

DOSTĘPNOŚĆ WODY DLA LASU Z UWZGLĘDNIENIEM SUSZ OD POCZĄTKU XX WIEKU NA OBSZARZE PUSZCZY NOTECKIEJ

Bernard Okoński¹✉, Szymon Dreger²

¹Katedra Inżynierii Leśnej, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu,
Wojska Polskiego 71C, 60-625 Poznań

²Szymon Dreger – dyplomant, kierunek Leśnictwo

ABSTRAKT

Warunki fizyczno-geograficzne, zwłaszcza mięzsze zaleganie piasków, niskie zdolności retencyjne gleb i gruntów w strefie aeracji, a także głębokie zaleganie wody gruntowej, zwykle poniżej strefy czynnej korzeni drzew, sprawiają, że obszar Puszczy Noteckiej jest stosunkowo podatny na susze. Dostępność wody dla lasu na obszarze Puszczy zależna jest zatem silnie od przebiegu warunków atmosferycznych, zarówno w zakresie przychodów, będących rezultatem zarówno opadów atmosferycznych, jak i rozchodów wynikających z przebiegu procesu ewapotranspiracji. Te uwarunkowania mają istotne konsekwencje ekosystemowe i decydują o warunkach prowadzenia gospodarki leśnej, zwłaszcza w kontekście zmian klimatu. W pracy podjęto próbę oceny przebiegu elementów meteorologicznych oraz miar suszy w okresie 1901–2020 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 Notecka, dostępność wody, susze, dynamika klimatu

WSTĘP

Znaczenie wody dla lasu można rozpatrywać zarówno w wymiarze ekologicznym, jak i gospodarczym, ponieważ woda, w zależności od perspektywy, jest czynnikiem środowiska i zasobem gospodarczym. Oba podejścia do rozumienia znaczenia wody dla lasu uzupełniają się, jeśli chodzi o zasady prowadzenia gospodarki leśnej. Woda to główny czynnik ekologiczny kształtujący warunki produkcji biomasy wszystkich komponentów roślinnych ekosystemów leśnych oraz czynnik determinujący stan siedlisk i przebieg procesów siedliskowych. Dostępność wody kształtuje również stan drzewostanów, przebieg

procesów drzewostanowych, a szerzej – stan i przebieg procesów dotyczących roślinności leśnej. Warunki wodne współkształtują podatność lasu na oddziaływanie różnych czynników środowiska, w tym również niekorzystnych ze względu na prowadzenie gospodarki leśnej (m.in. Allen i in., 2010; Czarnowski, 1989; Czerniak i in., 2020; Jones i in., 2020; Lindner i in., 2010; Suliński i Starzak, 2019). Puszcza Notecka jest szczególnie wymownym przykładem takich zależności. Przyrost drzewostanów, szkody od susz, zagrożenie i szkody od pożarów są bardzo silnie powiązane z warunkami wodnymi panującymi na jej

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

obszarze (Kusiak, 2007; Przybyła i in., 2017; Kubala i in., 2021).

Puszcza Notecka to kompleks leśny specyficzny pod względem obiegu wody w ekosystemach. Główną nieklimatyczną cechą środowiska przyrodniczego, warunkującą dostępność wody dla lasów w Puszczy Noteckiej, są warunki litologiczne – miększe zaleganie pokrywy piasków o różnej genezie (Mapa hydrogeologiczna Polski 2005–2018; Objąsnienia do mapy hydrogeologicznej Polski 2005–2018; Objąsnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1997–2003; Przybyła i in., 2017; Szczegółowa mapa geologiczna Polski 1997–2003). Niskie zdolności retencyjne gleb leśnych, a także wierzchnich warstw skalnych oraz na ogół głębokie zaleganie wody gruntowej pod powierzchnią terenu znacząco ograniczają dostępność wody dla lasu, określając przy tym warunki panujące w ekosystemach leśnych oraz warunki prowadzenia gospodarki leśnej.

Obieg wody w ekosystemach Puszczy Noteckiej jest kształtowany najsilniej przez niesterowalne elementy środowiska, czyli rodzaj skały macierzystej oraz dynamikę klimatu (głównie przebieg opadów atmosferycznych i parowania terenowego). 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 Noteckiej mogą być niestety bardzo ograniczone przestrzennie. W pracy podjęto próbę oceny przebiegu elementów meteorologicznych oraz miar suszy w okresie 1901–2020 dla potrzeb określenia warunków dostępności wody dla lasu w tym wieloleciu. Taka ocena może dać podstawę do objaśnienia procesów i zdarzeń dotyczących lasu, także zagrożeń, które występowały w Puszczy Noteckiej i powiązane były z dynamiką dostępności wody.

WARUNKI OBIEGU WODY W EKOSYSTEMACH LEŚNYCH PUSZCZY NOTECKIEJ

Puszcza Notecka jest zwartym kompleksem leśnym o powierzchni przekraczającej 120 tys. ha i długości ponad 100 km w linii prostej na kierunku wschód-zachód i zmiennej szerokości od ok. 8 km na krańcach

wschodnich do 20–23 km (Bank Danych o Lasach..., 2022; Kubala i in., 2021). Obszar puszczański położony jest w mezoregionie Kotliny Gorzowska i mikroregionie Międzyrzecze Warty i Noteci, które stanowią zachodnią część pradoliny Toruńsko-Eberswaldzkiej (Kondracki, 2002; Macias i in., 2021). Wierzchnie utwory skalne w Puszczy Noteckiej stanowią głównie piachy rzeczne i wolnolodowcowe zalegające na glinach dennomorenowych, najczęściej poddane procesom eolicznym w holocenie po ustąpieniu zlodowacenia Wisły. Pola wydymowe, lokalnie pokryte wydymami śródlądowymi, wyniesione 20–40 m ponad powierzchnię terenu, to typowy relief tego obszaru (Macias i in., 2021; Objąsnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski, 1997–2003; Szczegółowa mapa geologiczna Polski, 1997–2003). W Puszczy Noteckiej dominują siedliska borowe świeże na glebach wytworzonych z piasków (Bank Danych o Lasach..., 2022; Kubala i in., 2021).

Klimat Puszczy Noteckiej należy do grupy klimatów umiarkowanych przejściowych charakterystycznych dla Europy centralnej (Kozuchowski, 2011). W niniejszej pracy odwołano się do uniwersalnej i ugruntowanej klasyfikacji Köppena-Geigera, która uwzględnia kryteria termiczne i opadowe. Według tej klasyfikacji region Puszczy należy do strefy klimatu Cfb. Jest to strefa klimatu oceanicznego bez pory suchej z ciepłym latem o średniej temperaturze miesięcznej najcieplejszego miesiąca poniżej 22°C, stosunkowo ciepłą zimą o temperaturze miesięcznej najzimniejszego miesiąca powyżej –3°C, co najmniej czterech miesiącach o temperaturze średniej powyżej 10°C i opadach relatywnie 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 (Chen i Chen, 2013; Köppen, 1936, Kottek i in., 2006; Rubel i Kottek, 2010). Dla dwóch okresów miarodajnych 1961–1990 oraz 1990–2020 na obszarze Puszczy Noteckiej średnia temperatura powietrza najzimniejszego miesiąca to –1,6°C i 0°C (styczeń), najcieplejszego to 18,0°C i 19,5°C (lipiec), zaś miesiące o temperaturze powyżej 10°C w obu okresach miarodajnych

to maj–wrzesień (łącznie 5 miesięcy). Średni opad miesięczny dla dwóch okresów miarodajnych wynosił 44 mm i 45 mm, wartości maksymalne i minimalne średnich opadów miesięcznych, tj. 25 mm i 67 mm oraz 29 mm i 83 mm wystąpiły w lutym i lipcu. Średnie odchylenie standardowe miesięcznych opadów w obu okresach miarodajnych wynosiło 18 mm i 20 mm.

Najbardziej znaczące czynniki klimatotwórcze w rejonie Puszczy Noteckiej to dominacja cyrkulacji atmosferycznej i przebiegu głównych tras układów barycznych na kierunku wschód-zachód (Degirmendzić i Kożuchowski, 2016; Gimeno i in., 2012; Kożuchowski, 2011; Zveryaev i in., 2008). Istotne znaczenie ma przejściowość klimatu związana z dynamiką cech klimatu morskiego oraz kontynentalnego, to jest wpływem Oceanu Atlantyckiego oraz rozległych obszarów lądowych Eurazji. Przejściowość wpływa m.in. na dużą zmienność w różnych horyzontach czasowych: dobowych, sezonowych, rocznych i wieloletnich stanów pogody, rozkładu przestrzennego i ilościowego opadów, wilgotności powietrza, pokrywy śnieżnej, temperatury oraz warunków wietrznych (m.in. Bednorz, 2001; Degirmendzić i in., 2004; Degirmendzić i Kożuchowski, 2016; Luterbacher i in., 2010; Styszyńska, 2007; Szyga-Pluta, 2022; Tomczyk i in., 2021; Witek i in., 2015; Wypych, 2010; Zveryaev i in., 2008).

Cechy, które wyróżniają Puszczę Notecką pod względem obiegu wody w siedliskach leśnych, to: (1) niska pojemność wodna gleb, (2) dominująca gospodarka przemywana, tj. ruch pionowy wody pochodzącej z opadów w głąb profilu glebowo-gruntowego na zasadzie infiltracji i filtracji wody, (3) silne parowanie wody opadowej z przypowierzchniowych warstw gleby i ścióły, a także relatywnie duży udział intercepcji i transpiracji, (4) głębokie zaleganie pod poziomem terenu wody gruntowej pierwszego poziomu wodonośnego (na ok. 60% obszaru ponad 5 m p.p.t.), (5) relatywnie niewielki udział mikrosiedlisk bardziej zasobnych w wodę (poniżej 10% obszaru woda 2 m p.p.t. i mniej). Mikrosiedliska bogatsze w wodę to głównie siedliska z przypowierzchniowym zaleganiem wody w obniżeniach międzywydmowych i zgłębieniach bezodpływowych, źródłiska i doliny drobnych cieków, rynny jeziorne.

Opad netto w ekosystemach leśnych Puszczy Noteckiej, tj. część opadu atmosferycznego, który nie zostanie zatrzymany przez intercepcję koron drzew

i szczególnie słabo rozłożoną ściółę na siedliskach borowych, docierając do powierzchni gleby, infiltruje i przemieszcza się pionowo dzięki relatywnie dużej przepuszczalności gleby, a następnie skały macierzystej. Efekt takiego przemieszczania wody może być bardzo różny ze względu na możliwość korzystania z tej wody przez roślinność leśną. Woda opadowa w cieplej porze roku w znacznym stopniu paruje do atmosfery z wierzchnich warstw gleby i ścióły, a proces podsiąku kapilarnego jako mechanizm uzupełnienia jej straty w piachach puszczańskich jest bardzo ograniczony. Woda opadowa, dostając się do gleby, często tworzy warstwy wód zawieszonych o zmiennej miąższości, które mogą być pobierane przez korzenie drzew, o ile nie przemieszczą się grawitacyjnie do głębszych warstw lub przy powierzchni odparują do atmosfery. Jedynie w przypadku dużych opadów deszczu w okresie wegetacyjnym (duża intensywność i długi czas trwania opadów), a także w warunkach dostępności wody opadowo-roztopowej na początku okresu wegetacyjnego dostępność wody jest największa. Wówczas profil glebowy jest w pełnej miąższości wysycony wodą, którą są w stanie pobrać korzenie.

Ze względu na bardzo ograniczoną zdolność długotrwałego utrzymywania odpowiednio wysokich stanów retencji przez siedliska leśne dostępność wody dla roślinności leśnej w Puszczy Noteckiej jest bardzo silnie zależna od bieżącego przebiegu warunków meteorologicznych. Przychody wody determinuje przebieg opadów, zaś rozchody dynamika parowania terenowego – ewaporacji oraz transpiracji pokrycia roślinnego. Proces transpiracji, naturalny proces fizjologiczny dla drzew i innych roślin leśnych, paradoksalnie wpływa istotnie na redukcję dostępnej wody w ekosystemach leśnych. Podobnie naturalne procesy intercepcji, a szerzej zatrzymywania wody na powierzchni aparatów asymilacyjnych, gałęzi, kory i epifitów porastających drzewa, znacząco zwiększają ewaporację. Stąd z jednej strony las wymaga wody jako czynnika ekologicznego do utrzymania wielu procesów fizjologicznych roślin oraz procesów wewnątrzsystemowych, ale z drugiej strony wyróżnia się większym rozchodowaniem wody na tle innych naturalnych i antropogenicznych form pokrycia roślinnego, zwłaszcza w cieplej porze roku i okresie wegetacyjnym. Możliwości poprawy warunków wodnych w Puszczy Noteckiej należy uznać za relatywnie

niewielkie i ograniczone w zasadzie, tylko do niektórych mikrosiedlisk i ich bezpośredniego sąsiedztwa, to jest dolin leżących w pobliżu cieków, gdzie istnieją warunki do piętrzenia wody i utrzymania efektów ekologicznych uzyskanych w wyniku piętrzenia. Jednak główny czynnik determinujący dostępność wody dla lasów Puszczy Noteckiej to dynamika klimatu, która ze względu na swą naturę nie może być kontrolowana za pomocą działań gospodarczych.

METODY BADAWCZE

Na potrzeby oceny przebiegu elementów klimatu i miar suszy korzystano z danych miesięcznych przygotowanych w bazach w siatce przestrzennej wysokiej rozdzielczości (gridowych) 0.5°, tj. w rejonie badań 56 km × 34 km dla okresu 1901–2020. Dane te opracowano na zasadzie reanalizy meteorologicznych danych pomiarowych. Zalety danych pochodzących z reanalizy to możliwość integracji szeregów pomiarowych pochodzących z różnych źródeł obejmujących różne okresy, eliminacja niespójności i błędów pomiarowych. Stąd dane takie są szczególnie przydatne do analizy zmienności czasowej i przestrzennej warunków hydroklimatycznych w długich horyzontach czasowych (m.in. Kalney i in., 1996; Kaspar i in., 2020; Muñoz-Sabater i in., 2021). Źródła danych stanowiły:

- Baza CRU TS4.05, z której pobrano temperaturę (T), opady (P), ewapotranspirację potencjalną (PET); klimatyczny bilans wodny (CWB/KBW) został obliczony jako dana pochodna na podstawie opadów i ewapotranspiracji potencjalnej (Harris i in., 2014; Harris i in., 2020; High-resolution gridded datasets..., 2022; Mitchell i in., 2005).
- Baza scPDSI Global, z której pobrano wskaźnik surowości suszy Palmera w wersji samokalibrującej (scPDSI); podział na klasy susz (warunków dostępności wody) dla scPDSI został zaczerpnięty z scPDSI Global (Barichivich i in., 2021; Drought indices, b.d.; Palmer 1965; van der Schrier i in., 2013; Wells i in., 2004),
- Baza SPEIbase v.2.7, z której pobrano standaryzowany klimatyczny bilans wodny o rozdzielczości czasowej 1, 3, 6 miesięcy (Vicente-Serrano i in., 2010; Vicente-Serrano i Beguería, 2016; Global SPEI database, b.d.).

W tabeli 1 zestawiono podział na klasy natężenia suszy wykorzystany dla Standaryzowanego Klimatycznego Bilansu Wodnego (SPEI) oraz Wskaźnika Surowości suszy Palmera (scPDSI) (Nam i in., 2015). Podział na klasy susz (warunków dostępności wody) dla tych parametrów nawiązuje do klasyfikacji zawartych w bazach scPDSI Global i SPEIbase. Klasy obejmują cały zakres zmienności warunków wodnych od skrajnie mokrych do skrajnie suchych.

Dane miesięczne agregowano dla pór roku według kryteriów meteorologicznych (tj. zima, wiosna, lato, jesień to okresy grudzień–luty, marzec–maj, czerwiec–sierpień, wrzesień–listopad) oraz okresów rocznych. Do analiz parametrów klimatu wykorzystywano śrowdowisko R (R Core Team, 2022), do analizy serii czasowych parametrów klimatu pakiety – chron, tseries

Tabela 1. Klimatyczny Bilans Wodny (SPEI) i Wskaźnik Surowości Suszy Palmera w wersji samokalibrującej. Podział na klasy suszy

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

Klasa Class (Climatic category)	SPEI Zakres wartości Range	scPDSI Zakres wartości Range
Skrajnie mokry Extremely wet	≥2	≥4
Wyjątkowo mokry Very wet	1,5 do 1,99	3 do 3,99
Umiarkowanie mokry Moderately wet	1 do 1,49	2 do 2,99
Lekko mokry 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 Very dry	–2 do –1,5	–3,99 do –3
Skrajnie suchy Extremely dry	≤–2	≤–4

(James i Hornik, 2020; Trapletti i Hornik, 2021), do modelowania liniowej regresji wielofazowej pakiet *mcp* (Lindeløv, 2020) oraz pakiety ze zbioru *tidyverse* (Wickham i in., 2019) do importu, manipulacji oraz wizualizacji danych, a dodatkowo do wizualizacji danych pakiet *gplots* (Warnes i in., 2022).

Podjęto również próbę znalezienia podobieństwa (powiązań) między miesięcznym przebiegiem suszy w wieloleciu na potrzeby oceny wpływu i znaczenia grup na kształtowanie warunków dostępności wody dla lasu. Podobieństwa przebiegu miesięcznych miar susz (*scPDSI* i *SPEI*) były identyfikowane na podstawie metody grupowań. Zastosowano algorytm grupowania z wykorzystaniem odległości euklidesowej jako miary odległości aglomeracyjnej oraz metodę pełnego wiązania (najdalszego sąsiedztwa), stosowanie której jest szczególnie zasadne, jeśli w rezultacie aglomeracji powstają wyraźne wydzielone grupy (Everitt i in., 2011; Hartigan, 1975). W procesie testowania hipotez statystycznych przyjęto poziom istotności $p < 0,05$.

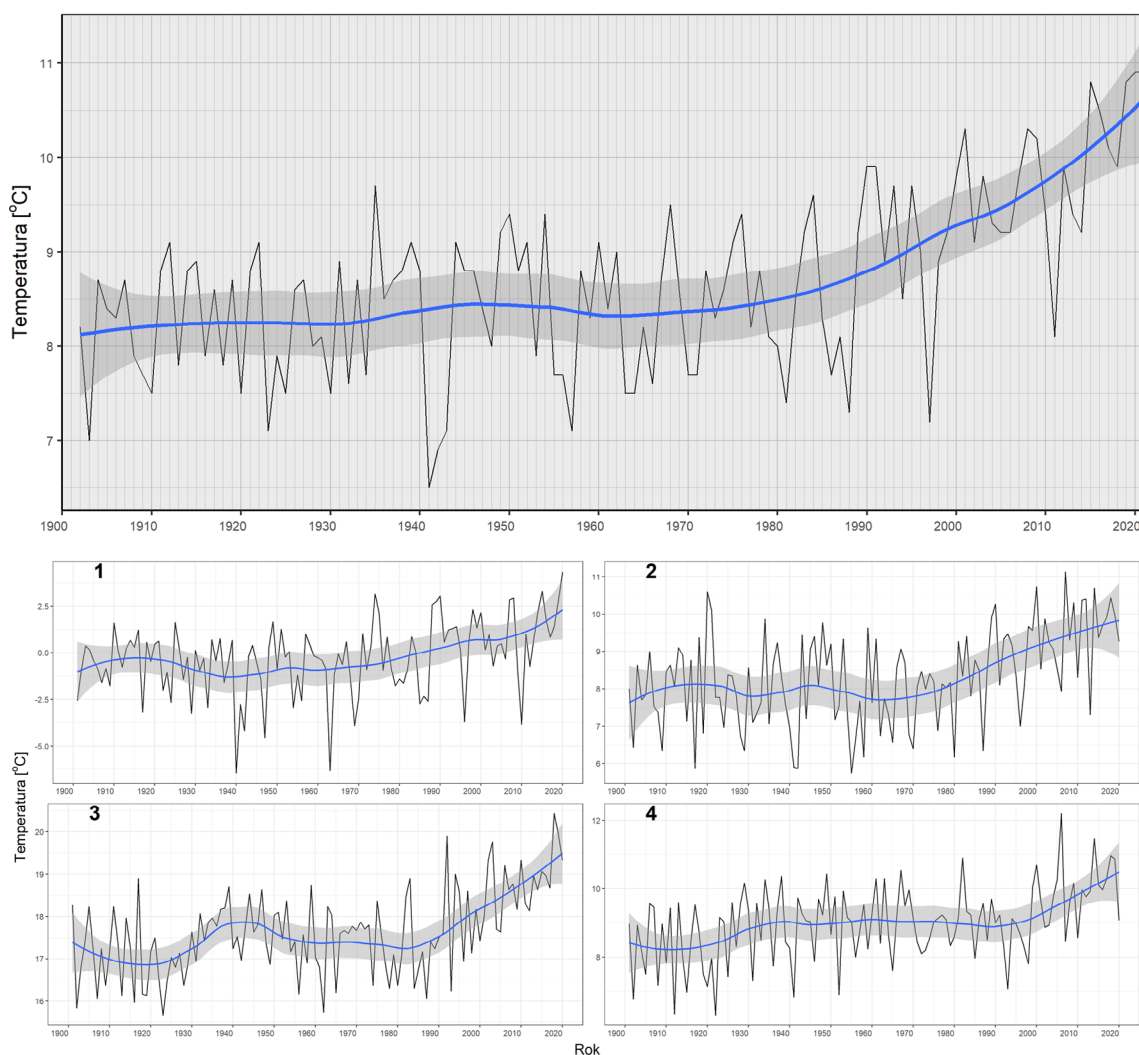
WYNIKI

Dynamika klimatycznego bilansu wodnego i jego składowych

Jednym z głównych czynników sprawczych decydujących o przekształceniu warunków obiegu wody zarówno w wymiarze globalnym, regionalnym, jak i lokalnym jest dynamika temperatury. Parametr ten moduluje rozchodowanie wody, wpływając pozytywnie zarówno na ewaporację, jak i transpirację, tj. wzrost temperatury pociąga za sobą wzrost ewapotranspiracji. Zmiany kierunkowe temperatury, ogólnie jej wzrost, w różnych horyzontach czasowych, to również podstawowa oznaka zmian klimatycznych (Maslin, 2018; World Meteorological Organization, 2016). Na obszarze Puszczy Noteckiej w wieloleciu 1901–2020 wystąpił wzrost temperatury. Zmiany te są obecne zarówno w przypadku średnich temperatur rocznych, średnich temperatur sezonowych, jak i temperatur miesięcznych (marca, kwietnia, sierpnia, grudnia) – których nie przedstawiono na wykresie, aby ograniczyć objętość pracy (rys. 1). W przypadku średniej temperatury rocznej wzrost wystąpił od ok. dziewiątej dekady XX wieku (lata 80.), zaś średnie tempo wzrostu to ok. $4,5^{\circ}\text{C}/100$ lat. Początek okresu zmian kierunkowych w przypadku każdej pory roku jest inny. Najwcześniej

w wieloleciu zmiany wystąpiły dla temperatur zimy, następnie wiosny, lata i jesieni. Najsilniejsze zmiany kierunkowe wystąpiły dla okresu lata i jesieni. W przypadku zimy wzrost wstąpił od ok. piątej dekady XX wieku (lata 40.). Średnie tempo wzrostu temperatury dla zimy wynosiło ok. $4,4^{\circ}\text{C}/100$ lat. Dla wiosny wzrost wystąpił od ok. ósmej dekady XX wieku (lata 70.), zaś od ok. dziewiątej dekady (lata 80.) dla lata. Średnie tempo wzrostu temperatury w okresie zmian kierunkowych to ok. $3,6^{\circ}\text{C}/100$ lat i $5,6^{\circ}\text{C}/100$ lat dla wiosny i lata. Pod koniec XX wieku, tj. od ok. lat połowy 90., zmiany kierunkowe wystąpiły dla temperatury jesieni. Średnie tempo tych zmian to ok. $6,0^{\circ}\text{C}/100$ lat. Warto zauważyć, że w okresie poprzedzającym brak było wyraźnej zmienności kierunkowej. W latach 80. XX wieku linia pozytywnych zmian średniej temperatury zimy przecięła rzędną 0°C , co można ogólnie interpretować jako znaczący moment w procesie redukcji udziału retencji śnieżnej i jej znaczenia w alimentacji wodnej ekosystemów Puszczy Noteckiej.

W klasycznym podejściu ocena warunków hydroklimatycznych obejmuje odniesienie się do przebiegu dwóch elementów pogody temperatury powietrza i opadów atmosferycznych. Uwzględnienie wyłącznie tych parametrów wynika z ograniczeń i przesłanek praktycznych. Przy takim podejściu nie ma konieczności obliczania miar pochodnych i dysponowania dodatkowymi parametrami do tych obliczeń (w ujęciu historycznym temperatura i opady są parametrami meteorologicznymi najbardziej dostępnymi i mierzonymi najdłużej). Bardziej miarodajna, zwłaszcza w zakresie oceny przebiegu warunków stanowiących o zmianach dostępności wody dla ekosystemów, jest analiza dynamiki parametrów bezpośrednio związanych z przychodem i rozchodem wody: opadów atmosferycznych i ewapotranspiracji potencjalnej, a przede wszystkim różnicy tych parametrów, tj. klimatycznego bilansu wodnego. Klimatyczny bilans wody w uproszczeniu daje podstawę do oceny ilości wody, która może pozostać w systemie hydrologicznym, na przykład ekosystemach leśnych, po uwzględnieniu „strat” na parowanie terenowe. W Puszczy Noteckiej opady roczne w wieloleciu charakteryzowały się ogólnie brakiem zmienności kierunkowej. Linia wygładzająca dla opadów rocznych przebiegała powyżej rzędnej 500 mm bez wyraźnej zmienności kierunkowej (rys. 2). Można przypuszczać, że opady roczne charakteryzowała

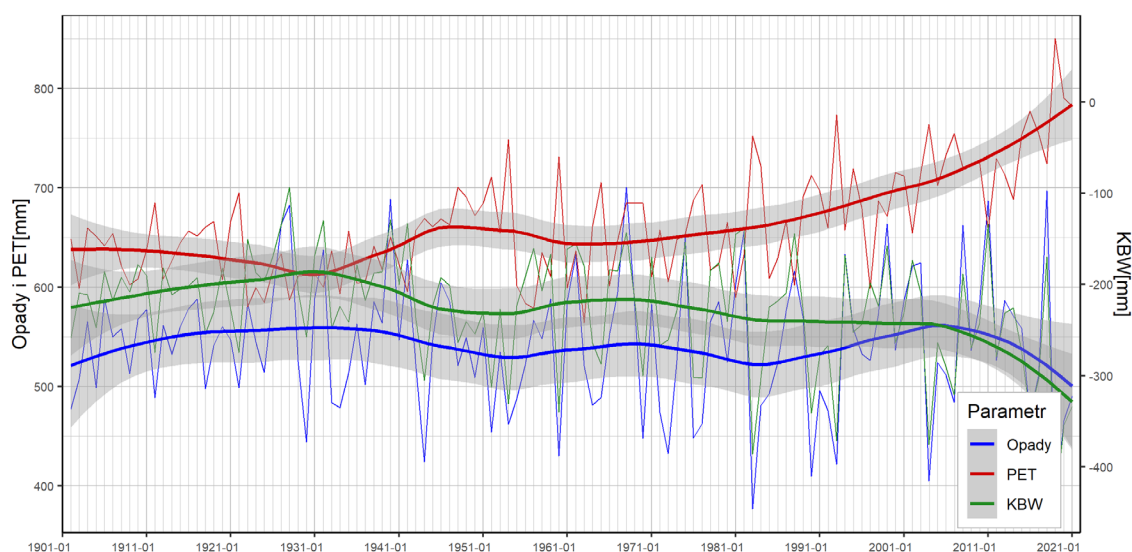


Rys. 1. Temperatura powietrza w Puszczy Noteckiej w wieloletniu 1901–2020: (górny wykres) roczna, (dolny wykres) 1 – zima, 2 – wiosna, 3 – lato, 4 – jesień. Linia wygładzająca wg modelu regresji lokalnej LOESS – niebieska; przedział ufności – szary

Fig. 1. Air temperature in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020: (above) annual, (below) 1 – winter, 2 – spring, 3 – summer, 4 – autumn. Smoothing line (blue) – local regression model LOESS. The confidence interval – grey

raczej typowa dla Niżu Polskiego zmienność okresowa (w niniejszej pracy nie oceniano okresowości). Zmienność w relatywnie krótkim okresie, obejmującym mniej niż 20 lat, od połowy pierwszej dekady XXI wieku (spadek opadów o ok. 25 mm) nie może być jeszcze oceniana jako długookresowa zmienność kierunkowa. W przypadku rocznej ewapotranspiracji potencjalnej od siódmej dekady XX wieku (lata 60.)

wystąpił wzrost. Średnie tempo wzrostu PET w okresie trendu to ok. 250 mm/100 lat. W przypadku klimatycznego bilansu wodnego spadek wystąpił od ok. czwartej dekady XX wieku (lata 30.). Średnie tempo spadku KBW wynosiło 170 mm/100 lat w okresie objętym tą zmiennością. W pierwszej dekadzie XXI wieku, analogicznie do przebiegu opadów, wystąpiło znaczące zwiększenie tempa spadku tego parametru.



Rys. 2. Roczne sumy opadów atmosferycznych, ewapotranspiracja potencjalna i klimatyczny bilans wodny w Puszczy Noteckiej w wieloleciu 1901–2020. Linia wygładzająca wg modelu regresji lokalnej LOESS niebieska; przedział ufności – szary

Fig. 2. Annual precipitation (Opady), potential evapotranspiration (PET) and climatic water balance (KBW) in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020. Smoothing line (blue) – local regression model LOESS; the confidence interval – grey

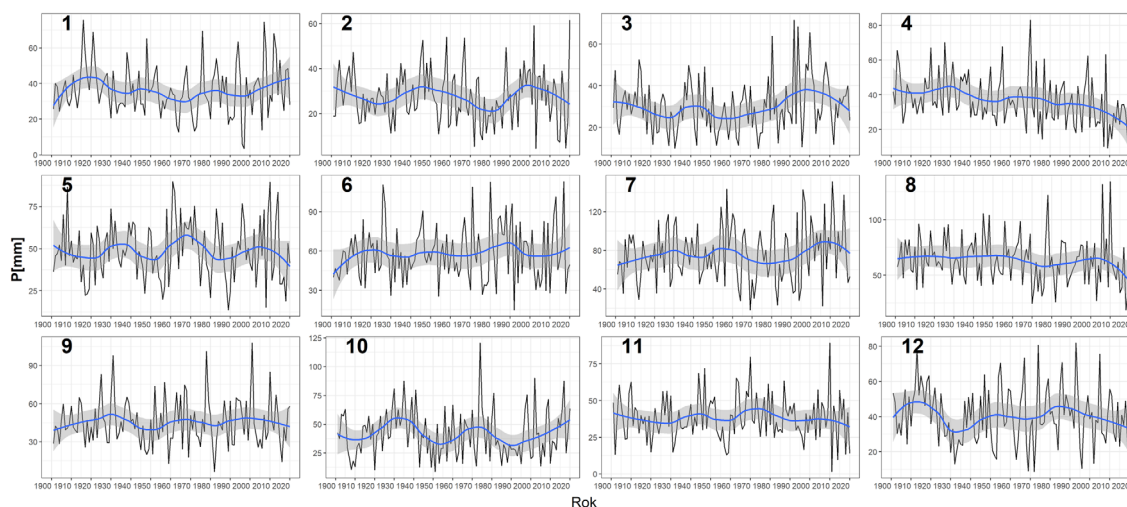
Jeśli uwzględnimy tę zmianę, średnie tempo spadku klimatycznego bilansu wodnego do ok. połowy pierwszej dekady XXI wieku wynosiło 100 mm/100 lat, a w następnym okresie 400 mm/100 lat.

Bardziej szczegółowy obraz przebiegu warunków obiegu wody w wieloleciu, ze względu na możliwości zaspokajania potrzeb wodnych lasu, daje ocena prawidłowości dotyczących zmienności miesięcznych opadów, ewapotranspiracji oraz klimatycznego bilansu wodnego. W przypadku opadów istotny statystycznie spadek wystąpił od piątej dekady XX wieku dla kwietnia (rys. 3). Tempo spadku w okresie wystąpienia tej zmienności to 22 mm/100 lat, a redukcja opadów to ok. 50% wartości początkowej. Jednak w końcowej części wielolecia, tj. po 2000 roku w przypadku lutego, marca, maja i sierpnia oraz nieco wcześniej, w dziesiątej dekadzie XX wieku dla listopada i grudnia, wystąpił spadek opadów. Zmienności w tych krótkich okresach nie były istotne statystycznie.

W przypadku przebiegu miesięcznej ewapotranspiracji potencjalnej wystąpiły dwie grupy kierunkowych zmienności pozytywnych. Pierwsza z tych grup łączyła miesiące zimnej części roku (styczeń–marzec,

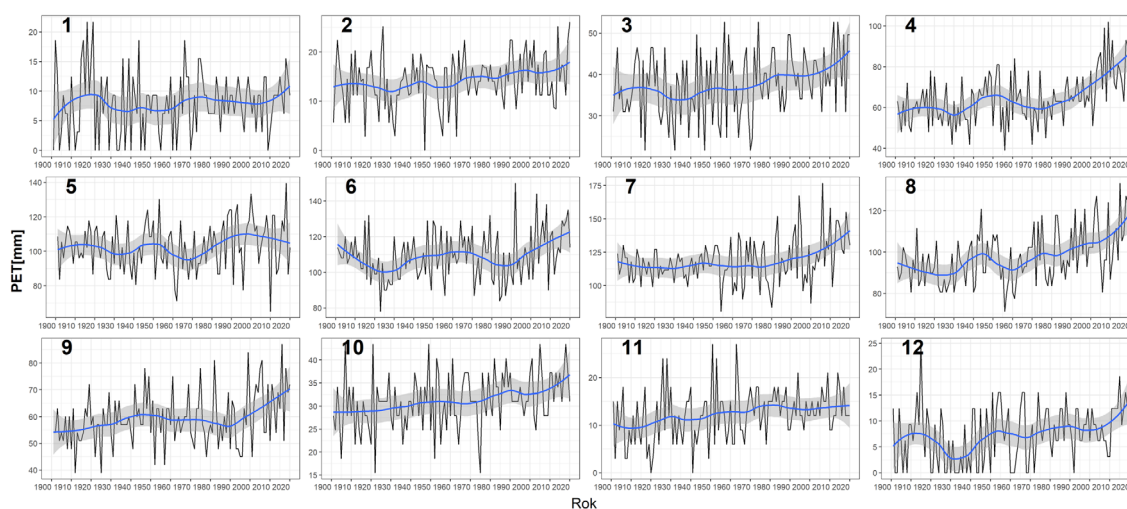
październik–grudzień), dla których zmiany obejmowały większą część okresu wieloletniego 1901–2020 (rys. 4). W wieloleciu od czwartej i piątej dekady XX wieku zmiany wystąpiły w lutym, marcu i grudniu. Była to zmienność o relatywnie małym średnim tempie wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej, tj. ok. 7 mm/100 lat w grudniu i lutym oraz ok. 13 mm/100 lat w marcu. Zmiany występujące w październiku i listopadzie obejmowały okres od pierwszej i drugiej dekady XX wieku, zaś średnie tempo wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej w okresie ich wystąpienia było relatywnie najmniejsze – ok. 5 mm/100 lat. W przypadku ewapotranspiracji potencjalnej stycznia rozkład zmienności w wieloleciu przebiegał inaczej niż dla innych miesięcy: w pierwszych trzech dekadach XX wieku wystąpił silny wzrost ewapotranspiracji potencjalnej, następnie wystąpiła stabilizacja, po czym od początku XXI wieku wystąpił ponownie silny wzrost. Zmienność istotna statystycznie wystąpiła dla lutego, marca, października oraz grudnia.

Do drugiej grupy zmienności w przypadku ewapotranspiracji potencjalnej należały zmiany pozytywne okresu wegetacyjnego. Zmiany pozytywne wystąpiły



Rys. 3. Opady atmosferyczne dla miesięcy w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej. Linia wygładzająca wg modelu regresji lokalnej LOESS niebieska; przedział ufności – szary

Fig. 3. Monthly precipitation in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020. Smoothing line (blue) – local regression model LOESS; the confidence interval – grey



Rys. 4. Ewapotranspiracja potencjalna dla miesięcy w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej. Linia wygładzająca wg modelu regresji lokalnej LOESS niebieska; przedział ufności – szary

Fig. 4. Monthly potential evapotranspiration in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020. Smoothing line (blue) – local regression model LOESS; the confidence interval – grey

od siódmej dekady XX wieku dla sierpnia, od dziewiątej dla kwietnia oraz lipca, a od dziesiątej dekady dla czerwca i września. Istotnie statystycznie były zmiany dla kwietnia, lipca, sierpnia i września. Maj jest jedynym miesiącem, w przypadku którego nie wystąpiła

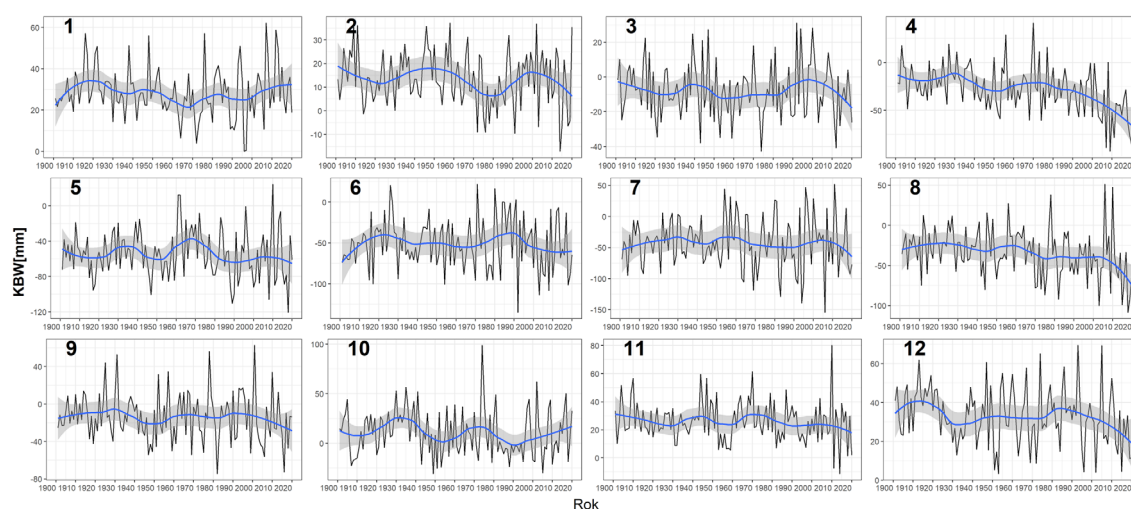
zmienność kierunkowa ewapotranspiracji. Tempo wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej w okresie wystąpienia zmian to w przypadku czerwca 63 mm/100 lat, kwietnia 60 mm/100 lat, września 50 mm/100 lat, sierpnia 47 mm/100 lat, lipca 42 mm/100 lat.

W przypadku klimatycznego bilansu spadek wystąpił od ok. ósmej dekady XX wieku dla kwietnia i grudnia (rys. 5). Tempo spadku w tym o okresie to 100 mm/100 lat dla kwietnia i 44 mm/100 lat dla grudnia. W przypadku pozostałych miesięcy nie stwierdzono wieloletniej zmienności istotnej statystycznie o charakterze kierunkowym. Jednak w końcowej części wiekolecia od ok. 2000 roku w przypadku lutego, marca, czerwca, lipca, sierpnia oraz września wystąpił spadek klimatycznego bilansu wodnego. W tym relatywnie krótkim okresie zmienność ta nie była istotna statystycznie, jednak tempo spadku klimatycznego bilansu wodnego wynosiło od 100 mm do 250 mm/100 lat.

Analiza punktu zmiany w modelu regresji liniowej z wymuszonymi punktami zmiany daje możliwość uproszczonej identyfikacji zmiany tempa trendu w wieloleciu oraz jego kierunku przy założeniu z góry liczby takich punktów i funkcji opisującej zmienność kierunkową. Podejście takie jest o tyle użyteczne, że upraszcza spojrzenie na relatywnie złożony przebieg zmienności wieloletniej parametrów hydroklimatycznych. Dla uproszczenia możliwości interpretacji zmienności wynikającej z przebiegu linii wygładzającej według modelu LOESS (identyfikacji zmian trendów z uwzględnieniem punktów przegięcia krzywej),

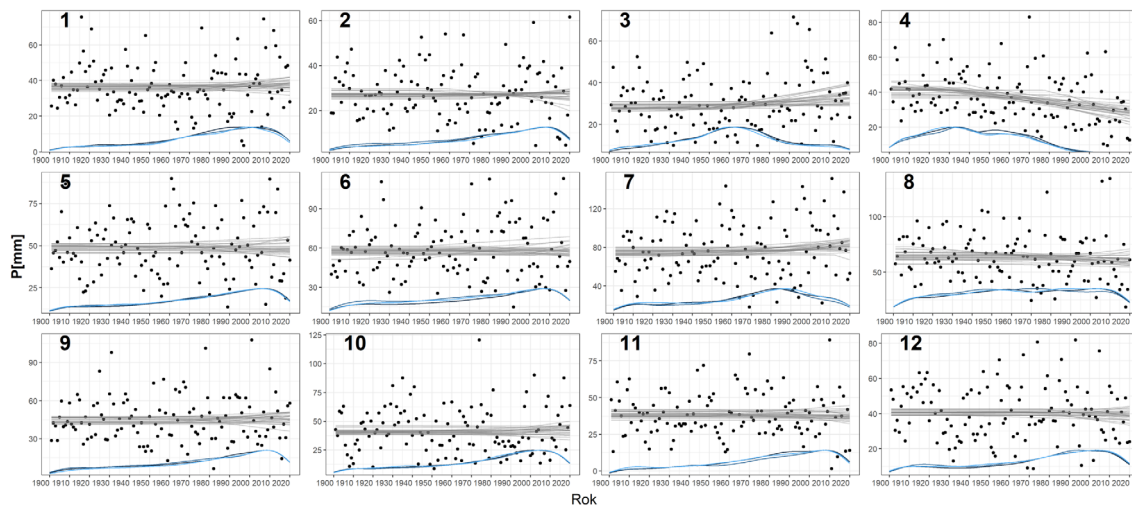
założono w modelu z punktem zmiany dla regresji liniowej, że można zidentyfikować jeden taki punkt.

Analiza punktu zmiany w modelu regresji liniowej z wymuszonym jednym punktem zmiany miesięcznych opadów atmosferycznych wykazała, że w przypadku opadów atmosferycznych wyłącznie dla kwietnia wystąpiła negatywna zależność, tj. opady w wieloleciu zmniejszały się, przy czym punkt zmiany wskazujący na przyspieszenie tempa redukcji opadów wystąpił z największym prawdopodobieństwem między czwartą a ósmą dekadą XX wieku. W przypadku pozostałych miesięcy istotne statystycznie trendy nie wystąpiły, a punkty zmiany były bardzo rozproszone w wieloleciu 1901–2020, co nie daje możliwości dokładniejszego ustalenia ich położenia w czasie (rys. 6). W przypadku analizy punktu zmian w modelu regresji liniowej z wymuszonym jednym punktem zmiany dla ewapotranspiracji potencjalnej wystąpiły trendy wzrostu ewapotranspiracji potencjalnej (pozytywne) dla wszystkich miesięcy z wyjątkiem stycznia. Dla miesięcy jesienno-zimowych punkty zmiany wystąpiły w pierwszej połowie wiekolecia zwykle od drugiej do szóstej dekady XX wieku, zaś dla miesięcy wiosenno-letnich w drugiej połowie wiekolecia zwykle w okresie od siódmej do dziewiątej dekady XX wieku. Największe prawdopodobieństwo wystąpienia



Rys. 5. Klimatyczny bilans wodny dla miesięcy w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej. Linia wygładzająca wg modelu regresji lokalnej LOESS niebieska; przedział ufności – szary

Fig. 5. Monthly climatic water balance in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020. Smoothing line (blue) – local regression model LOESS; the confidence interval – grey

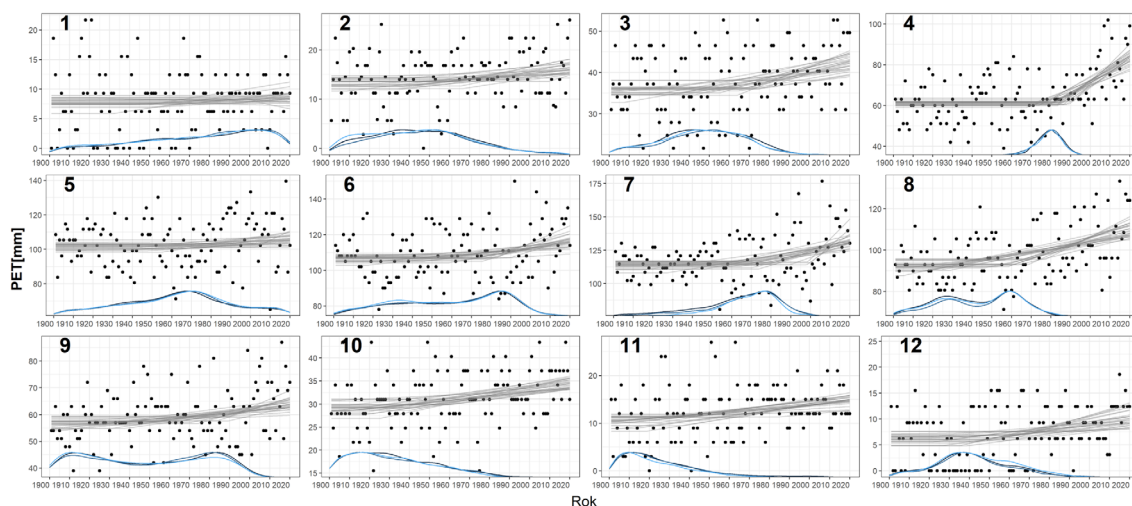


Rys. 6. Analiza punktu zmiany modelu regresji liniowej dla miesięcznych opadów w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej; rozkład punktów zmiany – niebieskie linie

Fig. 6. Change point analysis for linear regression model of monthly precipitation in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020; the posterior distribution of change points – blue lines

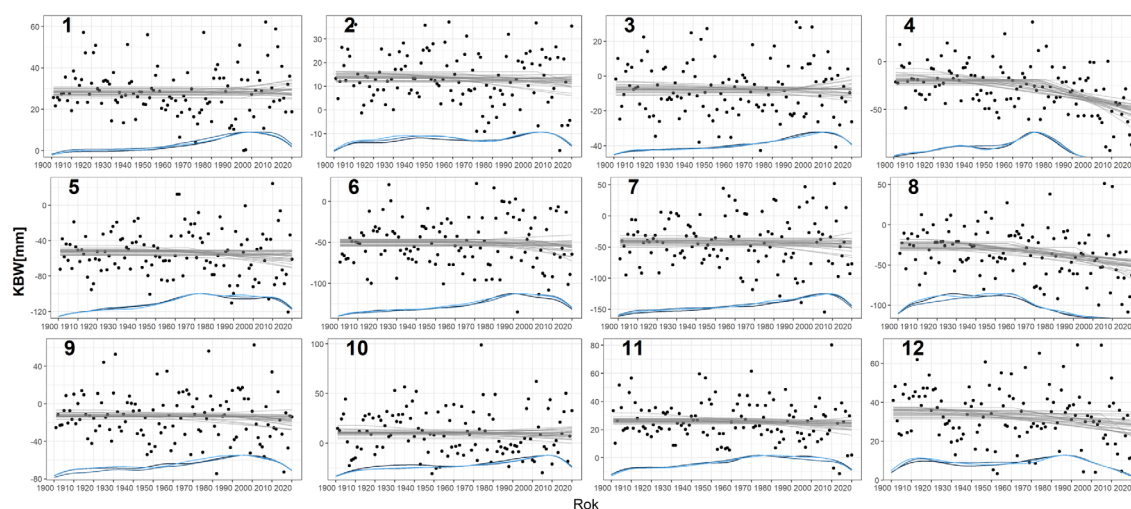
punktów zmiany w wieloleciu 1901–2020 dla kwietnia to ósma–dziewiąta dekada XX wieku, sierpnia szóstą–siódmą dekadę XX wieku oraz lipca siódmą–ósmą dekadę XX wieku. Istotnie statystycznie trendy w okresie po wystąpieniu punktu zmian wystąpiły dla

marca, kwietnia, lipca, sierpnia oraz grudnia (rys. 7). Analiza punktu zmiany modelu regresji liniowej z wymuszonym jednym punktem zmiany dla klimatycznego bilansu wodnego wykazała, że trendy negatywne wystąpiły dla kwietnia, sierpnia oraz grudnia. Trendy



Rys. 7. Analiza punktu zmiany modelu regresji liniowej miesięcznego ewapotranspiracji potencjalnej w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej; rozkład punktów zmiany – niebieskie linie

Fig. 7. Change point analysis for linear regression model of monthly potential evapotranspiration in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020; the posterior distribution of change points – blue lines



Rys. 8. Analiza punktu zmiany modelu regresji liniowej miesięcznego klimatycznego bilansu wodnego w wieloleciu 1901–2020 w Puszczy Noteckiej; rozkład punktów zmiany – niebieska linia

Fig. 8. Change point analysis for linear regression model of monthly climatic water balance in the Puszcza Notecka in the period 1901–2020; the posterior distribution of change points – blue lines

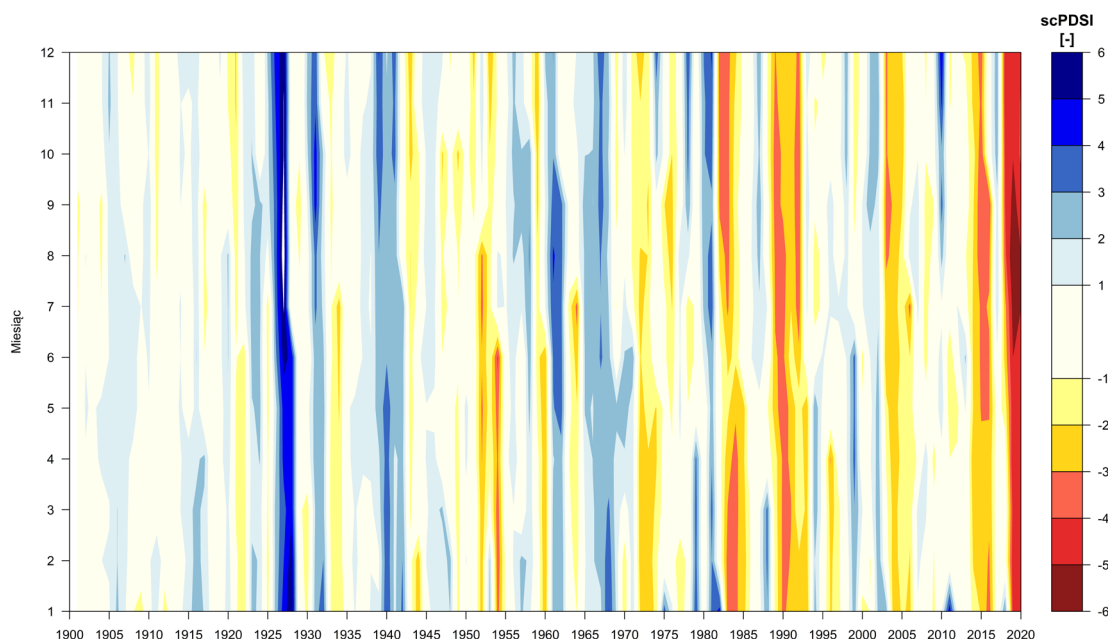
te były istotne statystycznie. Punkty zmiany były relatywnie rozproszone w wieloleciu dla tych miesięcy, przy czym największa ich koncentracja wystąpiła dla kwietnia, szczególnie w siódmej i ósmej dekadzie XX wieku, dla sierpnia od trzeciej do siódmej dekady XX wieku i dla grudnia dziewiąta–dziesiąta dekada XX wieku. W przypadku innych miesięcy roku zmiany kierunkowe były bardzo słabe lub zmienność kierunkowa nie wystąpiła (rys. 8).

Susze w Puszczy Noteckiej

Przebieg miesięcznych miar suszy scPDSI oraz SPEI wskazuje na wzrost częstości oraz natężenia susz od ósmej dekady XX wieku. Wskaźnik SPEI jest dobrą miarą ilustrującą ten wzrost w miesiącach, dla których były indykowane silne trendy klimatycznego bilansu wodnego oraz zmiana tempa trendów, tj. kwietnia i w mniejszym stopniu sierpnia, a także pojawienie się zmienności kierunkowych dla kolejnych miesięcy (lutego, marca, czerwca, lipca, sierpnia oraz września). Trendy, które wystąpiły dla kwietnia i sierpnia, przekładają się na przebieg wartości SPEI dla tych miesięcy zwłaszcza w okresie od przełomu XX i XXI wieku. Z kolei scPDSI daje dobry pogląd na zmianę częstości, a także natężenia susz wielomiesięcznych dla poszczególnych lat. Częstość ta wzrosła od początku

ósmej dekady XX wieku. Okresy suszy o dużym natężeniu, obejmujące większość miesięcy roku, wystąpiły w latach 1971–1973, 1976, 1982–1984, 1989–1992, 2003–2005, 2014–2016, 2019–2020. W okresie poprzedzającym (do siódmej dekady XX wieku włącznie) susze zwykle charakteryzowały się niższym natężeniem i wystąpiły w latach 1921, 1933, 1943, 1952–1953, 1959–1960. Susze o największym natężeniu w całym wieloleciu od 1901 do 2020 roku wystąpiły w okresach 1983–1984, 1989–1992 i 2019–2020. Wyjątkowo suche i skrajnie suche okresy wegetacyjne w wieloleciu 1901–2020 to lata: 1990, 2015, 2016, 2019 (najbardziej suchy), 2020. Z kolei wyjątkowo mokre i skrajnie mokre okresy wegetacyjne w tym wieloleciu były w latach: 1931, 1927 (najbardziej mokry), 1961, 1962, 1981 (rys. 9, 10, 11).

Podjęto również próbę znalezienia podobieństwa przebiegu miar suszy dla miesięcy roku z zastosowaniem metody grupowań. Celem tworzenia aglomeracji dla miesięcznych wartości SPEI i scPDSI była ocena ewentualnego znaczenia tych grup ze względu na kształtowanie warunków dostępności wody dla lasu. Grupy szczególnie znaczące w tym zakresie mogłyby obejmować miesiące kluczowe ze względu na zapewnienia potrzeb wodnych do wzrostu i rozwoju drzew, tj. miesiące okresu wegetacyjnego, zwłaszcza



Rys. 9. Przebieg miesięcznego wskaźnika surowości suszy Palmera (scPDSI) w wieloleciu 1901–2020 Puszczy Noteckiej

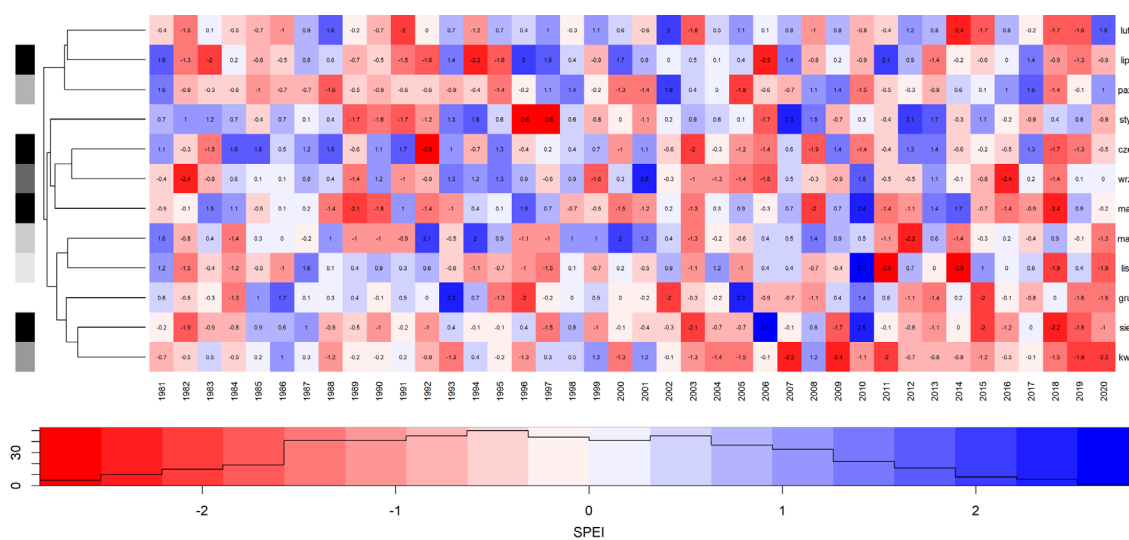
Fig. 9. Monthly Palmer Drought Severity Index (scPDSI) in the period 1901–2020 in the Puszcza Notecka

początkowej i końcowej fazy tego okresu, oraz miesiące późniejszej zimy i wczesnej wiosny istotne ze względu na budowanie stanów retencji w glebie na początku okresu wegetacyjnego. Wyniki zastosowania metody aglomeracji były również ważne w przypadku miesięcy, w których wystąpiły silne zmiany kierunkowe wskazujące na pogorszenie się warunków dostępności wody dla drzew w wieloleciu, tj. kwietnia i sierpnia. Miesiące, które w przypadku miar suszy tworzyły aglomeracje, łącznie z kwietniem i sierpniem, szczególnie w okresie po 1980 roku, powinny wykazywać dużą zgodność przebiegu miar suszy, a więc również mieć gorsze warunki pod względem zapewnienia dostępności wody dla drzew.

W przypadku wartości SPEI w wieloleciu 1981–2020, kwiecień i sierpień tworzyły jedną podgrupę, następnie z grupą tą aglomerował grudzień i kolejne dwa miesiące – marzec i listopad. Ze względu na dostępność wody dla drzew marzec, kwiecień i sierpień były miesiącami najistotniejszymi w przypadku tej zbiorczej podgrupy. Następnie z podgrupą tą aglomerowały miesiące tworzące kolejną podgrupę: wrzesień, czerwiec, następnie maj i styczeń. Podgrupa zbiorcza

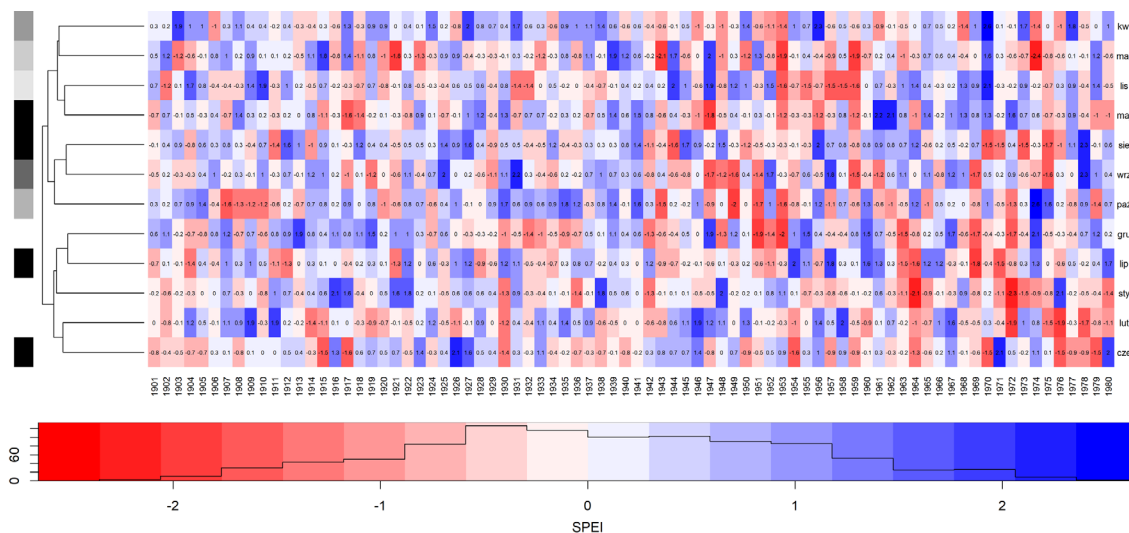
obejmująca wszystkie wymienione wyżej miesiące aglomerowała z grupą, którą tworzyły luty, lipiec i październik. Można sądzić, że podgrupa ostatnia powinna mieć najkorzystniejsze warunki pod względem dostępności wody dla drzew w okresie 1981–2020, ponieważ wykazywała najmniejsze podobieństwo do podgrupy obejmującej pozostałe miesiące roku, w tym również miesiące, w których wystąpiły niekorzystne trendy ocenianych parametrów meteorologicznych (rys. 10).

Cenne również wydaje się porównanie wyników grupowania dla dwóch okresów wieloletnich, tj. okresu 1901–1980 przed zwiększeniem się tempa zmian parametrów meteorologicznych i po 1981 roku, po zwiększeniu tego tempa. W przypadku okresu 1901–1980 kwiecień i marzec aglomerują, tworząc podgrupę, łącznie z aglomerującymi łącznie listopadem i majem. Następnie z tą podgrupą aglomeruje podgrupa, którą tworzą miesiące sierpień, wrzesień i październik, tworząc zbiorczą podgrupę. Z kolei miesiące grudzień, lipiec, styczeń, luty oraz czerwiec tworzą drugą zbiorczą podgrupę. Porównując oba wieloletnia 1901–1980 i 1981–2020 pod względem wyników metody



Rys. 10. Przebieg miesięcznego standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SEPI) z aglomeracją wartości (lewo) w wieloleciu 1981–2020 w Puszczy Noteckiej; rozkład wartości – dolna część wykresu

Fig. 10. Monthly Standardized Evapotranspiration-Precipitation Index (SPEI) coupled with the agglomeration of SPEI values (left) in the period 1981–2020 in the Puszcza Notecka; distribution of SPEI values – the lower part of the figure



Rys. 11. Przebieg miesięcznego standaryzowanego klimatycznego bilansu wodnego (SEPI) z aglomeracją wartości (lewo) w wieloleciu 1901–1981 w Puszczy Noteckiej; rozkład wartości w wieloleciu – dolna część obu wykresów

Fig. 11. Monthly Standardized Evapotranspiration-Precipitation Index (SPEI) coupled with the agglomeration of SPEI values (left) in the period 1901–1981 in the Puszcza Notecka. Distribution of SPEI values – the lower part of the figure

grupowań, a także uwzględniając miesiące, w których zmiany kierunkowe parametrów hydroklimatycznych decydujących o dostępności wody dla drzew wystąpiły i tempo tych niekorzystnych ze względu na dostępność wody zmian uległo przyspieszeniu, można zauważyć, że do zbioru miesięcy o większej podatności na suszę (w której był kwiecień i sierpień) na przełomie ósmej i dziewiątej dekady XX wieku dołączyły styczeń, czerwiec i grudzień, natomiast w grupie tej nie znalazł się październik (rys. 10, 11).

PODSUMOWANIE

Na wydłużenie okresu wegetacyjnego wpływały zmiany kierunkowe temperatur dla jesieni oraz przełomu zimy i wiosny. Proces wydłużenia trwania okresu wegetacyjnego 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 dla zapewnienia optymalnych warunków dla utrzymania aktywności drzew. Początek i koniec okresu wegetacyjnego jest o tyle istotny dla lasu, że głównie warunki hydrometeorologiczne związane z dostępnością wody w początkowych i końcowych miesiący okresu wegetacyjnego decydują o przyrastaniu drzew i drzewostanów w roku bieżącym, a także w latach kolejnych. Dla sosny zwyczajnej dominującej w Puszczy Noteckiej kluczowe są miesiące kwiecień, maj, czerwiec oraz sierpień, przy czym tworzenie się przyrostów w roku bieżącym zależy zarówno od warunków roku bieżącego, jak i lat poprzedzających (m.in. Koter, 2013; Okoński i in., 2014; Wilczyński, 2013; Zielski, 1997).

W przypadku końcowej części okresu wegetacyjnego przed wejściem w fazę spoczynku dodatkowym czynnikiem ograniczającym dostępność wody jest występowanie niskich stanów retencji glebowej i gruntowej wynikającej z normalnego przebiegu rocznego cyklu hydrologicznego. Na te niekorzystne warunki dodatkowo nałożyła się sprzyjająca powstawaniu stresu wodnego zmienność parowania terenowego (rosnąca), opadów (malejąca) i klimatycznego bilansu wodnego (malejąca) w drugiej połowie XX wieku. W końcowej fazie okresu wegetacyjnego w tym

kontekście największe znaczenie mają zmienności klimatycznego bilansu wodnego sierpnia (zwłaszcza od przełomu siódmej i ósmej dekady XX wieku) oraz ewapotranspiracji potencjalnej lipca, sierpnia, września i października.

W przypadku początkowej fazy okresu wegetacyjnego największe znaczenie mają zmienności opadów, ewapotranspiracji potencjalnej oraz klimatycznego bilansu wodnego, zwłaszcza kwietnia, gdy zmienności oddziałują łącznie od dziewiątej–dziesiątej dekady XX wieku (lata 80.–90.), silnie kształtując warunki dostępności wody w Puszczy Noteckiej. Warto zaznaczyć, że opady atmosferyczne w okresie występowania zmienności od piątej dekady XX wieku uległy redukcji o około połowę, zaś ewapotranspiracja potencjalna wzrosła o ok. 1/3. Niekorzystne oddziaływanie zmian kierunkowych dotyczących wiosny z pewnością wzmacnia ograniczenie udziału retencji śnieżnej w alimentacji wodnej ekosystemów leśnych w początkowej części okresu wegetacyjnego, na co wskazują trendy termiczne zimy (rzędna termiczna 0°C została przewyższona przez linię trendu w latach 80. XX wieku).

Warto zwrócić uwagę na zmienność ewapotranspiracji potencjalnej w miesiącach zimowych oraz miesiącach przełomu zimy i wiosny, które stanowią fazę początkową okresu wegetacyjnego, tj. grudnia, lutego i marca (7–13 mm/100 lat). Zmienność ta obejmowała znaczną część wielolecia (od lat 30. i 40. XX w.) i wskazuje na postępujące zwiększanie się rozchodowania wody w ekosystemach Puszczy Noteckiej.

Pełniejsze spojrzenie na możliwości zaspokajania potrzeb wodnych lasów Puszczy Noteckiej daje ocena ostatniej części wielolecia, tj. od przełomu XX i XXI wieku. W tym relatywnie krótkim okresie w przypadku wielu miesięcy pojawiła się po raz pierwszy lub uległa wzmocnieniu negatywna zmienność kierunkowa opadów oraz klimatycznego bilansu wodnego. Takie zmiany wystąpiły w przypadku opadów atmosferycznych w lutym, marcu, maju, sierpniu, listopadzie i grudniu oraz klimatycznego bilansu wodnego lutego, marca, czerwca, lipca, sierpnia oraz września. Ze względu na pojawienie się tego czynnika warunki dostępności wody w tym ostatnim okresie uległy pogorszeniu. Warto wspomnieć, że w okresie wcześniejszym negatywne zmiany kierunkowe opadów wystąpiły wyłącznie dla kwietnia.

W przypadku rozkładu natężenia i częstości susz w wieloleciu 1901–2020 można ogólnie wyróżnić dwa okresy, które rozgranicza siódma i ósma dekada XX wieku. W pierwszym chronologicznie okresie epizody susz były krótsze, zwykle jednoroczne, i na ogół obejmowały w poszczególnych latach jedynie część miesięcy i charakteryzowały się mniejszym natężeniem. Dominowały wówczas warunki normalne pod względem dostępności wody i relatywnie często występowały okresy wilgotne. Kolejny okres (od przełomu siódmej i ósmej dekady XX w.), cechował się zwiększeniem zarówno natężenia susz, jak i ich długotrwałości. Częstsze stały się susze wielomiesięczne i wieloletnie (2–3-letnie). Nastąpiła zmiana proporcji między udziałem warunków normalnych i mokrych oraz susz na niekorzyść tych pierwszych. W tym okresie zwiększyła się liczba miesięcy, które epizody susz obejmowały częściej. Do puli tych miesięcy, tj. marca, kwietnia, maja, sierpnia i września oraz listopada dołączyły styczeń, czerwiec oraz grudzień. Procesy zwiększenia się natężenia susz, ich częstości oraz długotrwałości, a także duży udział miesięcy okresu wegetacyjnego wskazują na proces pogarszania się warunków dostępności wody dla lasu w Puszczy Noteckiej.

WNIOSKI

Główne wnioski dotyczące uwarunkowań klimatycznych kształtujących dostępność wody dla lasu w Puszczy Noteckiej w wieloleciu 1901–2020 to:

1. Pogorszenie warunków decydujących o dostępności wody w fazie początkowej okresu wegetacyjnego. Czynnikiem sprawczym tych zmian są: wzrost temperatury, a co za tym idzie ewapotranspiracji potencjalnej zimy, zwłaszcza miesięcy końca okresu zimowego (wzrost dla grudnia, lutego i marca, obecne od przełomu trzeciej i czwartej dekady XX w.), stopniowe obniżenie udziału retencji śnieżnej w zasilaniu ekosystemów w wodę (efekt ok. ósmej dekady XX w.), a przede wszystkim silny spadek klimatycznego bilansu wodnego kwietnia ze względu na spadek opadów (ok. dziewiątej dekady XX w.) oraz wzrost ewapotranspiracji potencjalnej (przełom siódmej i ósmej dekady XX w.),
2. Pogorszenie się warunków decydujących o dostępności wody w pozostałych miesiącach okresu

wegetacyjnego w drugiej połowie XX wieku, na ogół od siódmej do ósmej dekady tego stulecia. Czynnikiem sprawczym w tym przypadku jest głównie wzrost ewapotranspiracji (szczególnie lipca, sierpnia, września), który pociąga za sobą redukcję klimatycznego bilansu wodnego (szczególnie w sierpniu).

3. Wystąpienie lub wzmocnienie istniejących negatywnych zmienności kierunkowych klimatycznego bilansu wodnego, a także opadów, które nastąpiło od przełomu XX i XXI wieku. Jest to nowy proces, a przy tym niepokojący, zwłaszcza jeśli utrzyma się w dłuższym horyzoncie czasowym. Zmienność ta dotyczy opadów atmosferycznych lutego, marca, maja, sierpnia, listopada i grudnia oraz klimatycznego bilansu wodnego lutego, marca, czerwca, lipca, sierpnia oraz września. Stąd warunki dostępności wody, ze względu na pojawienie się tej zmienności, uległy dodatkowemu pogorszeniu.
4. Czynnikiem stresu, którego oddziaływanie na las znacznie wzrosło, są susze. Wzrost natężenia, długości oraz częstości epizodów susz, zmniejszenie udziału okresów normalnych i wilgotnych, które przestały przeważać od przełomu siódmej i ósmej dekady XX wieku, mają istotne znaczenie dla lasu. Niekorzystne dla lasu jest zwiększenie w epizodach silnych susz częstości udziału kolejnych miesięcy okresu wegetacyjnego oraz miesięcy zimowych, w których odbudowywane są stany retencji glebowej, tj. do marca, kwietnia, maja, sierpnia i września oraz listopada dołączyły styczeń, czerwiec oraz grudzień.

PIŚMIENNICTWO

- Allen, C. D., Macalady, A. K., Chenchouni, H., Bachelet, D., McDowell, N., ..., Cobb, N. (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *For. Ecol. Manag.*, 259, 660–684.
- Bank Danych o Lasach (b.d.). Pobrane 15 maja 2022 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 (red.), *State of the Climate in 2020* (s. 68–70).

- Bull. Am. Meteorol. Soci., 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.
- Czarnowski, M. S. (1989). *Zarys ekologii roślin lądowych*. Warszawa: PWN.
- 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>
- Degirmendźić, J., Kożuchowski, K. (2016). *Niże śródziemnomorskie jako czynnik klimatu Polski*. Łódź: Wyd. UŁ.
- Degirmendźić, J., Kożuchowski, K., Żmudzka, E. (2004). Changes of air temperature and precipitation in Poland in the period 1951–2000 and their relationship to atmospheric circulation. *Int. J. Climatol.*, 24, 291–310.
- Drought indices (b.d.). Pobrane 10 kwietnia 2022 z: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/drought/#global>
- Everitt, B. S., Landau, S., Leese, M., Stahl, D. (2011). *Cluster Analysis*. Chichester, UK: Wiley.
- 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. DOI:10.1029/2012RG000389.
- Global SPEI database (b.d.). 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. Clim.*, 34, 623–642. <https://rmets.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/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>
- Hartigan, J. A. (1975). *Clustering algorithms*. New York, London, Sydney, Toronto: Wiley.
- High-resolution gridded datasets (and derived products). (b.d). Pobrane 10 kwietnia 2022 z: <https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/>
- James, D., Hornik, K. (2020). *chron: Chronological Objects which Can Handle Dates and Times*. R package version 2.3-56. S original by David James, R port by Kurt Hornik. <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.
- Koter, A. (2013). *Lata wskaźnikowe przyrostów promieniowych sosny w świetle warunków klimatycznych określone dla leśnictwa Zawarcie oraz próba ustalenia biotycznych i abiotycznych przyczyn wystąpienia*. Niepublikowany maszynopis. Poznań: Kat. Inż. Leśnej, UP.
- 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
- Kożuchowski, K. (2011). *Klimat Polski. Nowe spojrzenie*. Warszawa: PWN.
- Kubala, P., Chudzicki, M., Ostrowska-Gruszewska, K., Majewski, M., Kusiak, W. (2021): *Jednolity Program Gospodarczo-Ochronny dla Leśnego Kompleksu Promocyjnego „Puszcza Notecka”*. Niepublikowany maszynopis. Poznań: BULiGL.
- Kusiak, W. (2007). *Program Gospodarczo-Ochronny dla Leśnego Kompleksu Promocyjnego Puszcza Notecka*. Niepublikowany maszynopis. Międzychód: CILP.
- Lindeløv, J (2020). *mcp: An R Package for Regression With Multiple Change Points*. OSF Preprints DOI: 10.31219/osf.io/fzqxv.
- Lindner, M., Maroschek, M., Netherer, S., Kremer, A., Barbati, A., ..., Marchetti, M. (2010). Climate change impacts, adaptive capacity, and vulnerability of European forest ecosystems. *For. Ecol. Manag.*, 259, 698–709.

- Luterbacher, J., Xoplaki, E., Küttel, M., Zorita, E., González-Rouco, J. F., ..., 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.
- 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 2005–2018. Warszawa: PIG-PIB.
- Maslin, M. (2018). *Zmiany klimatu. Krótkie wprowadzenie*. Łódź: Wyd. Uniw. Łódzki.
- 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. Clim.*, 25, 693–712.
- Muñoz-Sabater, J. i in. (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. *Agric. Water Manag.*, 160, 106–117. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.06.029>
- Objaśnienia do mapy hydrogeologicznej Polski 2005–2018. Warszawa: PIG-PIB.
- Objaśnienia do szczegółowej mapy geologicznej Polski 1997–2003. Warszawa: PIG-PIB.
- Okoński, B., Miler, A. T., Czarniak, A., Grajewski, S., Duszyński, P. (2014). Oddziaływanie gradacji brudnicy mniszki (*Lymantria monacha* L.) na przyrosty promieniowe sosny zwyczajnej (*Pinus sylvestris* L.) w Puszczy Noteckiej. *Stud. Mater. Cent. Eduk. Przyr.-Leś.*, 16, (39/2B), 103–109.
- Palmer, W. C. (1965). Meteorological drought. Weather Bureau Paper 45, US Dept. of Commerce, Washington D.C.
- Przybyła, C., Sojka, M., Wróżyński, R., Pyszny, K. (2017). Planowanie małej retencji w lasach na przykładzie Puszczy Noteckiej. Poznań: Bogucki Wyd. Naukowe.
- R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing. <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
- 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: IGiG UP.
- 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.
- 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. (2021). tseries: Time Series Analysis and Computational Finance. R package version 0.10-49. <https://CRAN.R-project.org/package=tseries>
- 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. DOI: 10.1002/jgrd.50355
- 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. Clim.*, 36, 2120–2213.
- 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. Hydro-met.*, 11, 1033–1043.
- Warnes G., Bolker, B., Bonebakker, L., Gentleman, R., Huber, W., ..., Venables, B. (2022). gplots: Various R Programming Tools for Plotting Data. <https://cran.r-project.org/web/packages/gplots/index.html>
- 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<2335:ASPDSE>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2004)017<2335:ASPDSE>2.0.CO;2)
- Wickham, H., Averick, M., Bryan, J., Chang, W., McGowan, L., ..., Yutani, H. (2019). Welcome to the tidyverse. *J. Open Source Software*, 4(43), 1686, <https://doi.org/10.21105/joss.01686>

- Wilczyński, S. (2013). Przyczyny krótkookresowych reakcji przyrostowych sosen z różnych siedlisk. *Sylvan*, 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. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0870.2007.00283.x>

WATER AVAILABILITY AND THE DROUGHTS IN THE PUSZCZA NOTECKA FOREST SINCE THE BEGINNING OF 20TH CENTURY

ABSTRACT

The Puszcza Notecka Forest is predisposed to drought due to the deep sand layers, low water storage capabilities of the soil aeration zone and a high groundwater table below the ground level, usually below the range of active tree roots. Therefore, water availability to the forest in the Puszcza Notecka depends significantly on the dynamics of weather conditions, both precipitation (input) and evapotranspiration (output). These conditions have grave ecosystem implications and are essential determinants shaping the frames of forest management practices, particularly regarding climate change and instability. We have tried to assess the dynamics of meteorological elements and drought indices during the period of 1901-2020 for the annual, monthly, seasonal, and vegetation periods. We have assessed the dynamics of air temperature, precipitation, potential evapotranspiration, climatic water balance, and drought measures: the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index and the Palmer Drought Severity Index. The main changes in climate parameters, including the periods of significant changes of the rate (change-points), were investigated.

Keywords: Puszcza Notecka Forest, water availability, droughts, climate dynamics