadesse, T., Wilhite D. A., (2015). Drought hazard assessment in the context of climate change for South Korea. *Agricultural Water Management*, 160, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.029>
- Niedźwiedz, T., Usturnul, Z., Wypych, A., Czekeerda, D., Łupikasza, E., ..., Kolendowicz, L. (2021) Recent Climate Change: Change of Atmospheric Circulation. Air Temperature Change. Air Humidity Change. Precipitation Change. Snow Cover Change. Change of Wind. Change of Thunderstorms and Tornadoes. W: Falarz, M. (red.) *Climate change in Poland: Past, Present and Future*. Cham: Springer. 121, 420 <https://doi.org/10.1007/978-3-030-70328-8>
- Objaśnienia do mapy hydrogeologicznej Polski ark. Murowana Goślina, Oborniki, Poznań, Swarzędz (2005a, 2005b, 2010a, 2010b). Warszawa: PIG-PIB.
- Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski ark. Murowana Goślina, Oborniki, Poznań, Swarzędz (1993, 1996, 1997, 2004). Warszawa: PIG PIB.
- Okoński B. (2006). Modelowanie odpływu bezpośredniego w zależności od stanów pokrycia zlewni leśnej. *Rozp. Nauk.* 374. Poznań: Wyd. UP.
- Okoński, B., Dreger, S. (2022). Dostępność wody dla lasu z uwzględnieniem susz od początku XX wieku na obszarze Puszczy Noteckiej. *Acta Sci. Pol. Silv. Colendar. Ratio Ind. Lignar.*, 21(3), 159–176. <http://dx.doi.org/10.17306/J.AFW.2022.3>
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. *Weather Bureau Paper 45*. Washington D.C: US Dept. of Commerce.
- R Core Team (2024). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>
- Rubel, F., Kottek, M. (2010). Observed and projected climate shifts 1901–2100 depicted by world maps of the Köppen-Geiger climate classification. *Meteorol. Z.*, 19, 135–141. DOI: 10.1127/0941-2948/2010/0430
- van der Schrier, G., Briffa, K.R., Jones, P. D., Osborn, T. J. (2006). Summer moisture variability across Europe. *Journal of Climate*, 19, 2818–2834. <https://doi.org/10.1175/JCLI3734.1>
- van der Schrier, G., Barichivich, J., Briffa, K. R., Jones P. D. (2013). A scPDSI-based global data set of dry and wet spells for 1901–2009. *J. Geophys. Res. Atmos.*, 118, 4025–4048. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50355>
- Somorowska, U. (2016). Changes in drought conditions in Poland over past 60 years evaluated by the standardized precipitation-evapotranspiration index. *Acta Geophysica*, 64(60), 2530–2549. <https://doi.org/10.1515/acgeo-2016-0110>
- Styszyńska, A. (2007). Zmiany oceanizmu klimatu na obszarze wokółbałtyckim w II połowie XX wieku W: K. Piotrowicz, R. Twardosz (red.), *Wahania klimatu w różnych skalach przestrzennych i czasowych* (s. 135–143). Kraków: IGiGP UJ.
- Suliński, J., Starzak, R. (2019). Wybrane aspekty badania długoterminowych cykli zmian zapasu wody glebowej w drzewostanach jednogeneracyjnych. *Sylwan*, 163(3), 216–227. <https://doi.org/10.26202/sylwan.2018099>
- Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1997–2003. Warszawa: PIG PIB.
- Szczegółowa mapa geologiczna Polski Arkusze: Murowana Goślina, Oborniki, Poznań, Swarzędz (1990a, 1990b, 1994, 1996). Warszawa: PIG-PIB.
- Szyga-Pluta, K. (2022). Changes in snow cover occurrence and the atmospheric circulation impact in Poznań (Poland). *Theor. Appl. Climatol.*, 147, 925–940 <https://doi.org/10.1007/s00704-021-03875-8>
- 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>
- Trapletti, A., Hornik, K. (2024). tseries: Time Series Analysis and Computational Finance. R package version 0.10-58, <https://CRAN.R-project.org/package=tseries>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., (2016). Comment on “Candidate Distributions for Climatological Drought Indices (SPI and SPEI)” by James H. Stagge et al. *Int. J. Climatol.*, 36, 2120–213. <https://doi.org/10.1002/joc.4474>
- Vicente-Serrano, S.M., Beguería, S., López-Moreno, J. I., Angulo, M., El Kenawy, A. (2010). A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the Palmer Drought Severity Index. *J. Hydrometeorol.*, 11, 1033–1043. <https://doi.org/10.1175/2010JHM1224.1>
- Warnes, G., Bolker, B., Bonebakker, L., Gentleman, R., Hube, W., ..., Galili, T. (2024). gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data version 3.2.0. <https://CRAN.R-project.org/package=gplots>
- Ważny, T. (2006). *Dendrochronologia dębu*. W: W. Bugała (red.), *Dęby, Quercus robur L., Quercus petraea Liebl. Nasze drzewa leśne*, 11 (s. 39–61). Poznań–Kórnik: Instytut Dendrologii PAN.
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M. J. (2004). A self-calibrating Palmer Drought Severity Index. *J. Clim.*, 17,

- 2335–2351. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2004\)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017%3C2335:ASPDSI%3E2.0.CO;2)
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., D’Agostino McGowan, L., ..., Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *J. Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>
- Wickham, H., Cetinkaya-Rundel, M., Golemund, G. (2023). *R for Data Science: Import, Tidy, Transform, Visualize, and Model Data*. Sebastopol: O’Reilly Media.
- Wilczyński, S. (2013). Przyczyny krótkookresowych reakcji przyrostowych sosen z różnych siedlisk. *Sylwan* 157 (9), 662–670.
- Witek, M., Bednorz, E., Forycka-Ławniczak, H. (2015). Kontynentalizm termiczny w Europie. *Badania Fizjograficzne nad Polską Zachodnią IV*, A, 66, 171–182.
- World Meteorological Organization (WMO) and Global Water Partnership (GWP) (2016). *Handbook of Drought Indicators and Indices* (M. Svoboda and B.A. Fuchs). Integrated Drought Management Programme (IDMP), Integrated Drought Management Tools and Guidelines Series 2. Geneva.
- Wypych, A. (2010). Variability of the European Climate on the Basis of Differentiation of Indicators of Continentalism. W: R. Przybylak, J. Majorowicz, R. Brázdil, M. Kejna (red.), *The Polish climate in the European context: an historical overview* (s. 473–484). Dordrecht: Springer.
- Zielski A. (1997). Uwarunkowania środowiskowe przyrostów radialnych sosny zwyczajnej w Polsce północnej na podstawie wielowiekowej chronologii. Toruń: UMK.
- Zveryaev, I. I., Wibig, J., Allan, R. P. (2008). Contrasting interannual variability of atmospheric moisture over Europe during cold and warm seasons. *Tellus A*, 60, 32–41. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2007.00283.x

DYNAMICS HYDROCLIMATIC ELEMENTS IN THE ZIELONKA FOREST SINCE THE BEGINNING OF 20TH CENTURY. THE CONTEXT OF WATER AVAILABILITY TO FOREST

ABSTRACT

Deep layers of sand and gravel cover, relatively low water storage capabilities of the soil, and groundwater level depth, usually below the tree roots layer, are environmental conditions causing Puszcza Zielonka Forest to be highly susceptible to drought. The water available to the forest in Puszcza Zielonka is strongly subjected to the dynamics of weather conditions, both on the side of input and output, which are precipitation and evapotranspiration. These conditions have severe implications and are crucial determinants determining the frames of forest management, particularly regarding the climate change context. We have assessed the dynamics of meteorological elements and drought indices from 1901 to 2020 for the annual, monthly, seasonal, and vegetation periods. We studied air temperature, precipitation, potential evapotranspiration, climatic water balance, and drought measures: Standardized Precipitation Evapotranspiration Index and Palmer Drought Severity Index. The main changes in climate parameters, including the rate dynamics thresholds (change-points), were studied.

Keywords: Zielonka Forest, forest, water availability, droughts, climate dynamics