

KATARZYNA BARAŃSKA, WOJCIECH KĘDZIORA

Analiza zmian czasowych bonitacji siedlisk leśnych dla sosny w Polsce na podstawie danych z WISL

Analysis of temporal changes of Scots pine stand site index in Poland based on data from NFI

ABSTRACT



Barańska K., Kędziora W. 2021. Analiza zmian czasowych bonitacji siedlisk leśnych dla sosny w Polsce na podstawie danych z WISL. Sylwan 165 (10): 716-724. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylwan.2021036>.

All tree species are necessary for sustainability of biocenosis and natural environment homeostasis. However, some of them are treated as priority. Scots pine, due to climate and soil conditions, dominates in the Polish forests. Better knowledge of temporal patterns of its growth will contribute to the enrichment of basic knowledge about this species, and thus allow for more precise management in forest ecosystems; especially in the context of modern problems of global warming. The objectives of this study were: (I) to study the changes in the site index of Scots pine stands in Poland over time, and (II) to analyze temporal changes of the relationship between stand characteristics (age and site type) and the site index. The analysis was based on the data obtained from three full cycles of National Forest Inventory, which had been held in Poland in the years 2005-2019. Main findings of this paper include an increase in the value of site index in the last 15 years between each NFI cycle. The dependence of the site index on age was shown – the older the forest stand is, the lower the value of its site index. In each age class increase in site index values between NFI cycles was observed. Most of analyzed lowland forest sites showed increase in its value. The highest values of the site index were found in mixed fresh deciduous forest site type, while the lowest characterized the swamp coniferous forest site type. This forest site type had also the lowest differences of site index values between all analyzed cycles. Increase in site index values in general, in age classes as well as along the forest site quality can be connected with nitrogen depositions, climate warming or higher quality of silviculture.

KEY WORDS

NFI, Scots pine, site index, age class, lowland forest site types

ADDRESSES

Katarzyna Barańska ⁽¹⁾ – e-mail: 1.baranska.katarzyna@gmail.com

Wojciech Kędziora ⁽²⁾ – e-mail: wojciech_kedziora@sggw.edu.pl

⁽¹⁾ Wydział Leśny, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

⁽²⁾ Katedra Urządzania Lasu, Dendrometrii i Ekonomiki Leśnictwa, SGGW w Warszawie; ul. Nowoursynowska 159, 02-776 Warszawa

Wstęp

Obecne zmiany klimatu mają znaczny wpływ na środowisko przyrodnicze Polski ukształtowane przez charakterystyczny dla naszej szerokości geograficznej obieg materii i energii, ale też przez

cechy krajobrazu powstałe w przeszłości geologicznej [Starkel, Kundzewicz 2008]. Stworzone w XXI wieku scenariusze opisujące zmiany klimatu nie pozwalają na jednoznaczne określenie kierunku oraz tempa tych zmian [Climate... 2019]. Jednak zakłada się, że zmiany klimatyczne będą miały istotne znaczenie dla trwałości lasów [Brzeziecki 1995; Kundzewicz 2013]. Niezależnie od tych zmian lesistość Polski stale wzrasta, lecz zalesienia dotyczą głównie gruntów najniższych klas [Starkel, Kundzewicz 2008], zwiększając w lasach udział ubogich siedlisk.

Wszystkie gatunki drzew są istotne dla trwałości biocenozy oraz homeostazy środowiska przyrodniczego, jednak niektóre są traktowane priorytetowo. Głównym gatunkiem produkcyjnym polskich lasów jest sosna zwyczajna *Pinus sylvestris* L. Skutki zmian klimatycznych mogą negatywnie wpływać na trwałość drzewostanów sosnowych, a tym samym na lesistość w Polsce [Borecki i in. 2017].

Aby gospodarka leśna spełniała cel, jakim jest trwały i zrównoważony rozwój lasu, kluczowe jest monitorowanie produktywności siedlisk. Informacje te stanowią podstawowe kryterium podczas podejmowania decyzji hodowlanych oraz gospodarczych dla poszczególnych siedlisk i gatunków [Socha, Orzeł 2011]. Na produktywność siedliska w głównej mierze wpływają warunki siedliskowe opisywane za pomocą typu siedliskowego lasu, który zawiera m.in. informacje o wilgotności i żyzności siedliska. Wilgotność jest ważną składową określającą siedlisko leśne, jednak zdefiniowanie żyzności, ze względu na wiele powiązanych ze sobą czynników, jest bardziej skomplikowane [Bruchwald, Kliczkowska 1997].

Jednym z głównych wskaźników określających produktywność jest bonitacja. Badania nad bonitacją rozpoczął Oettelt [1764], który uznał, że wysokość drzew jest wskaźnikiem „dobroci gleby”. W XIX wieku Heyer [1941] zaobserwował zależność pomiędzy zmianą wysokości drzewa a zwiększaniem jego miąższości. Prowadząc analizy, doszedł do wniosku, że określenie produktywności siedliska może być przeprowadzone przy użyciu innego czynnika, którym jest produktywność rosnącego na tym miejscu drzewostanu [Heyer 1845]. Pod koniec XIX wieku wielu badaczy uznało, że najlepszym sposobem wyznaczania produktywności siedliska jest określenie bonitacji na podstawie wieku oraz wysokości rosnącego na nim drzewostanu [Assmann 1968; Szytber 1995; Bruchwald, Kliczkowska 1997; Bruchwald i in. 1999; Skovsgaard, Vanclay 2008; Socha i in. 2017b]. Bonitacja może być wyrażana w formie przedziałów (klasa bonitacji) lub w formie liczbowej (wskaźnik bonitacji).

Bonitacja znajduje się w centrum zainteresowania wielu badaczy [Chen, Klinka 2000; Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha 2005]. Przedstawiane są różne koncepcje badania produktywności siedlisk leśnych i historii ich zmian [Skovsgaard, Vanclay 2008]. Battek i Perkal [1985] definiowali bonitację jako zespół cech ekologicznych siedliska. Bonitacja charakteryzuje możliwości wzrostowe gatunku, co pozwala na poznanie wpływu otoczenia na życie i funkcjonowanie drzew w ekosystemie leśnym [Chen, Klinka 2000; Kliczkowska, Bruchwald 2000; Socha 2005]. Problemem kształtowania się bonitacji w zależności od siedliska na terenie nizinnych krain przyrodniczo-leśnych Polski zajmowali się m.in. Bruchwald i Kliczkowska [1997]. Według Czarnowskiego [1948] początek rozwoju matematycznych modeli wzrostu w naukach przyrodniczych w Polsce sięga co najmniej lat 40. ubiegłego wieku. Jednak rozwój modeli bonitacyjnych w Polsce zaczął przyspieszać dopiero w ostatnich dekadach [Cieszewski, Zasada 2002]. Pomimo wielu zastrzeżeń co do dokładności tablic zasobności zestawionych przez Szymkiewicza [2001] są one cały czas stosowane. Niemniej jednak zostało udowodnione, że modele matematyczne są lepszym wyborem, gdyż w przeciwieństwie do tablic umożliwiają nieliniową interpolację, co zapewnia dokładność obliczeń [Cieszewski, Zasada 2003]. W modelowaniu matematycznym lepiej niż klasa bonitacji sprawdza się liczbowy wskaźnik bonitacji. W leśnictwie jest on określany jako

wysokość, którą osiągnie bądź osiągnął drzewostan w przyjętym wieku bazowym [Socha i in. 2015], najczęściej 100 lat.

Wskaźnik bonitacji jest miarą wykorzystania zasobów siedliska, na które najmocniej wpływa żyzność gleby [Sacewicz, Bijak 2018]. Jeśli bonitacja jest niezmienna w czasie, przypuszczać można, że również warunki środowiska nie uległy przekształceniom [Socha i in. 2016]. Poznanie zmienności bonitacji w czasie i przestrzeni może pomóc w ustaleniu preferencji sosny. Za względu na dynamiczne zmiany klimatu analizy te są szczególnie istotne [Kędziora i in. 2020].

Celem pracy była analiza zmian wskaźnika bonitacji dla sosny zwyczajnej w ujęciu czasowym w Polsce. Dzięki poznaniu czynników, które mają wpływ na wzrost sosny oraz jej prawidłowy rozwój, gospodarowanie lasem może stać się efektywniejsze.

Material i metody

Analizę wykonano przy wykorzystaniu danych z trzech cykli Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu (WISL). W latach 2005-2009 odbywał się I cykl pomiarowy [Michalak i in. 2004], II cykl miał miejsce w latach 2010-2014 [Michalak i in. 2010], III obejmował lata 2015-2019 [Jabłoński i in. 2020]. W III cyklu ujednolicono wielkość powierzchni próbnych do 4 arów, gdyż w poprzednich latach była ona zmienna: od 2 do 5 arów. Pomiarowi pierśnicy podlegały wszystkie drzewa na powierzchni próbnej. Dodatkowo mierzona była wysokość średnich drzew, a wiek określany był na podstawie opisu taksacyjnego bądź szacunku taksatora w terenie (tab. 1).

Do pracy zostały wyselekcjonowane powierzchnie próbne, w których sosna zwyczajna stanowiła gatunek panujący. Odrzucono powierzchnie na siedliskach wyżynnych oraz górskich, ze względu na ich nieznaczną liczebność. W ramach wyboru powierzchni próbnych dokonano selekcji tylko tych spośród nich, na których dominacja sosny w poszczególnych cyklach była stała. Każda z wybranych powierzchni próbnych musiała zostać pomierzona podczas wszystkich badanych cykli. W przypadku wyboru powierzchni próbnych do analizy w podziale na klasy wieku wybrano tylko te, dla których w czasie pomiarów nie nastąpiła zmiana klasy wieku. Tak samo postąpiono w przypadku siedlisk leśnych. Do finalnej analizy wybrano po 11 911 powierzchni próbnych w każdym z trzech cykli. Liczbę tę ograniczono do 6113 (dla każdego cyklu) w przypadku analizy w klasach wieku oraz 10 774 (dla każdego cyklu) w przypadku analizy w siedliskach leśnych.

Po wyczytaniu oraz przygotowaniu bazy danych w środowisku R (www.r-project.org) dla każdej powierzchni próbnej wyznaczono przeciętną wysokość, którą przeliczono na wysokość górną H_{100} zgodnie ze wzorem 1 z tabeli 3 z pracy Bekera [2007]. Następnie na jej podstawie został obliczony wskaźnik bonitacji (SI [m]) drzewostanów sosnowych na powierzchniach badawczych. W tym celu skorzystano ze wzoru opracowanego w badaniach Sochy i in. [2017a]:

Tabela 1.

Minimum (Min), maksimum (Max), mediana (Me), średnia (M) i odchylenie standardowe (SD) wieku (A [lata]) i wysokości (H [m]) dla poszczególnych cykli WISL (1-3)

Minimum (Min), maximum (Max), median (Me), mean (M) and standard deviation (SD) of age (A [years]) and height (H [m]) for individual NFI cycles (1-3)

	1		2		3	
	A	H	A	H	A	H
Min	8	2,5	13	4,0	11	5,0
Max	220	37,0	225	38,0	230	42,0
Me	55,0	19,5	60,0	21,0	67,0	23,2
M	57,9	18,8	63,1	20,3	69,5	22,8
SD	25,10	5,71	25,50	5,46	25,20	5,11

$$SI = H \frac{100^{b_1} \left\langle T^{b_1} \left\{ H - b_3 + \left[(H - b_3)^2 + \frac{2b_2 H}{T^{b_1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + b_2 \right\rangle}{T^{b_1} \left\langle 100^{b_1} \left\{ H - b_3 + \left[(H - b_3)^2 + \frac{2b_2 H}{T^{b_1}} \right]^{\frac{1}{2}} \right\} + b_2 \right\rangle}$$

gdzie:

H – górna wysokość drzewostanu [m],

T – wiek drzewostanu [lata],

b_1, b_2, b_3 – parametry równania w rozbiu na krainy przyrodniczo-leśne (tab. 2).

Na podstawie otrzymanych wyników przeanalizowano zmienność bonitacji w drzewostanach sosnowych na terenach nizinnych Polski na przestrzeni trzech cykli WISL – ze szczególnym uwzględnieniem zależności od typu siedliskowego lasu oraz klasy wieku drzewostanu panującego. Istotność różnic między medianami grup zbadano przy użyciu nieparametrycznego testu Friedmana [Hollander, Wolfe 1973] dla prób zależnych. W przypadku jego pozytywnego wyniku użyto testu porównań dla par Wilcozona-Manna-Whitneya z korekcją BH [Bauer 1972].

Wyniki

Na przestrzeni trzech cykli WISL występowała zmiana bonitacji w czasie (ryc. 1). Wraz z kolejnymi cyklami średnia wartość bonitacji zwiększała się. Średnio wskaźnik bonitacji cykli I i II wynosił odpowiednio 29,5 i 29,9 m. W cyklu III zauważalne było najwyższe zwiększenie średniej bonitacji, która wyniosła 30,9 m. Podobnie do wartości średniej zmieniała się wartość mediany, która wyniosła odpowiednio 29,5, 29,9 oraz 31,0 m dla kolejnych cykli. Odchylenie standardowe utrzymywało się na stałym poziomie (I cykl: 4,95 m, II cykl: 4,79 m, III cykl: 4,95 m). Najmniejsza wartość wskaźnika bonitacji odnotowana została w trakcie I cyklu i wynosiła 8,0 m. Wartość największa została stwierdzona również podczas badań w I cyklu i wyniosła 49,5 m. Mediana wskaźnika bonitacji różniła się istotnie pomiędzy cyklami (test Friedmana, $\chi^2=3377$, $p<0,0001$).

Wskaźnik bonitacji miał większą wartość w młodszych drzewostanach niż w drzewostanach starszych (ryc. 2). W każdym z cykli im drzewostan był starszy, tym średnia wartość wskaźnika bonitacji była mniejsza. Największe średnie wartości wskaźnika bonitacji występowały w najmłodszej klasie wieku (I), zaś najmniejsze w drzewostanach najstarszych (VI i starsze). Jedynie w I klasie wieku odnotowano nieznaczne zmniejszenie wartości średniego wskaźnika bonitacji pomiędzy cyklami I a II. W cyklu III, bez względu na klasę wieku, wskaźnik bonitacji zwiększył się w stosunku do poprzednich cykli. Zaobserwowano istotne statystycznie różnice

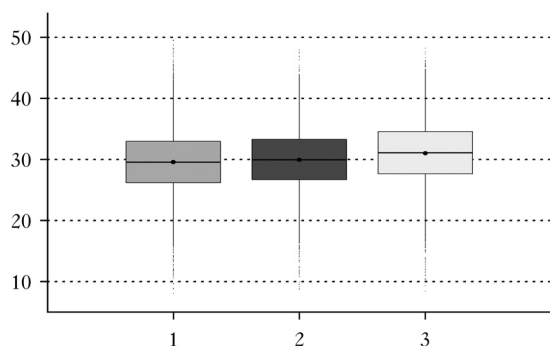
Tabela 2.

Parametry równania dla poszczególnych krain przyrodniczo-leśnych (I-VI) [Socha i in. 2017a]
Equation parameters for individual natural forest regions (I-VI) [Socha et al. 2017a]

	b1	b2	b3
I	1,281	8 813	32,68
II	1,503	2 582	39,75
III	1,326	9 709	26,72
IV	1,408	7 520	22,52
V	1,418	2 157	37,24
VI	1,460	10 090	15,14

w I i III klasie wieku pomiędzy cyklami I a III oraz II a III, w III klasie wieku pomiędzy cyklami I i II oraz II i III, natomiast w pozostałych klasach wieku pomiędzy wszystkimi badanymi cyklami.

W ciągu badanego okresu wartość średnia wskaźnika bonitacji finalnie zwiększyła się na wszystkich badanych siedliskach (ryc. 3). Podobnie zachowywała się wartość mediany, z jednym wyjątkiem – siedliskiem boru bagiennego. Zauważyć można, że w ciągu trzech cykli WISL średni wskaźnik bonitacji znacznie zwiększył się na powierzchniach o typach siedliskowych Bśw, Bw,

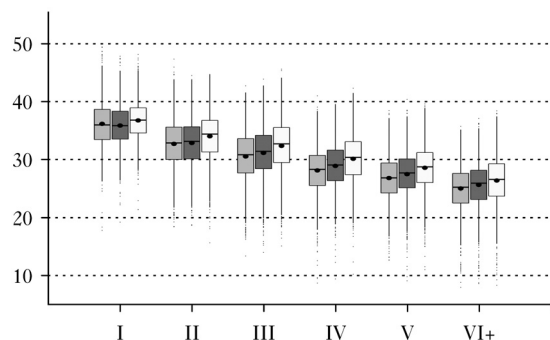


Ryc 1.

Zmiana wartości wskaźnika bonitacji [m] na przestrzeni trzech cykli WISL

Change in site index [m] values over three NFI cycles

pudełko – mediana oraz 1 i 3 kwartył, wąsy – zakres wartości mieszczących się w odległości 1,5 rozstępu kwartylowego od 1 bądź 3 kwartyła, punkty – wartości odstające, duża kropka – średnia
box – median, 1st and 3rd quartiles, whiskers – values within 1.5 inter-quartile range from 1st or 3rd quartile, respectively; points – outliers, big dot – mean

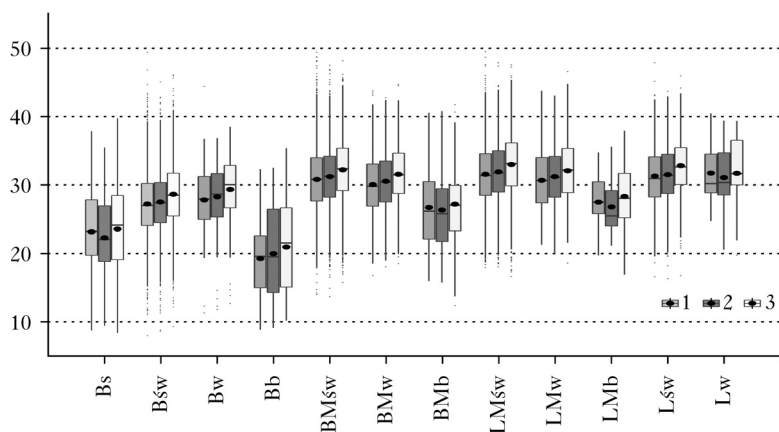


Ryc 2.

Zmiana wskaźnika bonitacji [m] na przestrzeni trzech cykli WISL (1-3) dla klas wieku (I-VI+)

Changes in the site index [m] over three cycles of NFI (1-3) for stand age classes (I-VI+)

oznaczenia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1



Ryc 3.

Zmiana wskaźnika bonitacji [m] na przestrzeni trzech cykli WISL (1-3) dla typów siedliskowych lasu

Changes in the site index [m] over three cycles of NFI (1-3) for forest site types

oznaczenia jak na rycinie 1; denotes as in figure 1

BMśw, LMśw i Lśw. Najmniejsze różnice średniej wartości wskaźnika bonitacji odnotowano na powierzchniach Bb. Na siedliskach Bs, BMb, LMb oraz Lw zaobserwowano zmniejszenie średniej wartości wskaźnika bonitacji, porównując I i II cykl, zaś w cyklu III w każdym z przypadków nastąpiło zwiększenie wartości tego wskaźnika. Minimalną wartość wskaźnika bonitacji zanotowano w każdym z cykli na powierzchni występującej na siedlisku Bśw. Wartości maksymalne każdego z cykli odnotowano natomiast na powierzchniach o siedlisku BMśw. Siedlisko Bb wyróżniało się najmniejszymi wartościami średnimi wskaźnika bonitacji spośród wszystkich innych analizowanych typów siedliskowych lasu. Zaobserwowano istotne statystycznie różnice pomiędzy wszystkimi badanymi cyklami dla siedlisk BMw i LMw, a także pomiędzy cyklami I i III oraz II i III dla Bs, Bśw, Bw, LMśw i Lśw. Pozostałe badane siedliska nie wykazały istotnych statystycznie różnic.

Dyskusja

W Polsce przez wiele lat bonitacja określana była na podstawie tablic zasobności i przyrostu drzewostanów [Szymkiewicz 2001]. Socha i in. [2015] doszli do wniosku, że stosowane klasy bonitacji, ze względu na skokowy charakter danych, mają ograniczone zastosowanie w obecnie używanych systemach informatycznych oraz statystycznym modelowaniu produktywności siedlisk. Miara produktywności siedlisk powinna być wyrażana w postaci liczb rzeczywistych, a więc mieć charakter ilościowy [Burkhardt, Tomé 2012]. Obecnie metodą oceny bonitacji siedliska jest wykorzystanie wskaźników, które charakteryzują produktywność w sposób ciągły. Taki sposób wyliczenia bonitacji został wykorzystany również w niniejszej pracy.

W analizach wykazano, że wskaźnik bonitacji siedlisk leśnych dla sosny w Polsce zwiększył się w poszczególnych cyklach WISL. Zauważono również, że istnieje zależność wartości wskaźnika bonitacji od wieku drzewostanu. Drzewostany młodsze charakteryzowały się większymi jej wartościami niż starsze. Ponadto zaobserwowano zwiększenie się wartości wskaźnika bonitacji w każdej klasie wieku w ciągu ostatnich trzech cykli WISL, gdy w tym czasie średni wiek badanych drzewostanów wzrósł z 59,9 do 64,9 roku. Zależności związane ze zróżnicowaniem bonitacji w czasie wzrostu drzewostanu uzyskali również inni badacze [Elfving i in. 1996; Kiviste 1999; Yue i in. 2014; Socha, Ochał 2017]. Z ich badań wynika, że nie tylko drzewostany z dominującą sosną, ale również pozostałe ważne gospodarczo gatunki wykazują zróżnicowanie bonitacji, która polepsza się wraz ze zmniejszającym się wiekiem drzewostanu. Warto zauważyć, że im drzewostany są starsze, tym większe jest prawdopodobieństwo (związane z historią gospodarki rolnej i leśnej), że wzrastają na uboższych wariantach siedliskowych, co może mieć istotny wpływ na ujemną korelację wskaźnika bonitacji z wiekiem drzewostanu [Tymińska-Czabańska i in. 2021]. Jednocześnie młodsze drzewostany charakteryzują się większą plastycznością, dzięki czemu mogą łatwiej reagować na zmieniające się warunki otoczenia, np. poziom wody gruntowej [Socha 2012]. Należy jednocześnie podkreślić, że użyty model bonitacyjny [Socha i in. 2017a] opiera się na analizie szerokiego materiału badawczego – jego część rosła w innych warunkach środowiskowych i gospodarczych niż obecnie. Uśrednienie danych do modelu mogło spowodować zaburzenie wyników obliczeń w niniejszej pracy. Należałoby rozważyć stworzenie modeli bonitacyjnych podzielonych ze względu na wiek drzewostanu.

Zmiany wskaźnika bonitacji w drzewostanach sosnowych Polski analizowali Bruchwald i Kliczkowska [1997]. W badaniach nad zmiennością siedliskową uzyskali dla Bśw średnią wartość bonitacji 23 m, dla BMśw – 27 m, zaś dla Lśw – 31 m. Z kolei w niniejszej pracy, opartej o dane z WISL, otrzymano następujące średnie wartości wskaźnika bonitacji ze wszystkich badanych cykli: Bśw – 27,8 m, BMśw – 31,4 m, LMśw – 32,1 m, Lśw – 31,8 m. Różnice mogą wyini-

kać z zastosowania innego modelu bonitacyjnego (Bruchwald i Kliczkowska [1997] bazowali na wysokości średniej). Niemniej zauważalne jest zwiększenie się wartości wskaźnika bonitacji siedlisk borowych wraz z biegiem czasu. W pracy Sewerniaka [2013] z południowo-zachodniej Polski (model bonitacyjny Bruchwalda i Kliczkowskiej [2000]) otrzymano dla siedlisk świeżych Bśw 19,4 m, BMśw – 23,1 m, a LMśw – 25,3 m. Uzyskane wyniki, przy innym modelu i terenie badań, są niższe niż w niniejszej pracy, ale wykazują podobny trend zwiększania się wartości. Zmiany te mogą być powiązane z fluktuacją warunków klimatycznych oraz ociepleniem. W swoich badaniach Eriksson i Karlsson [1996] zauważyli, że największe zmiany bonitacji występują wraz ze zwiększaniem się ilości azotu w środowisku. Zmiana wartości wskaźnika bonitacji może być również następstwem koncentracji dwutlenku węgla w atmosferze oraz wzrostu ilości azotu w glebie [Socha 2008]. W badaniach nad zwiększeniem się stężenia CO₂ w atmosferze [Terrer i in. 2021] zaobserwowano jego wpływ na bujniejszy wzrost roślin, ale jednocześnie negatywny wpływ na zdolność gleby do przechowywania węgla. Związane jest to ze zwiększoną aktywnością mikroorganizmów oraz z procesami zachodzącymi w glebie, przez co uwalniany jest dwutlenek węgla. Zachodzące zmiany nie tylko wpływają na zwiększanie się wartości wskaźnika bonitacji (nawet o 60% na koniec XX wieku [Bontemps i in. 2013]), ale też nie są one liniowe [Sharma i in. 2012] i zwiększają tempo na przełomie mileniów [Mensah i in. 2021]. Zmiany klimatyczne będą z biegiem czasu coraz bardziej wpływać na stabilność ekosystemów leśnych. Zjawiska, których możemy się spodziewać, tj. wzrost temperatury z cieplejszymi latami i znacznie cieplejszymi zimami, przyczynią się do wydłużenia okresu wegetacyjnego. Z badań Alberta i Schmidta [2010] wynika, że produktywność siedlisk dla różnych gatunków lasotwórczych zależy od warunków temperaturowych oraz ilości opadów.

Produkcyjność siedlisk jest zmienna dla terenów leśnych. Stanowi ilościowe oszacowanie potencjalnej do wyprodukowania biomasy roślinnej w danym miejscu [Bontemps, Bouriaud 2014]. Dla sprawnego działania zrównoważonej gospodarki leśnej istotne jest, aby szacunki produktywności siedliska były wiarygodne. Podczas rozważania decyzji dotyczących konkretnego obszaru, składu gatunkowego, zabiegów hodowlanych czy prognozy pozyskania drewna są one często kluczowym kryterium [Splechtna 2001; Pretzsch i in. 2008]. Wiek drzewostanu jest istotnym czynnikiem mającym wpływ na wyniki obliczeń wskaźnika bonitacji [Socha i in. 2016]. Bonitacja charakteryzuje możliwości wzrostowe gatunku, co pozwala na pomiar wpływu otoczenia na życie drzew. Jeśli bonitacja byłaby niezmienna w czasie, przypuszczać można, że również warunki środowiska nie uległy przekształceniom. Jednak z niniejszych badań wynika, że te zmiany zachodzą, a więc poznanie zmienności bonitacji w czasie oraz przyczyn zjawiska może pomóc w ustaleniu preferencji siedliskowych sosny w zmieniającym się klimacie.

Wnioski

- ✦ Na podstawie danych z trzech cykli WISL stwierdzono zwiększenie się wartości wskaźnika bonitacji w czasie.
- ✦ W drzewostanach młodszych wskaźnik bonitacji wykazuje wyższą wartość niż w drzewostanach dojrzałych.
- ✦ Na większości analizowanych siedlisk leśnych z dominującą sosną nastąpiło zwiększenie wartości wskaźnika bonitacji w czasie.
- ✦ Największe wartości średnie wskaźnika bonitacji zaobserwowano na siedlisku LMśw, zaś najmniejsze na Bb.
- ✦ Zwiększenie wartości wskaźnika bonitacji w czasie jest widoczne i niezależne od wieku drzewostanu bądź siedliska leśnego.

Literatura

- Albert M., Schmidt M. 2010. Climate-sensitive modelling of site-productivity relationships for Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and common beech (*Fagus sylvatica* L.). For. Ecol. Manage. 259: 739-749. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.04.039>.
- Assmann E. 1968. Nauka o produktywności lasu. PWRiL, Warszawa.
- Battek J., Perkal J. 1958. Bonitacja i wysmukłość drzewostanów. Applicationes Mathematicae 3 (3-4): 285-306.
- Bauer D. F. 1972. Constructing Confidence Sets Using Rank Statistics. Journal of the American Statistical Association 67 (339): 687-690. DOI: <https://doi.org/10.1080/01621459.1972.10481279>.
- Beker C. 2007. Wysokość górna w drzewostanach sosnowych. Sylwan 151 (3): 36-42. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2006035>.
- Bontemps J., Bouriaud O. 2014. Predictive approaches to forest site productivity: recent trends, challenges and future perspectives. Forestry: An International Journal of Forest Research 87 (1): 109-128. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpt034>.
- Bontemps J. D., Hervé J. C., Dhôte J. F. 2013. Long-Term Changes in Forest Productivity: A Consistent Assessment in Even-Aged Stands. Forest Sciences 55 (6): 549-564. DOI: <https://doi.org/10.1093/forests/55.6.549>.
- Borecki T., Orzechowski M., Stępień E., Wójcik R. 2017. Przewidywane oddziaływanie zmian klimatu na ekosystemy leśne oraz ich konsekwencje w zarządzaniu lasu. Sylwan 161 (7): 531-538. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2017008>.
- Bruchwald A., Dudek A., Michalak K., Rymer-Dudzinska T., Wroblewski L., Zasada M. 1999. Model wzrostu dla drzewostanów świerkowych. Sylwan 143 (1): 19-31.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 1997. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. Prace IBL A 838.
- Bruchwald A., Kliczkowska A. 2000. Kształtowanie się bonitacji dla drzewostanów sosnowych Polski. W: Bruchwald A., Jakubczyk H. [red.]. Przestrzenne zróżnicowanie wzrostu sosny. Fundacja Rozwój Szkoły Głównej Gospodarstwa Wiejskiego, Warszawa.
- Brzeziecki B. 1995. Skale nominalne wymagań klimatycznych gatunków leśnych. Sylwan 139 (3): 53-65.
- Burkhardt H. E., Tomé M. 2012. Modeling forest trees and stands. Springer Dordrecht Heidelberg, New York, London.
- Chen H. Y. H., Klinka K. 2000. Height Growth Models for High-Elevation Subalpine Fir, Engelmann Spruce, and Lodgepole Pine in British Columbia. Western Journal of Applied Forestry 15 (2): 62-69. DOI: <https://doi.org/10.1093/wjaf/15.2.62>.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2002. Dynamiczna forma anamorficznego modelu bonitacyjnego dla sosny pospolitej w Polsce. Sylwan 146 (7): 17-24.
- Cieszewski C. J., Zasada M. 2003. Model bonitacyjny dla sosny na podstawie tablic zasobności Szymkiewicza. Sylwan 147 (1): 51-62. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2003006>.
- Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. 2019. IPCC.
- Czarnowski M. S. 1948. Przyrost wysokości sosny pospolitej. Kosmos 1948-1951-1952 1-3: 283-317.
- Elfving B., Tegnhammar L., Tveite B. 1996. Studies on Growth Trends of Forests in Sweden and Norway. W: Growth Trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_6.
- Eriksson H., Karlsson K. 1996. Long-Term Changes in Site Index in Growth and Yield Experiments with Norway Spruce (*Picea abies*, [L.] Karst) and Scots Pine (*Pinus sylvestris*, L.) in Sweden. W: Growth Trends in European Forests. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-642-61178-0_8.
- Heyer C. 1841. Die Waldtrags-Regelung. Verlag von B.C. Ferber, Giessen.
- Heyer C. 1845. Wedenkinds Neue Jahrb. Climate Change: The Scientific Basis. Cambridge University Press, Cambridge 30: 1-127.
- Hollander M., Wolfe D. 1973. Nonparametric Statistical Methods. John Wiley & Sons, New York.
- Jabłoński M., Budniak P., Mionskowski M., Lech P., Przypaśniak J., Nerój B., Sroga R., Zajączkowski S. 2020. Instrukcja wykonywania Wielkoobszarowej Inwentaryzacji Stanu Lasu. Sękocin Stary.
- Kędziora W., Tomusiak R., Borecki T. 2020. Badania nad bonitacją drzewostanów w świetle literatury. Leś. Pr. Bad. 81 (2): 91-98. DOI: <https://doi.org/10.2478/frp-2020-0010>.
- Kiviste A. 1999. Site index change in the 1950-1990s according to Estonian forest inventory data. W: Karjalainen T., Spiecker H., Laroussinie O. [red.]. Causes and consequences of accelerating tree growth in Europe. EFI. 87-100.
- Kliczkowska A., Bruchwald A. 2000. Kształtowanie się bonitacji drzewostanów świerkowych na terenach górskich. Sylwan 144 (9): 5-15.
- Kundzewicz W. Z. 2013. Ekstremalne stany pogody, a zmiany klimatyczne – stan i perspektywy; Ocena zagrożeń abiotycznych i możliwości ich ograniczenia w związku ze zmianami klimatycznymi; stan i perspektywy (szkody klimatyczne): huragany, śniegołomy, powódzie, susze, niskie i wysokie temperatury. Instytut Badawczy Leśnictwa.
- Mensah A. A., Holmström E., Petersson H., Nyström K., Mason E. G., Nilsson U. 2021. The millennium shift: Investigating the relationship between environment and growth trends of Norway spruce and Scots pine in northern Europe. Forest Ecology and Management 481: 118727. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.118727>.

- Michalak R., Broda J., Głaz J., Jabłoński M., Mionskowski M., Lech P., Smykała J., Wawrzoniak J., Zajączkowski S. 2004. Instrukcja wykonywania wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu. Warszawa.
- Michalak R., Broda J., Głaz J., Jabłoński M., Mionskowski M., Lech P., Smykała J., Wawrzoniak J., Zajączkowski S. 2010. Instrukcja wykonywania wielkoobszarowej inwentaryzacji stanu lasu. Warszawa.
- Oettelt K. C. 1764. Practischer Beweis, daß die Mathesis bey dem Forstwesen unentbehrliche Dienste thue. Joh. Andreas Schill, Arnstadt.
- Pretzsch H., Grote R., Reineking B., Rötzer T., Seifert S. 2008. Models for forest ecosystem management: a European perspective. *Annals of Botany* 101: 1065-1087. DOI: <https://doi.org/10.1093/aob/mcm246>.
- Sacewicz W. A., Bijak S. 2018. Wpływ wybranych właściwości gleby na bonitację drzewostanów dębowych w Nadleśnictwie Międzyrzec. *Sylvan* 162 (1): 3-11. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2017118>.
- Schwappach A. 1943. Ertragstafeln der wichtigeren Holzarten. Druckerei Merkur, Praga.
- Sewerniak P. 2013. Bonitacja drzewostanów sosnowych w południowo-zachodniej Polsce w odniesieniu do typów siedliskowych lasu i taksonów gleb. *Sylvan* 157 (7): 516-525. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2013028>.
- Sharma R. P., Brunner A., Eid T. 2012. Site index prediction from site and climate variables for Norway spruce and Scots pine in Norway. *Scandinavian Journal of Forest Research* 27 (7): 619-636. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827581.2012.685749>.
- Skovsgaard J. P., Vanclay J. K. 2008. Forest site productivity: a review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. *Forestry* 81 (1): 13-31. DOI: <https://doi.org/10.1093/forestry/cpm041>.
- Socha J. 2005. Zależność pomiędzy wysokością górną a wysokością przeciętną w górskich drzewostanach świerkowych. *Sylvan* 149 (8): 10-17. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.9200518>.
- Socha J. 2008. Effect of topography and geology on the site index of *Picea abies* in the West Carpathian, Poland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 23: 203-213. DOI: <https://doi.org/10.1080/02827580802037901>.
- Socha J. 2012. Long-term effect of wetland drainage on the productivity of Scots pine stands in Poland. *Forest Ecology and Management* 274: 172-180. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2012.02.032>.
- Socha J., Bruchwald A., Neroj B., Gruba P., Wertz B., Ochał W., Pierzchański M. 2017a. Sprawozdanie końcowe z realizacji usługi badawczej pod nazwą „Aktualna i potencjalna produktywność siedlisk leśnych Polski dla głównych gatunków lasotwórczych”. Raport dla PGL LP.
- Socha J., Coops N. N. C., Ochał W. 2016. Assessment of age bias in site index equations. *iForest – Biogeosciences For.* 55, e1-e7. DOI: <https://doi.org/10.3832/ifer1548-008>.
- Socha J., Ochał W. 2017. Dynamic site index model and trends in changes of site productivity for *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn. in southern Poland. *Dendrobiology* 77: 45-57. DOI: <https://doi.org/10.12657/denbio.077.004>.
- Socha J., Ochał W., Grabczyński S., Maj M. 2015. Modele bonitacyjne dla gatunków lasotwórczych Polski opracowane na podstawie tablic zasobności. *Sylvan* 159 (8): 639-649. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2015011>.
- Socha J., Orzeł S. 2011. Dynamiczne krzywe bonitacyjne dla drzewostanów sosnowych Puszczy Niepołomickiej. *Sylvan* 155 (5): 301-312. DOI: <https://doi.org/10.26202/sylvan.2010078>.
- Socha J., Pierzchański M., Bałazy R., Ciesielski M. 2017b. Modelling top height growth and site index using repeated laser scanning data. *Forest Ecology and Management* 406 (10): 307-317. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.09.039>.
- Splechtina B. E. 2001. Height growth and site index models for Pacific silver fir in southwestern British Columbia. *Journal of Ecosystem Management* 1: 1-14.
- Starkel L., Kundzewicz Z. W. 2008. Konsekwencje zmian klimatu dla zagospodarowania przestrzennego kraju. *Nauka* (1): 85-101.
- Szyber J. 1995. Algebraiczny model określania bonitacji siedliska. *Sylvan* 139 (5): 21-24.
- Szymkiewicz B. 2001. Tablice zasobności i przyrostu drzewostanów ważniejszych gatunków drzew leśnych. PWRiL, Warszawa.
- Terror C., Phillips R. P., Hungate B. A., Rosende J., Pett-Ridge J., Craig M. E., Van Groenigen K. J., Keenan T. F., Sulman B. N., Magazyniier B. D., Rzesza P. B., Pellegrini A. F. A., Pendall E., Zhang H., Evans R. D., Carrillo Y., Fisher J. B., Van Sundert K., Vicca S., Jackson R. B. 2021. A trade-off between plant and soil carbon storage under elevated CO₂. *Nature* 591: 599-603. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41586-021-03306-8>.
- Tymińska-Czabańska L., Socha J., Maj M., Cywicka D., Hoang Duong X. V. 2021. Environmental Drivers and Age Trends in Site Productivity for Oak in Southern Poland. *Forests* 12: 209. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020209>.
- Yue C., Mäkinen H., Klädtke J., Kohnle U. 2014. An approach to assessing site index changes of Norway spruce based on spatially and temporally disjunct measurement series. *Forest Ecology and Management* 323: 10-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.03.031>.