

## Zmienność higroklimatycznych warunków wegetacji roślinności leśnej w Polsce w latach 1951–2015

Variability of hydroclimatic conditions of forest vegetation in Poland during the period 1951–2015

Mariusz Siedlecki 

Uniwersytet Łódzki, Wydział Nauk Geograficznych, Katedra Meteorologii i Klimatologii, ul. Narutowicza 88, 90-139 Łódź

Tel. + 48 42 6655953, email: mariusz.siedlecki@geo.uni.lodz.pl

**Abstract.** This work presents assessment of changes in hydroclimatic conditions determining the vegetation and productivity of forest area. Selected indices such as radiant index of climate aridity – RIA, optimal precipitation –  $P_{opt}$ , critical value of precipitation –  $P_{krt}$  and CVP index (Climate, Vegetation, Productivity), which described annual biomass and wood matter production under climatic conditions, were used. The analysis is based on standard meteorological measurements taken from 21 stations from the period 1951–2015. The daily data were employed to calculate mentioned earlier indices, next linear trend coefficient were used as an assessment of hydroclimatic conditions changes.

The results show an increasing tendency in dry climate conditions (positive values of RIA linear trend coefficient) in the large part area contain: Wielkopolska and Silesian lowlands, and southern Poland. These areas are also characterized by the fastest increase in the most favourable sum of precipitation  $P_{opt}$  and critical precipitation  $P_{krt}$  for forest vegetation. This means deterioration of water resources in the environment and hydroclimatic conditions important for vegetation and productivity of forest vegetation. On the other hand, the results of CVP change assessment show the improvement of climatic conditions influencing vegetation and forest productivity. The greatest positive changes of CVP index are in the areas of south-eastern Poland.

**Keywords:** climate change, radiant index of climate aridity – RIA, optimal values of precipitation, critical values of precipitation, productivity of forest

\*Tezy zawarte w niniejszym artykule zostały zaprezentowane na III Ogólnopolskiej Konferencji pt: "Klimatyczne uwarunkowania życia lasu", zorganizowanej przez SGGW, Wydział Leśny, w CEPL w Rogowie w dniach 1–3 czerwca 2017.

### 1. Wstęp

Wegetacja roślinności leśnej w Polsce w dużej mierze uzależniona jest od zasobów wody w środowisku kształtowanych przez opady atmosferyczne oraz ewapotranspirację. Cechą charakterystyczną klimatu Polski jest przewaga parowania terenowego nad opadami, co prowadzi do wystąpienia ujemnego bilansu wodnego na znacznych obszarach naszego kraju (np. Danielak, Lenart 1989; Łabędzki et al. 2011). Na kształtowanie się zasobów wodnych istotny wpływ ma saldo promieniowania decydujące o ilości dostępnej energii wykorzystywanej w procesie ewapotranspiracji oraz produkcji pierwotnej roślinności. Badania w różnych typach środowisk wskazują, że w warunkach ograniczonych zasobów energii większość dostępnej energii wykorzystywana jest w procesie parowania terenowego (zasada priorytetu parowania – Paszyński et al. 1995), limitowanej przez zasoby

by wody (Kędziora 1999; Launiainen et al. 2005; Siedlecki et al. 2016).

W charakterystyce warunków higroklimatycznych określonego obszaru (z uwzględnieniem warunków radiacyjnych) znajduje zastosowanie tzw. radiacyjny wskaźnik suchości klimatu (Radiant Index of Climate Aridity – RIA), definiowany jako iloraz rocznego salda promieniowania  $R_n$  oraz energii potrzebnej do wyparowania sumy rocznej opadów  $LP_a$  ( $L$  – ciepło parowania,  $P_a$  – roczne opady atmosferyczne) (Budyko 1975). Wartości  $RIA > 1$  odpowiadają warunkom klimatu suchego, gdzie zasoby energii słonecznej wystarczają do wyparowania występujących opadów atmosferycznych. Natomiast wartości  $RIA < 1$  oznaczają warunki klimatu wilgotnego. W takim przypadku zasoby energii potrzebnej w procesie wyparowania wody opadowej nie zostają pokryte, a zatem pewna jej ilość pozostaje w stanie ciekłym (dostępnym dla roślinności). Badania wykazały, że przy określonej relacji salda promienio-

Wpłynęło: 17.11.2017 r., recenzowano: 14.03.2018 r., zaakceptowano: 03.04.2018 r.

wania i opadów atmosferycznych rozwój roślinności, a także produkcja pierwotna, są największe. Najdogodniejszymi warunkami dla rozwoju formacji leśnych cechują się te obszary, dla których wartość RIA wynosi 0,8 (Budyko 1975). Oznacza to, że przy określonej wartości bilansu radiacyjnego występuje pewna wartość opadów, która określana jest jako opad optymalny  $P_{opt}$ . Można również wyznaczyć wartość opadów, która spełnia warunek  $RIA=1$ , określaną pojęciem opadów krytycznych  $P_{krt}$ , stanowiących niezbędne minimum dla funkcjonowania formacji leśnych w danym regionie.

Obserwowane w drugiej połowie XX i na początku XXI wieku zmiany klimatu mają istotny wpływ zarówno na środowisko naturalne, jak i na wiele aspektów działalności człowieka. Oprócz szeroko opisywanego wzrostu globalnej temperatury powietrza (IPCC 2007), zwraca się uwagę również na zmiany opadów atmosferycznych, promieniowania słonecznego, jak i ewapotranspiracji. Zjawiska te mają bezpośredni wpływ na kształtowanie się warunków wilgotnościowych istotnych dla rozwoju roślinności leśnej. Na przykład, na podstawie pomiarów w drugiej połowie XX wieku stwierdza się wzrost wartości bilansu radiacyjnego (Abakumova et al. 1996), a także wartości promieniowania słonecznego na obszarze Polski (Uscka-Kowalkowska et al. 2007). W pracach poświęconych zmienności opadów atmosferycznych w Polsce wskazywany jest ich wzrost w sezonie wiosennym i jesiennym, przy jednoczesnym zmniejszeniu się opadów letnich (Żmudzka 2002; Czarnańska i Nidzgorzka-Lencewicz 2012). Zawora i Ziernicka (2003), na podstawie pomiarów z lat 1891–2000, wskazują wzrost rocznych opadów w Polsce północnej, natomiast opady w Polsce środkowej wykazują tendencję ujemną. Zmiany bilansu radiacyjnego oraz wzrost temperatury powietrza prowadzą do intensyfikacji procesów hydrologicznych, których jednym z najważniejszych elementów jest ewapotranspiracja. Zarówno pomiary, jak i badania nad zmianami procesu ewapotranspiracji z uwzględnieniem modeli klimatu, wskazują na wzrost globalnej ewapotranspiracji w okresie 1982–2008 (Jung et al. 2010). Co więcej, podobna tendencja charakterystyczna jest dla symulacji klimatycznych w XXI wieku w różnych rejonach świata (Abteu, Melesse 2013). Również dla obszaru Polski Łabędzki i in. (2012) stwierdzają wzrost ewapotranspiracji wskaźnikowej na podstawie obserwacji prowadzonych w latach 1970–2004 w wybranych stacjach Polski. Na podobną tendencję już wcześniej zwrócił uwagę Jokieli (2007), który analizował zmienności ewapotranspiracji potencjalnej w wieloletnim okresie 1950–1990.

Wspomniane wyżej tendencje zmian mają istotne znaczenie dla kształtowania się zasobów wodnych w warunkach zmian klimatu, tym bardziej istotne, że na znacznych obszarach Polski stwierdza się ujemny klimatyczny bilans wodny (np. Rojek 2001; Bac, Rojek 2012), a obserwowane opady atmosferyczne są niższe od wartości opadów optymalnych (Kozuchowski 2013a, b).

Podstawowym celem badawczym opracowania jest ocena zmian warunków higroklimatycznych na terenie Polski w drugiej połowie XX i na początku XXI wieku. Dla jego osiągnięcia posłużono się wskaźnikiem RIA, dokonano również oceny zmienności wartości opadów optymalnych i krytycznych oraz

deficytu opadów dla roślinności leśnej w analizowanym okresie. Ponadto podano analizie zmiany produktywności roślinności leśnej na podstawie wskaźnika CVP (*Climate, Vegetation, Productivity*). Praca może ponadto stanowić próbę uzupełnienia dotychczasowych opracowań na temat zróżnicowania przestrzennego wskaźnika RIA, opadów optymalnych i deficytu opadów w Polsce (Kozuchowski 2013a, b). Wyniki pracy mogą też poszerzać dyskusję nad zmianami warunków higroklimatycznych w Polsce, bazujących na ocenie bilansu wodnego (Rojek, Wiercioch 1995; Rojek 2001).

## 2. Materiały i metody badawcze

Praca powstała w oparciu o standardowe pomiary meteorologiczne wykonane na 21 stacjach meteorologicznych (ryc. 1) w Polsce w latach 1951–2015, uzyskane bezpośrednio z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej – PIB. Do realizacji celów pracy wykorzystano średnią dobową wartość temperatury powietrza, dobową temperaturę minimalną i maksymalną oraz dobowe sumy opadów atmosferycznych. Zebrane dane posłużyły do wyznaczenia wartości średnich miesięcznych i rocznych, umożliwiających określenie wybranych wskaźników charakteryzujących warunki decydujące o wegetacji i produktywności roślinności leśnej.

Na podstawie zebranych danych meteorologicznych wyznaczono wartości radiacyjnego wskaźnika suchości klimatu, który uwzględnia zarówno zmiany salda promieniowania, jak i zmiany rocznych opadów atmosferycznych.

Jest on zdefiniowany jako:

$$RIA = \frac{R_n}{LP_a}$$

gdzie:

$R_n$  – bilans radiacyjny,

$P_a$  – suma roczna opadów atmosferycznych,

$L$  – ciepło parowania.



Rycina 1. Stacje meteorologiczne wykorzystane w pracy  
Figure 1. Meteorological stations used in this work

Bilans radiacyjny  $R_n$  określany jest jako różnica pomiędzy promieniowaniem krótkofalowym netto  $R_{ns}$  i długofalowym promieniowaniem netto  $R_{nl}$ . Pomiarów wszystkich składników bilansu radiacyjnego nie są wykonywane na każdej stacji meteorologicznej, są to zwykle kilkuletnie serie pomiarowe (Kozuchowski 2013b), dlatego w wielu opracowaniach (np. Miara et al. 1987; Paszyński et al. 1995) do wyznaczenia salda promieniowania powszechnie stosuje się szereg równań empirycznych, których parametrami są temperatura powietrza, stopień zachmurzenia, czy też ciśnienie pary wodnej (Kędziora 1999). W niniejszym opracowaniu zastosowano taką samą procedurę i wartości bilansu radiacyjnego wyznaczono na podstawie standardowych pomiarów meteorologicznych.

W pierwszej kolejności wyznaczono promieniowanie słoneczne na górnej granicy atmosfery  $R_a$  wg wzoru:

$$R_a = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta)] + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s),$$

gdzie:

$G_{sc}$  – stała słoneczna,

$d_r$  – odległość Ziemia-Słońce dla kolejnych dni w roku,

$\omega_s$  – kąt godzinny Słońca,

$\varphi$  – szerokość geograficzna,

$\delta$  – deklinacja Słońca

Poszczególne składniki równania wyznaczono wg określonych formuł szczegółowo opisanych w pracy Allena i in. (1998).

Wyznaczone wartości  $R_a$  oraz pomierzone dobowe wartości temperatury maksymalnej i minimalnej pozwoliły (na podstawie formuły Hargreaves'a) na wyznaczenie natężenia promieniowania słonecznego  $R_s$  na powierzchni Ziemi (Allen et al. 1998):

$$R_s = k_{Rs} \sqrt{(T_{max} - T_{min})} R_a,$$

gdzie:

$T_{max}$  – dobowa temperatura maksymalna,

$T_{min}$  – dobowa temperatura minimalna,

$k_{Rs}$  – współczynnik uwzględniający odległość stacji od morza.

Promieniowanie krótkofalowe netto  $R_{ns}$  wyznaczono wg wzoru:

$$R_{ns} = (1 - \alpha) R_s,$$

gdzie:

$\alpha$  – albedo (w opracowaniu przyjęto średnią wartość 0,23)

Ostatnim elementem bilansu radiacyjnego jest promieniowanie długofalowe netto, które obliczono za pomocą formuły (Allen et al. 1998):

$$R_{nl} = \sigma \left[ \frac{(T_{max})^4 + (T_{min})^4}{2} \right] (0,34 - 0,14 \sqrt{e_a}) \left\{ 1,35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0,35 \right\},$$

gdzie:

$\sigma$  – stała Stefana-Boltzmana,

$e_a$  – aktualne ciśnienie pary wodnej,

$R_{so}$  – promieniowanie w warunkach bezchmurnego nieba, obliczone jako:

$$R_{so} = (0,75 + 2 \cdot 10^{-5} z) R_a,$$

gdzie:

$z$  – wysokość stacji nad poziomem morza.

Wartość ciśnienia pary wodnej obliczono na podstawie równania:

$$e_a = 0,611 \exp \left[ \frac{17,27 T_{min}}{T_{min} + 237,3} \right]$$

Oprócz radiacyjnego wskaźnika suchości klimatu wartości  $R_n$  pozwoliły również na wyznaczenie kolejnych wskaźników tj.  $P_{opt}$  i  $P_{krt}$ .

Opad optymalny  $P_{opt}$  odpowiada wartości wskaźnika RIA=0,8, tzn. stanowi wysokość opadów, przy której notowane są największe przyrosty biomasy roślin zielonych:

$$P_{opt} = \frac{R_n}{0,8L}.$$

Natomiast wartość opadów krytycznych  $P_{krt}$  odpowiada wartości wskaźnika RIA=1, czyli określa niezbędne minimum wilgotności klimatu dla wegetacji roślinności leśnej:

$$P_{krt} = \frac{R_n}{L}.$$

Deficyt opadów  $D$  definiowany jest jako:

$$D = P_a - P_{krt}.$$

Zebrane dane pomiarowe oraz wyznaczone wskaźniki warunków higroklimatycznych umożliwiają dokonanie oceny zmian potencjalnej, klimatycznie uwarunkowanej produktywności lasów. W tym celu zastosowano wskaźnik *CVP* (*Climate, Vegetation, Productivity*) autorstwa Patersona (1956) (za Kozuchowskim 2014):

$$CVP = 0,01 (TP_a GE) / 12A,$$

gdzie:

$T$  – średnia miesięczna temperatura najcieplejszego miesiąca,

$P_a$  – suma roczna opadów,

$G$  – liczba miesięcy, w których średnia temperatura miesięczna przekracza 3°C,

$E$  – funkcja szerokości geograficznej określająca wpływ warunków długości dnia na wegetację roślinności,

$A$  – amplituda roczna temperatury powietrza.

Uzyskane serie wybranych wskaźników higroklimatycznych posłużyły następnie do wyznaczenia współczynnika trendu liniowego w analizowanym okresie. Do badania istotności trendu zastosowano test Manna-Kendalla (dla poziomu istotności 0,05), a także analizę wartości współczynnika determinacji.

W celu lepszego zróżnicowania przestrzennego na obszarze Polski wykorzystano geostatystyczną interpolację – kriging zwyczajny, która pozwala na przybliżoną prezentację wyników oceny zmienności wybranych wskaźników hydroklimatycznych.

### 3. Wyniki

W pierwszym etapie charakterystyki zmienności warunków higroklimatycznych w Polsce w latach 1951–2015 po-



równano przebiegi analizowanych zmiennych jako anomalie roczne wartości średnich w badanym wieloleciu. Takie ujęcie problemu pozwala na ukazanie nie tylko tendencji wzrostu / spadku badanych zmiennych, ale również wskazanie lat, pentad czy dekad, cechujących się wyraźnie wyższymi lub niższymi wartościami w analizowanym okresie. Z uwagi na ograniczenia rozmiaru artykułu prezentowane zagadnienia postanowiono omówić na przykładzie stacji meteorologicznej zlokalizowanej w południowo-zachodniej części Łodzi na terenie lotniska Łódź Lublinek (ryc. 2).

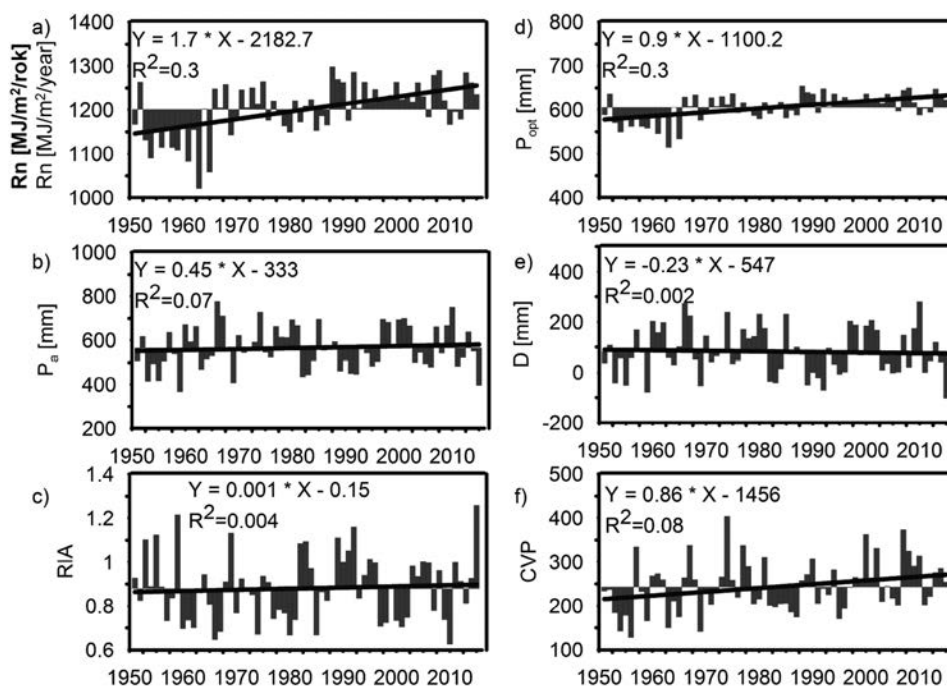
Uzyskane wyniki wskazują wzrost wartości bilansu radiacyjnego w analizowanym okresie, a ostatnie dwie dekady XX wieku i początek XXI wieku to lata o stosunkowo wysokich, dodatnich anomaliach wartości  $R_n$  (ryc. 2a). Porównanie przebiegu anomalii opadów rocznych  $P_a$  (ryc. 2b) i wskaźnika RIA (ryc. 2c) wyraźnie wskazuje, że opady atmosferyczne są czynnikiem determinującym przebieg wartości RIA. Okresy suche, na przykład lata 1985–1993, kiedy to wskaźnik RIA osiągał wartość wyższą od 1, pokrywają się z latami o ujemnych anomaliach opadów rocznych. Kolejna pentada (1995–2000) nacechowana jest stosunkowo wysokimi opadami atmosferycznymi, co pociąga za sobą obniżenie wartości wskaźnika RIA. Przebieg anomalii rocznych  $P_{opt}$  (ryc. 2d) zgodnie z definicją wyznaczenia tego parametru wykazuje wyraźną współzależność z przebiegiem anomalii bilansu radiacyjnego. Oznacza to pogorszenie się zasobów wodnych, a tym samym trudniejsze warunki dla wegetacji roślinności leśnej, przy czym lata z wysokimi wartościami rocznego salda promieniowania wyróżniają się również wysokimi wartościami opadu optymalnego.

Potwierdza to również tendencja deficytu opadów atmosferycznych  $D$ . Wzrastająca wartość opadów optymalnych, przy niezmiennych sumach rocznych opadów atmosferycznych,

prowadzi do warunków w coraz mniejszym stopniu zapewniających niezbędne minimum wilgotności klimatu, potrzebne do jak najlepszego rozwoju roślinności leśnej. Przebieg anomalii rocznych deficytu opadów (ryc. 2e) na tle pozostałych analizowanych wartości pokazuje, że to właśnie opady atmosferyczne są decydującym elementem w charakterystyce zmian warunków higroklimatycznych. To właśnie w latach o stosunkowo małych rocznych opadach atmosferycznych występują małe wartości deficytu opadów. Również w przebiegu anomalii wskaźnika  $CVP$  mimo, że uwzględnia on zarówno zmiany opadów atmosferycznych jak i warunków termicznych, stosunkowo wysokie wartości występują w latach o dużych rocznych sumach opadów atmosferycznych (ryc. 2f).

Kierunki zmian wybranych warunków higroklimatycznych, wskazanych na przykładzie jednej stacji meteorologicznej zlokalizowanej w Łodzi, a mających bezpośredni wpływ na wegetację roślinności leśnej, obserwuje się na większości analizowanych stacji. Zróżnicowanie przestrzenne tych zmian zaprezentowano za pomocą map rozkładu współczynnika trendu liniowego wybranych wskaźników. Uzyskane wartości trendu liniowego w większości przypadków są bardzo niskie, nieistotne statystycznie. Zastosowane podejście pozwala jednak na odpowiedź na pytanie o kierunek zmian analizowanych warunków na tle zachodzących zmian klimatycznych.

Większość obszaru Polski (poza Wielkopolską, Niziną Mazowiecką i Wyżyną Lubelską) charakteryzuje się średnią wartością  $RIA < 1$ . Przeprowadzone badania zmian tego wskaźnika pozwalają wyróżnić na obszarze Polski dwie strefy. W rozkładzie przestrzennym na stacjach północno-wschodniej Polski zaznacza się poprawa warunków higroklimatycznych (ujemny trend współczynnika RIA), natomiast na znacznych obszarach Polski nizinnej i na Wyżynie Lubel-

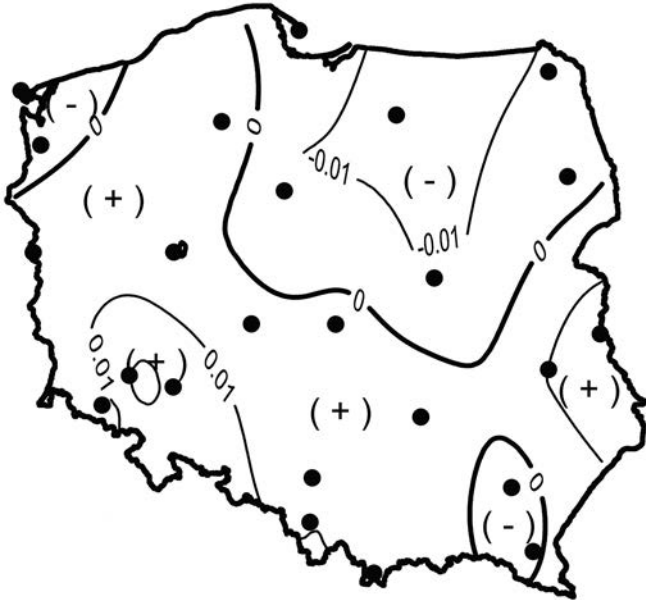


Rycina 2. Przebieg wybranych parametrów meteorologicznych na stacji Łódź w latach 1951–2015 jako anomalie roczne. ( $R_n$  – saldo bilansu radiacyjnego,  $P_a$  – suma roczna opadów atmosferycznych, RIA – radiacyjny wskaźnik suchości klimatu,  $P_{opt}$  – opad optymalny,  $D$  – deficyt opadów, CVP – wskaźnik Climate, Vegetation Productivity)

Figure 2. The course of annual anomalies of selected meteorological parameter in Łódź during the period 1951–2015. ( $R_n$  – radiation balance,  $P_a$  – annual precipitation, RIA - index of climate aridity,  $P_{opt}$  - optimal precipitation,  $D$  – precipitation deficit, CVP – index Climate, Vegetation, Productivity)

skiej dodatnie wartości trendu RIA ukazują wzrost suchości klimatu (ryc. 3), przy czym wartości trendu są bardzo niskie.

Tendencje zmian opadów optymalnych, jak i krytycznych, w głównej mierze uzależnione są od zmian salda promieniowania. Najwyższymi wartościami trendu cechują się obszary



Rycina 3. Rozkład przestrzenny współczynnika trendu radiacyjnego wskaźnika suchości klimatu RIA (na dekadę) w okresie 1951–2015

Figure 3. The spatial distribution of trend coefficient of the radiant index of aridity RIA (per decade) during the years 1951–2015

południowo-wschodniej Polski. Na stacjach Lublin, Rzeszów i Włodawa, wartości trendu wskazują średni wzrost o ponad 12 i 10 mm/dekadę odpowiednio opadów optymalnych i opadów krytycznych (ryc. 4 i 5).

W Polsce południowej i południowo-wschodniej odnotowano tendencję do wzrostu suchości klimatu, a zmiany w opadach krytycznych mają istotne znaczenie w kształtowaniu zasobów wodnych. Na przykład najwyższy wzrost opadów krytycznych na Wyżynie Lubelskiej prowadzi do coraz mniejszej różnicy pomiędzy  $P_a$  i  $P_{krt}$  tj. wartości deficytu opadów atmosferycznych (ryc. 6). Zatem zachodzące pod wpływem wzrostu salda promieniowania zmiany w warunkach higroklimatycznych oznaczają, że obserwowany trend w opadach atmosferycznych zbliża się do granicy wyznaczającej strefę klimatu suchego ( $RIA > 1$ ), utrudniającej wegetację roślinności leśnej. Ujemna tendencja w różnicy pomiędzy opadami atmosferycznymi a opadami krytycznymi odnotowana została na wielu stacjach meteorologicznych centralnej Polski oraz Górnego i Dolnego Śląska. Wyniki potwierdzają pogorszenie się warunków higrycznych w rejonie, który w świetle wielu opracowań wyróżnia się ujemnym bilansem wodnym (Rojek, Wiercioch 1995; Rojek 2001; Łabędzki et al. 2012) oraz ujemną tendencją opadów rocznych (Zawora, Ziernicka 2003). Natomiast na obszarze północno-wschodniej Polski, gdzie wyniki badań wskazały zmniejszenie się wskaźnika suchości klimatu, mamy także do czynienia z dodatnim trendem deficytu opadów atmosferycznych. Wzrost różnic  $P_a - P_{krt}$  oznacza warunki, w których występujący opad pokrywa zapotrzebowanie na ewapotranspirację potencjalną oraz stanowi również zasób dla wegetacji roślinności.



Rycina 4. Rozkład przestrzenny współczynnika trendu liniowego opadów optymalnych  $P_{opt}$  (mm/dekadę) w okresie 1951–2015  
Figure 4. The spatial distribution of trend coefficient of the optimum values of annual precipitation  $P_{opt}$  (mm/decade) during the years 1951–2015



Rycina 5. Rozkład przestrzenny współczynnika trendu liniowego opadów krytycznych  $P_{krt}$  (mm/dekadę) w okresie 1951–2015  
Figure 5. The spatial distribution of trend coefficient of the critical values of annual precipitation totals  $P_{krt}$  (mm/decade) during the years 1951–2015

Warunki wegetacji roślinności leśnej, a tym samym warunki przyrostu masy drzew kształtowane są, oprócz opadów i bilansu radiacyjnego, również przez warunki termiczne. Czynniki te uwzględnia zastosowany w opracowaniu wskaźnik CVP. Im wyższe wartości tego indeksu tym lepsze warunki dla produktywności lasów. Wyniki oceny

tendencji zmian tego parametru wskazują na wszystkich analizowanych stacjach wzrost warunków produktywności lasów w warunkach zachodzących zmian klimatu. Najwyższymi dodatkowymi zmianami wskaźnika CVP charakteryzują się obszary Podkarpacia i północno-zachodniej Polski, cechujące się jednymi z lepszych warunków dla rozwoju roślinności leśnej (ryc. 7).

#### 4. Podsumowanie i dyskusja

Przeprowadzona ocena zmian warunków higroklimatycznych (w okresie 1951–2015), mających wpływ na wegetację i produktywność roślinności leśnej, pokazuje:

- wzrost suchości klimatu (wzrost wartości wskaźnika RIA) na obszarze obejmującym Wielkopolskę, Dolny Śląsk oraz pas wyżyn,
- spadek wartości wskaźnika RIA w przypadku stacji położonych w rejonie Polski północno-wschodniej i częściowo na Mazowszu,
- wzrost wartości opadów optymalnych i krytycznych dla wegetacji roślinności leśnej – najwyższy w Polsce południowo-wschodniej,
- wzrost wartości wskaźnika CVP, oznaczających poprawę warunków wegetacji i produktywności roślinności leśnej.

Należy podkreślić jednocześnie, że na większości stacji wymienione wyżej wartości trendów analizowanych zmiennych przyjmują bardzo małe wartości nieistotne statystycznie.

Otrzymane wyniki ukazują pogorszenie się wskaźników higroklimatycznych, a tym samym – warunków dla rozwoju roślinności leśnej. To właśnie czynnik ograniczonych zasobów wodnych wskazywany jest najczęściej jako przyczyna ograniczenia wegetacji roślinności leśnej w różnych rejonach świata (Allen et al. 2010; Milad et al. 2011), a także w Polsce (np. Wawrzoniak et al. 2017). Zmiany klimatu, przejawiające się wzrostem częstości fal upałów i okresów suszy, wskazywane są jako przyczyna mniejszych przyrostów rocznych w lasach północno-wschodniej Francji (Charru et al. 2010) czy też obumierania dębu szypułkowego (Siwecki, Ufnalski 1998) w Polsce lub świerka pospolitego w południowej Norwegii (Solberg 2004) i Polsce (np. Jaworski, Pach 2013; Paluch 2015). Konsekwencją pogarszającego się stanu zdrowotnego drzew w wyniku suszy jest również wzrost liczby pożarów lasów oraz rozwój szkodników (Szczygieł et al. 2008, 2009).

Natomiast uwzględnienie dodatkowych czynników meteorologicznych decydujących o wegetacji roślinności leśnej, które uwzględnia zastosowany wskaźnik CVP pokazują wzrost warunków produktywności lasów w analizowanym okresie. Warto podkreślić, że wskazana tendencja jest najsilniejsza w obszarze pasa pojezierzy, Niziny Śląskiej i pasa wyżyn tam gdzie średnie wartości indeksu CVP są najwyższe (Kozuchowski 2014).

Zmiany klimatu, poza zmianą temperatury i opadów atmosferycznych, to również wzrost koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze. Prowadzi to do wzrostu intensywności



Rycina 6. Rozkład przestrzenny współczynnika trendu liniowego deficytu opadów D (mm/dekadę) w okresie 1951–2015

Figure 6. The spatial distribution of trend coefficient of the annual deficits of observed precipitation totals D (mm/decade) during the years 1951–2015



Rycina 7. Rozkład przestrzenny współczynnika trendu liniowego wskaźnika CVP (na dekadę) w okresie 1951–2015

Figure 7. The spatial distribution of trend coefficient of CVP index (per decade) during the years 1951–2015



procesu fotosyntezy, przy czym szybsze tempo sekwestracji przez roślinność leśną wymaga odpowiednich w tym procesie zasobów wodnych w środowisku. Z drugiej zaś strony, przy wyższych koncentracjach CO<sub>2</sub> w atmosferze wzrasta wskaźnik efektywności wykorzystania wody przez rośliny, definiowany jako stosunek strumienia dwutlenku węgla do strumienia pary wodnej (Keenan et al. 2013; Lindner et al. 2014). Proces ten może ograniczać negatywne skutki wzrostu niedoborów opadów atmosferycznych na produktywność lasów.

## Konflikt interesów

Autor deklaruje brak potencjalnych konfliktów.

## Źródła finansowania badań

Badania sfinansowano ze środków własnych Katedry Meteorologii i Klimatologii, Wydział Nauk Geograficznych, Uniwersytet Łódzki.

## Literatura

- Abakumova G.M., Feigelson E.M., Russak V., Stadnik V.V. 1996. Evaluation of long-term changes in radiation, cloudiness, and surface temperature on the territory of the Former Soviet Union. *Journal of Climate* 9: 1319–1327. DOI 10.1175/1520-0442(1996)009<1319:EOLTCI>2.0.CO;2.
- Abtew W., Melesse A. 2013. *Evaporation and Evapotranspiration: Measurements and Estimations*. Springer, Dordrecht-Heidelberg-New York-London, 206 s. ISBN 978-94-007-4736-4.
- Allen C.D., Macalady A.K., Chenchouni H., Bachelet D., McDowell N., Vennetier M., et al., 2010. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest Ecology and Management* 259(4): 660–684. DOI 10.1016/j.foreco.2009.09.001.
- Allen R.G., Pereira L.S., Raes D., Smith M. 1998. *Crop evapotranspiration – Guidelines for computing crop water requirements*. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56, FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 15 s. ISBN 92-5-104219-5.
- Bac S., Rojek M. 2012. *Meteorologia i klimatologia w inżynierii środowiska*, wyd. 2, Wydawnictwo Uniwersytetu Przyrodniczego we Wrocławiu, Wrocław, 276 s. ISBN 978-83-7717-112-7.
- Budyko M.I. 1975. *Klimat i życie*. PWN, Warszawa, 526 s.
- Charru M., Seynave I., Morneau F., Bontemps J.-N. 2010. Recent changes in forest productivity: an analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management* 260(5): 864–874. DOI 10.1016/j.foreco.2010.06.005.
- Czarnecka M., Nidzgorska-Lencewicz J. 2012. Wieloletnia zmienność sezonowych opadów w Polsce. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* t. 12, z. 2(38): 45–60.
- Danielak D., Lenart W. 1989. Wyznaczanie parowania terenowego w Polsce metodą kompleksową. *Roczniki Akademii Rolniczej w Poznaniu CCI, Melioracje* 8: 41–51.
- IPCC 2007. *WGI fourth assessment report to climate change: the physical science basis; summary for policymakers*. Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC, Geneva. ISBN 978-0-521-88009-1 hardback, ISBN 978-0-521-70596-7 paperback.
- Jaworski A., Pach M. 2013. Zmiany udziału buka, jodły i świerka w dolnoregłowych drzewostanach naturalnych w rezerwacie „Dolina Łopusznej (Gorczański Park Narodowy)”. *Sylwan* 157 (3): 213–222.
- Jokiel P. 2007. Zmiany, zmienność i ekstremalne sumy parowania terenowego i ewapotranspiracji potencjalnej w Łodzi w drugiej połowie XX wieku. *Acta Universitatis Lodziensis. Folia Geographica Physica* 8: 63–88.
- Jung M. et al. 2010. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature* 467: 951–954. DOI 10.1038/nature09396.
- Keenan T.F., Hollinger D.Y., Bohrer G., Dragoni D., Munger J.W., Schmid H.P., Richardson A.D. 2013. Increase in forest water-use efficiency as atmospheric carbon dioxide concentrations rise. *Nature* 499: 324–327. DOI 10.1038/nature12291.
- Kędziora A. 1999. *Podstawy agrometeorologii*. Państwowe Wydawnictwo Rolnicze i Leśne, Poznań, 364 s. ISBN 83-09-01641-7.
- Kozuchowski K. 2013a. Ocena higroklimatycznych warunków wegetacji w Polsce. *Monitoring Środowiska Przyrodniczego* 14: 103–111.
- Kozuchowski K. 2013b. Saldo promieniowania i higroklimatyczne warunki wegetacji w Polsce. *Przegląd Geofizyczny* LVIII (1–2): 41–54.
- Kozuchowski K. 2014. *Meteorologia i klimatologia dla studentów leśnictwa*. Wydawnictwo Uniwersytetu Łódzkiego, Łódź, 370 s. ISBN 978-83-7969-414-3.
- Launiainen S., Rinne J., Pumpanen J., Kulmala L., Kolari P., Keronen P., Siivola E., Pohja T., Hari P., Vesala T. 2005. Eddy covariance measurement of CO<sub>2</sub> and sensible and latent heat fluxes during a full year in a boreal pine forest trunk-space. *Boreal Environment Research* 10: 569–588.
- Lindner M., Fitzgerald J.B., Zimmermann N.E., Reyer C., Delzon S., van der Maaten E, Schelhaas M.-J., Lasch P., Eggers J., van der Maaten-Theunissen M., Suckow F., Psomas A., Polter B., Hanewinkel M. 2014. Climate change and European forests: What do we know, what are the uncertainties, and what are the implications for forest management? *Journal of Environmental Management* 146: 69–83. DOI 10.1016/j.jenvman.2014.07.030.
- Łabędzki L., Bąk B., Kanecka-Geszke E. 2012. Wielkość i zmienność ewapotranspiracji wskaźnikowej według Penmana-Monteitha w okresie wegetacyjnym w latach 1970–2004 w wybranych rejonach Polski. *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie* t. 12, z. 2(38): 159–170.
- Łabędzki L., Kanecka-Geszke E., Bak B., Słowinska S. 2011. Estimation of Reference Evapotranspiration using the FAO Penman-Monteith Method for Climatic Conditions of Poland, in: Łabędzki L. (ed.), *Evapotranspiration*. InTech, 275–294. DOI 10.5772/14081. ISBN 978-953-307-251-7.
- Miara K., Paszyński J., Grzybowski J., 1987. Zróżnicowanie przestrzenne bilansu promieniowania na obszarze Polski. *Przegląd Geograficzny* LIX (4): 487–509.
- Milad M., Schaich H., Bürgi M., Konold W. 2011. Climate change and nature conservation in Central European forests: A review of consequences, concepts and challenges. *Forest Ecology and Management* 261(4): 829–843. DOI 10.1016/j.foreco.2010.10.038.
- Paluch R. 2015. Wieloletnie zmiany składu gatunkowego drzewostanów naturalnych w Puszczy Białowieskiej. *Sylwan* 159 (4): 278–288.

- Paszyński J., Kędziora A., Tuchołka S., Kapuściński J., Olejnik J. 1995. Wpływ rodzaju powierzchni czynnej na strukturę bilansu cieplnego, w: Krawczyk B., Błażejczyk K. (red.), *Współczesne badania klimatologów polskich w kraju i za granicą. Sympozjum klimatologiczne z okazji 40-lecia Zakładu Klimatologii IGiPZ PAN, Radzików, 7-8 listopada 1994 r. Conference Papers 23*. Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania PAN, Warszawa, 69–92.
- Paterson S.S. 1956. The forest area of the world and its potential productivity. Royal University of Göteborg, 216 s.
- Rojek M. 2001. Klimatyczny bilans wodny Polski w okresie 1961-1995. Plansza 27, w: Koźmiński Cz., Michalska B., *Atlas klimatyczny ryzyka upraw roślin w Polsce*. Akademia Rolnicza w Szczecinie, Uniwersytet Szczeciński, Szczecin.
- Rojek M., Wiercioch T. 1995. Zmienność czasowa i przestrzenna parowania wskaźnikowego, ewapotranspiracji aktualnej i niedoboru opadów w Polsce nizinnej w okresie 1951-1990. *Zeszyty Naukowe Akademii Rolniczej we Wrocławiu, Monografie* 6, 238, 51 s.
- Siedlecki M., Pawlak W., Fortuniak K., Zieliński M. 2016. Wetland evapotranspiration: Eddy covariance measurement in the Biebrza valley, Poland. *Wetlands* 36(6): 1055–1067. DOI 10.1007/s13157-016-0821-0.
- Siwecki R., Ufnalski K. 1998. Review of oak stand decline with special reference to the role of drought in Poland. *European Journal of Forest Pathology* 28(2): 99–112. DOI 10.1111/j.1439-0329.1998.tb01171.x.
- Solberg S. 2004. Summer drought: a driver for crown condition and mortality of Norway spruce in Norway. *Forest Pathology* 34(2): 93–104. DOI 10.1111/j.1439-0329.2004.00351.x.
- Szczygieł R., Ubysz B., Piwnicki J. 2008. Wpływ zmian klimatycznych na kształtowanie się zagrożenia pożarowego lasów w Polsce. *Leśne Prace Badawcze* 69(1): 67–72.
- Szczygieł R., Ubysz B., Kwiatkowski M., Piwnicki J. 2008. Klasyfikacja zagrożenia pożarowego lasów Polski. *Leśne Prace Badawcze* 70 (2): 137-141. DOI: 10.2478/v10111-009-0013-2.
- Uscka-Kowalkowska J., Przybylak R., Vizi Z., Araźny A., Kejna M., Maszewski R. 2007. Variability to global solar radiation in Central Europe during the period 1951-2005 (on the basis of data from NCEP/NCAR reanalysis project). *Geographica Polonica* 80(2): 59–68.
- Wawrzoniak J., Boczoń A., Hildebrand R., Kantorowicz W., Kluziński L., Kowalska A., Lech P., Małachowska J., Piwnicki J., Szczygieł R., Ślusarski S., Zajączkowski G. 2017. Stan uszkodzenia lasów w Polsce w 2016 roku na podstawie badań monitoringowych. Instytut Badawczy Leśnictwa, Zakład Zarządzania Zasobami Leśnymi. Sękocin Stary. ISBN 978-83-62830-62-6.
- Zawora T., Ziernicka A. 2003. Precipitation variability in time in Poland in the light of multi-annual mean values (1891-2000). *Acta Universitatis Wratislaviensis* 2542, *Studia Geograficzne* 75: 123–128.
- Żmudzka E. 2002. O zmienności opadów atmosferycznych na obszarze Polski nizinnej w drugiej połowie XX wieku. *Wiadomości IMGW* 25(46), z. 4: 23–38.